

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

**ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 3 (90)

Нижний Новгород 2011

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 3 (90). – 359 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А.Б. Лоскутов (зам. гл. редактора), Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора),
В.В. Беляков (отв. секретарь), О.В. Пугина (отв. редактор),
Т.В. Третьякова (технич. секретарь), Т.П. Новикова (технич. редактор),
М.В. Ширяев (редактор электронного издания)

Члены редколлегии: О.М. Власова, В.Л. Башкатов, В.Г. Баранов,
В.П. Хранилов, А.А. Куркин, А.Ю. Панов, В.К. Майстренко,
А.М. Грошев, С.Н. Хрунков, С.В. Хватов, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко,
А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, Е.А. Чернышов, О.С. Кошелев, В.В. Глебов,
В.Ф. Кулепов, Е.Н. Соснина

УДК 050(06)
ББК 9я54

Электронная версия журнала:
<http://www.nntu.nnov.ru>

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2011

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

TRANSACTIONS
of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

№3 (90)

Nizhni Novgorod 2011

Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2011. № 3 (90). – 359 p.

The journal is issued 4 times a year

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD:

A.B. Loskutov (Deputy Editor-in-Chief), Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief),
V.V. Belyakov (Executive Secretary), O.V. Pugina (Executive Editor),
T.V. Tretyakova (Technical secretary), T.P. Novikova (Technical Editor),
M.V. Shiryaev (Editor of Electronic Edition)

Members of Editorial Board: O.M. Vlasova, V.L. Bashkatov, V.G. Baranov,
V.P. Khranilov, A.A. Kurkin, A.Y. Panov, V.K. Maystrenko,
A.M. Groshev, S.N. Khrunkov, S.V. Khvatov, I.O. Leushin, M.G. Mikhalevko,
A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, Y.A. Chernyshov, O.S. Koshelev, V.V. Glebov,
V.F. Kulepov, Y.N. Sosnina

Electronic version of the journal:
<http://www.nntu.nnov.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Шишков Г.И. Предельные аттенюаторы.....	11
Зельманов С.С. Обобщенный резонанс в линейных стационарных динамических системах.....	22
Ковалев Ф.Н. Просветные многопозиционные радиолокационные системы.....	30
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	38
Малашенко А.Е., Перунов В.В., Малашенко А.А. Сейсмоакустические средства регистрации подводных землетрясений.....	38
Пелиновский Е.Н., Зайцев А.И. Оценка и картирование опасности цунами на черноморском побережье Украины.....	44
Семин С.В. Моделирование двумерных и трехмерных бароклинных возмущений в стратифицированных бассейнах методами полнонелинейной численной модели.....	51
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	63
Качалов О.Б., Плесовских К.Ю., Ямпурин Н.П. Синтез устойчивой модели для расчета расхода нефтегазового потока на основе уравнения регрессии.....	63
Новокрещенов А.А., Хранилов В.П. Метод автоматического распараллеливания циклов и генерации параллельных программ для архитектуры CUDA.....	70
Ломакин Д.В., Иванова А.А., Ворон А.М. Диагностирование сложных технических и программных систем.....	83
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	89
Галкин В.В., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А., Горбачёв Е.А. Использование сплава ЭИ 878 в изготовлении листовых гофрированных панелей.....	89
Кожемякин В.П., Бондаренко Н.И., Котельников В.И. Обработка металла термодинамическим методом.....	96
Кабалдин Ю.Г. Квантовый подход к эволюции сложных систем.....	103
Пилипосян С.Е. Учет корреляции периода колебаний t и расстояния a центра масс физического маятника от оси вращения.....	110
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	119
Дмитриев С.М., Друмов И.В. Экспериментальные исследования системы электромагнитного подвеса модели ротора турбомашин атомной электрической станции с высокотемпературным реактором с газовой турбиной.....	119
Турченко М.В., Андреев В.В., Дунцев А.В. Моделирование коэффициента гидравлического трения при неустановившемся течении жидкости с помощью искусственных нейронных сетей.....	127
Кайдалов В.Б., Патрушев В.Л., Руин А.А., Соловьёв С.А. Проблемы моделирования динамики ротора при отказе электромагнитных подшипников.....	135

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	141
Ившин К.С., Ермолаева Л.Е. Методические основы дизайна полимерных панелей кузова автомобиля особо малого класса	141
Дыгало В.Г., Ревин А.А. Виртуально-физическая технология моделирования систем активной безопасности	146
Лакеев А.С., Молев Ю.И., Прошин Д.Н. Метод оценки параметров торможения транспортных средств с учетом требований технического регламента.....	156
Фулеп Т., Палкович Л., Надай Л. Качественный анализ и эксплуатационная надежность электронных тормозных систем большегрузных автомобилей.....	163
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	173
Нгуен Вьет Хоан. Обоснование проектных характеристик портовых буксиров для социалистической республики Вьетнам.....	183
Бимбереков П.А. Исследование на моделях судовых перекрытий с повышенным уровнем работоспособности при местных нагрузках	190
Зуев В.А., Грамузов Е.М., Семенов Д.А. Моделирование ледового сопротивления судов... ..	196
Химич С.А., Орлов Ю.Ф. Движение над границей раздела двух сред крыла конечного размаха.....	204
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	204
Тихомиров В.А., Хватов С.В. Сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты.....	215
Плехов А.С., Охотников М.Н., Титов В.Г. Задачи идентификации и оптимизации при энергосберегающем управлении электроприводами и алгоритмы их решения....	226
Друмов И.В. Микропроцессорная система управления положением ротора турбомашин ядерной энергетической установки.....	235
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	235
Гончар А.В., Мишакин В.В. Исследование процесса усталостного разрушения низкоуглеродистой стали 15ЮТА неразрушающими методами контроля	244
Ряпосов И.В., Клейнер Л.М., Шацов А.А., Закревская П.А. Строение речного мартенсита горячекатаной низкоуглеродистой мартенситной стали 15Х2Г2НМФБ... ..	250
Малов В.С., Васильев В.А. Исследование дефектов слитков из стали 14Х17Н2.....	256
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	256
Воротынцев В.М., Суворов С.С., Смирнов К.Ю. Газохроматографический анализ высокочистого оксида диазота.....	261
Козырин В.А., Флеров В.Н. Особенности катодного реагирования кислорода на угольных электродах в щелочно-цинкатных электролитах	267
Данов С.М., Сулимов А.В., Рябова Т.А., Овчаров А.А. Основные тенденции развития производства оксида пропилена.....	274
ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	274

Малкина М.Ю., Барабашина Ю.С. Взаимосвязь ставки рефинансирования, денежной массы и инфляции в российской экономике	281
Беляев О.Г., Корнилов Д.А. Методика комплексной оценки инновационного потенциала региона.....	289
Митяков Е.С., Корнилов Д.А. К вопросу о выборе весов при нахождении интегральных показателей экономической динамики.....	300
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	300
Петросян А.Д. Управление внешнеторговыми конфликтами как инструмент формирования имиджа страны на мировом рынке	308
Козырьков В.П. Эстетизм как фактор становления и развития социологии: романтизм как социокультурное пространство становления социологии.....	322
Мухина Т.Г. Международное сотрудничество в области дополнительного высшего профессионального образования.....	328
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	328
Вавилов В.Д. Математическая модель микросистемного акселерометра с электростатической обработкой.....	336
Корнилов А.В. Повышение надежности резервных систем ориентации на интегральных датчиках.....	341
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	341
Сангалова М.Е. Эксперименты с моделями топологических поверхностей как основа понимания их строения и свойств.....	347
Елисеев М.Е., Липенков А.В., Елисеев Е.М. О модели городского пассажирского транспорта: моделирование логики пассажира.....	353
Ерофеева Л.Н. Фрактальная размерность недифференцируемых функций.....	

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Shishkov G.I. Cutoff attenuators.....	11
Zelmanov S.S. The summarized resonance in the liner stationary dynamic system.....	22
Kovalev F.N. Forward-scattering multiradars on the basis of doppler frequency measurements.....	30
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	38
Malashenko A.E., Perunov V.V., Malashenko A.A. Theses seismoacoustical means of registration of underwater earthquakes.....	38
Pelinovsky E.N., Zaytsev A.I. The estimation and mapping of tsunami dangerous at the ukrainian black sea coast.....	44
Semin S.V. Two and three dimensional baroclinic perturbations modeling in closed stratified basins by methods of fully nonlinear numerical model.....	51
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	63
Kachalov O.B., Plesovskikh K.Y., Yampurin N.P. Synthesis of sustainable models for calculation of flowoil flows based on the regression equation.....	63
Novokreshchenov A.A., Hranilov V.P. Method of automatic loop parallelisation and generating parallel programs for the cuda architecture.....	70
Lomakin D.V., Ivanova A.A., Voron A.M. Diagnosis of complex hardware and software systems.....	83
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	89
Galkin V.V., Tereshchenko E.G., Derbenyov A.A., Gorbachyov E.A. Use of alloy эи 878 in manufacturing of the sheet goffered panels.....	89
Kozhemyakin V.P., Bondarenko N.I., Kotelnikov V.I. Metal processing thermodynamic method.....	96
Kabaldin J.G. Quantum aspects of the evolution of complex systems.....	103
Piliposan S.E. Recording of correlation of vibration period t and distance a of physical pendulum center of mass from axis of rotation.....	110
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	119
Dmitriev S.M., Drumov I.V. Experimental studies of the electromagnetic suspension system for the turbo machine rotor model of nuclear power plant with high-temperature reactor and gas turbine.....	119
Turchenko M.V., Andreev V.V., Duntsev A.V. Modelling of factor of the hydraulic friction at the unsteady current of the liquid by means of artificial neural networks.....	127
Kaydalov V.B., Patrushev V.L., Ruin A.A., Soloviev S.A. Modelling problems of the rotor dynamics in case of electromagnetc bearings failue.....	135

LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	141
Ivshin K.S., Ermolaeva L.E. Methodical base of the design of the polymeric panels of the basket of the mini car.....	141
Dygalo V.G., Revin A.A. Virtually-physical technology modeling active safety system.....	146
Lakeev A.S., Molev Y.I., Proshin D.N. The method of braking vehicles parameters estimation in accordance with the technical regulation requirements.....	156
Fulep T., Palkovics L., Nadai L. On qualitative and operational reliability of electronic brake systems for heavy duty vehicles.....	163
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	173
Nguyen Viet Hoan. justification of project performance port tugs for the socialist republic of vietnam.....	173
Bimberekov P.A. Modelling of ship floors with increased level of working capacity with local loads.....	183
Zuev V.A., Gramuzov E.M., Semenov D.A. Modeling of ship ice resistance.....	190
Khimich S.A., Orlov Y.F. The motion of the wing of the finite wingspan above the interface of two mediums.....	196
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	204
Tikhomirov V.A., Hvatov S.V. Benchmark analysis of the harmonic composition of the network current of the controlled rectifiers and frequency converters.....	204
Plehev A.S., Ohotnikov M.N., Titov V.G. Problems to identifications and optimization under economy control of electric drive and algorithms of their decision.....	215
Drumov I.V. Microprocessor-based position control system of a turbomachine rotor for nuclear power plant.....	226
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	235
Gonchar A.V., Mishakin V.V. The damage investigating of 1015 steel in the early stages of fatigue loading using nondestructive methods.....	235
Ryaposov I.V., Kleyner L.M., Shatsov A.A., Zakrevskaya P.A. Structure of lath martensite of hot-rolled low-carbon martensitic steel 15cr2mn2nimovnb.....	244
Malov V.S., Vasilev V.A. Research of defects of ingots from the steel 14x17H2.....	250
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES	256
Vorotyntsev V.M., Suvorov S.S., Smirnov K.Ju. Gas chromatography analysis of high purity nitrous oxide.....	256
Kozirin V.A., Flerov V.N. The specialties of oxygen cathode reaction on carbon electrodes in alkaline – zinc solutions.....	261
Danov S.M., Sulimov A.V., Ryabova T.A., Ovcharov A.A. The basic tendencies of development of production propylene oxide.....	267
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	274
Malkina M.Yu., Barabashina Yu.S. Interdependence of refinancing rate, monetary supply and inflation in russian economy	274

Beljaev O.G., Kornilov D.A. the technique of a complex estimation of innovative potential of region.....	281
Mitiakov E.S., Kornilov D.A. Regarding the issue of proper weighting coefficients in determination of integral indicators of economic dynamics.....	289
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	300
Petrosyan A.D. Management of the foreign trade conflicts as the tool of formation of country image in the world market.....	300
Kozirkov V.P. Aestheticism as a factor in formation and development of sociology: romanticism as asociocultural space formation of sociology.....	308
Mukhina T.G. The international cooperation in the field of additional higher vocational training.....	322
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	328
Vavilov V.D. Mathematical model integral akselerometre with electromagnetic works.....	328
Kornilov A.V. Standby system for integrated sensors reliability increase.....	336
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES	341
Sangalova M.E. Experiments with the models of topological surfaces as a basis for understanding of their structure and propeties.....	341
Eliseev M.E., Lipenkov A.V., Eliseev E.M. About the model of urban passenger transport: simulation of the logic of passenger.....	347
Erofeeva L.N. Fractal dimension of nondifferentiated functions.....	353

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.8

Г.И. Шишков

ПРЕДЕЛЬНЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описаны принцип действия и конструкции предельных аттенюаторов.

Ключевые слова: предельные аттенюаторы, предельные волноводы, ослабление, погрешности

Введение

Предельные аттенюаторы относятся к классу плавнопеременных измерительных аттенюаторов, предназначенных для получения прямоотсчетного ослабления высокочастотных сигналов в коаксиальных трактах [1]. Основными их преимуществами является широкополосность и возможность строгого расчета значения погонного ослабления в линейной части рабочей характеристики.

Характерной особенностью аттенюаторов предельного типа является рассогласование как на входе, так и на выходе, поскольку их входное (выходное) сопротивление чисто реактивное [2]. В связи с этим к входу и выходу предельных аттенюаторов необходимо подключать согласованные фиксированные аттенюаторы с ослаблениями 5–10 дБ либо, что практически чаще всего делается, осуществлять согласование непосредственно в местах расположения возбуждающих и воспринимающих устройств. Суммарное начальное ослабление предельного аттенюатора в этом случае повышается и достигает 15–30 дБ.

На рис. 1 показана типичная рабочая характеристика согласованного предельного аттенюатора (A_0 обозначено начальное ослабление, за пределами которого характеристику аттенюатора можно считать линейной). Нелинейный участок характеристики определяется реакцией нагрузки на выходе аттенюатора при сильной связи между входом и выходом, а также наличием волн высших типов вблизи возбуждающего устройства аттенюатора, которые ослабляются быстрее, чем основной тип волны. Выше значения A_0 начинается расчетный линейный участок ослабления аттенюатора. Градуировка у таких аттенюаторов абсолютная, не требующая сравнения с эталонами. Максимальная величина ослабления определяется экранировкой узлов аттенюатора и подсоединительных разъемов внешних коаксиальных линий.

Предельные измерительные аттенюаторы в СВЧ диапазонах применяются в качестве самостоятельных приборов, встроенных устройств для вывода и точного отчета сигнала в генераторах, анализаторах спектра и т.д., а на низких частотах, например, на частоте около 5 МГц используются как эталонные меры ослабления [3].

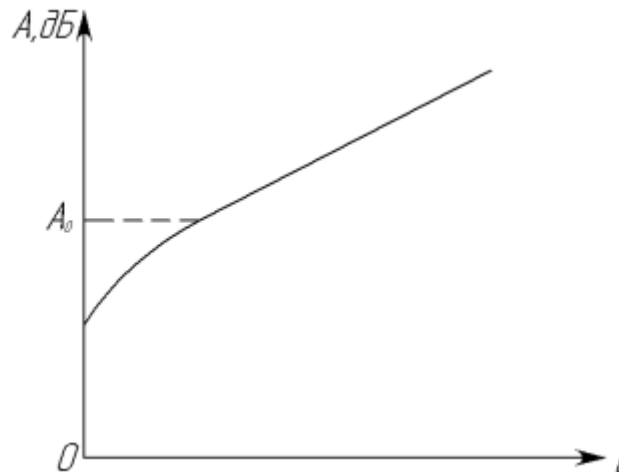


Рис. 1. Типичная рабочая характеристика предельного аттенюатора:
 l – величина перемещения воспринимающего устройства с согласующим элементом

Принцип действия предельных аттенюаторов

Предельные аттенюаторы, использующие свойства предельных (запредельных) волноводов, выполняются на волноводах круглого сечения, в которых основной волной является E_{01} (аттенюаторы емкостного типа) или H_{11} (аттенюаторы индуктивного типа). Выбор круглого сечения волноводов определяется конструктивными и технологическими соображениями.

Условием распространения волн по стандартным волноводам является соотношение

$$\lambda < \lambda_{\text{кр}}, \quad (1)$$

т.е. длина распространяющейся волны должна быть меньше критической длины волны низшего типа. Если, например, рабочая длина волны H_{11} в круглом волноводе больше ее критической длины, то наступает режим отсечки и распространения волн не происходит.

Электрические и магнитные поля в предельном волноводе изменяются по экспоненциальному закону и пульсируют во времени без сдвига фазы вдоль продольной оси Z волновода. В предельном волноводе поля изменяются по закону

$$\vec{E} = \vec{E}_m e^{-\alpha z} e^{i\omega t}, \quad \vec{H} = \vec{H}_m e^{-\alpha z} e^{i\omega t}. \quad (2)$$

Постоянная (коэффициент) затухания равна

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda}\right)^2}. \quad (3)$$

Если для данного сечения предельного волновода обеспечить условие $\lambda \gg \lambda_{\text{кр}}$, то затухание в волноводе определяется только величиной $\lambda_{\text{кр}}$

$$\alpha \cong \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}} \quad (4)$$

и почти не зависит от частоты.

Это свойство предельных волноводов используется в плавнопеременных и фиксированных коаксиальных аттенюаторах предельного типа.

В [4] исследовано явление переноса электромагнитной энергии (мощности) в предельных волноводах. Известно, что затухающие волны переносят лишь реактивную мощность, причем величина этой мощности зависит от Z экспоненциально, так что по мере затухания волны происходит и уменьшение переносимой ею реактивной мощности.

Если в предельном волноводе на конечном расстоянии от излучающего устройства (например, петли связи 1 на рис. 2) разместить приемное устройство (петлю связи 2), то даже при отсутствии распространяющихся волн в месте нахождения приемного устройства возбуждается слабое электромагнитное поле, обусловленное затухающими волнами. Приемное устройство извлекает из этого поля небольшую активную мощность.

В отрезке предельного волновода между двумя устройствами (возбуждающим и воспринимающим) существуют две затухающие волны (рис. 2): «прямая» затухающая волна *A* и «обратная» *B*. Такое поле способно переносить некоторую активную мощность, что доказано аналитически в [4].

Обозначим через *l* расстояние между излучающим и воспринимающим устройствами предельного волновода (рис. 2), в котором возбуждается преимущественно волна H_{11} . Пренебрегая другими типами волн, быстро затухающими вблизи возбуждающего устройства, сигнал, принимаемый выходным устройством, в соответствии с (2), определится соотношением [2]

$$H_{\text{ВЫХ}} = H_{\text{ВХ}} e^{-\alpha l} \quad (5)$$

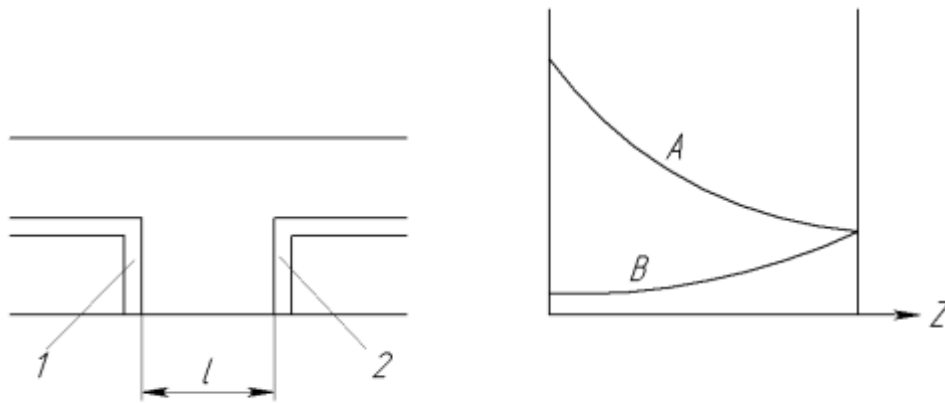


Рис. 2. Передача мощности по волноводу при отсутствии распространяющихся волн

Ослабление *A* сигнала описывается соотношением:

$$A = \lg \frac{H_{\text{ВХ}}}{H_{\text{ВЫХ}}} = 20 \lg \alpha l = 8,686 \alpha l \text{ (дБ)}. \quad (6)$$

Величина ослабления является линейной функцией перемещения *l*. При этом необходимо подчеркнуть, что получаемое ослабление не связано с каким-либо поглощением энергии в предельном волноводе. Вся остальная энергия волны, поступающая на вход рассогласованного предельного аттенюатора, отражается в сторону источника волны (генератора).

Если выполняется условие $\lambda \gg \lambda_{\text{кр}}$, то погонное ослабление на линейном участке характеристики ослабления аттенюатора при возбуждении волны типа H_{11} рассчитывается в соответствии с выражениями (6), (4) по формуле

$$A_{\text{пог}} \cong \frac{16,0}{R} \text{ (дБ/ед.длины)}, \quad (7)$$

а в случае волны типа E_{01} , возбуждаемой центральным проводником подводящей коаксиальной линии, рассчитывается по формуле

$$A_{\text{пог}} \cong \frac{20,9}{R} \text{ (дБ/ед. длины)}, \quad (8)$$

где *R* – радиус предельного волновода.

Однако для создания современных высокочастотных плавнопеременных измерительных предельных аттенюаторов необходимы дополнительные исследования.

Особое значение для разработчиков СВЧ предельных аттенюаторов представляет работа [5], в которой предложен метод строгого расчета предельных аттенюаторов емкостного типа, справедливый для возбуждающего и воспринимающего электродов любых размеров, позволяющий рассчитывать характеристики ослабления во всем диапазоне рабочих частот, при любом расстоянии между электродами с учетом волн, отраженных от границ раздела между волноводной и коаксиальной частями аттенюатора.

При разработке и производстве предельных аттенюаторов емкостного типа важным является учет влияния эксцентricности (смещения) возбуждающего и воспринимающего электродов относительно продольной оси предельного волновода на характеристику ослабления аттенюатора. В [6] определена зависимость отношения амплитуд симметричных E -волн различных типов от смещения оси возбуждающего электрода относительно оси предельного волновода при различных относительных размерах возбуждающего электрода. При тонких возбуждающих электродах ($R_1/R_2 \leq 0,15$, где R_1 и R_2 радиусы электрода и волновода соответственно) наличие эксцентricности не приводит к существенному изменению уровня волн высших типов, что свидетельствует о не критичности расположения таких электродов относительно оси предельного волновода. Более того, можно выбрать такую толщину возбуждающего электрода, что некоторое смещение его оси относительно оси волновода может привести к уменьшению амплитуд волн высших типов. Это обстоятельство необходимо учитывать при стремлении линеаризовать начальный участок характеристики ослабления.

При разработке плавнопеременных измерительных предельных аттенюаторов, предназначенных для работы в широком диапазоне частот, необходимо учитывать частотную зависимость ослабления аттенюаторов.

Погонное затухание или постоянная затухания идеального предельного волновода определяется его геометрическими размерами и типом волны, возбужденной в нем (3).

Величина погонного ослабления аттенюатора, определяемая коэффициентом затухания электромагнитной волны в предельном волноводе (3) с учетом (6) и выражаемая в децибелах, определяется по формуле

$$A_{\text{пог}} = 8,686 \frac{2\pi}{\lambda_{\text{кр}}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{дБ/мм}), \quad (9)$$

где λ – длина рабочей волны; $\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны, мм.

Для аттенюатора индуктивного типа погонное ослабление равно

$$A_{\text{пог}} = \frac{15,99}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi R}{1,841\lambda}\right)^2} \quad (\text{дБ/мм}), \quad (10)$$

для аттенюатора емкостного типа:

$$A_{\text{пог}} = \frac{20,89}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{2\pi R}{2,405\lambda}\right)^2} \quad (\text{дБ/мм}), \quad (11)$$

где R и λ выражены в миллиметрах.

С изменением частоты (длины рабочей волны) погонное ослабление предельного аттенюатора изменяется. Применительно ко всему прибору – предельному аттенюатору это означает, что, будучи отградуированным на «средней» частоте рабочего диапазона, он на других частотах будет иметь другую величину погонного ослабления. Такое отклонение классифицируется как частотная погрешность.

Положив, что величина $\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda} < 1$ и разложив выражение (9) в степенной ряд, получим,

что максимальная частотная зависимость в диапазоне частот составляет

$$\Delta A_{\text{пог}} = 8,686 \frac{\pi}{\lambda_{\text{кр}}} \left[\left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda_2} \right)^2 - \left(\frac{\lambda_{\text{кр}}}{\lambda_1} \right)^2 \right] \text{ (дБ/мм)}, \quad (12)$$

где λ_1 и λ_2 – крайние длины волн рабочего диапазона аттенюатора.

На величину погонного ослабления влияет «скин-эффект» в связи с конечной проводимостью стенок предельного волновода, который «увеличивает» диаметр волновода.

Материалом, из которого чаще всего изготавливаются волноводы и основные детали предельных аттенюаторов, является латунь. Все токонесущие поверхности деталей покрываются тонким слоем уплотненного серебра, реже – золота. На частотах более 3 ГГц (диапазон СВЧ) толщина «скин – слоя» указанных металлов составляет менее $1,4 \cdot 10^{-3}$ мм. При диаметрах предельных волноводов порядка 10 мм и менее «увеличение» диаметра волноводов незначительное. На практике таким изменением пренебрегают.

Волноводы предельных аттенюаторов изготавливаются по первому или второму классу точности.

Для волноводов диаметром 8 мм и длиной порядка 50 мм отклонение по диаметру составляет не более $\pm 0,012$ мм. Для волны E_{01} величина погонного ослабления в предельном волноводе диаметром 8 мм без учета частотной погрешности составляет 5,225 дБ/мм. Отклонение величины погонного ослабления равно $\pm 0,007$ дБ/мм. При этом относительная погрешность погонного ослабления составляет $\pm 0,13\%$. Для линейного участка ослабления величиной 100 дБ это отклонение составляет около 0,13 дБ.

Конструкции предельных аттенюаторов. Технические характеристики

Основу переменных предельных аттенюаторов составляет отрезок предельного волновода 1 (рис. 3) круглого поперечного сечения, возбуждающая петля 2 (для аттенюаторов индуктивного типа) или возбуждающий диск (для аттенюаторов емкостного типа), а также приемная петля 3 (или диск) на подвижном плунжере 4, имеющем гальванический контакт с волноводом.

Изменение ослабления в таких аттенюаторах осуществляется путем поступательного перемещения плунжера, расположенного соосно предельному волноводу.

К выходу подвижного плунжера часто присоединяют гибкий радиочастотный коаксиальный кабель, который выводится на переднюю панель прибора (например, генератора сигналов) и закрепляется на ней с помощью СВЧ разъёма.

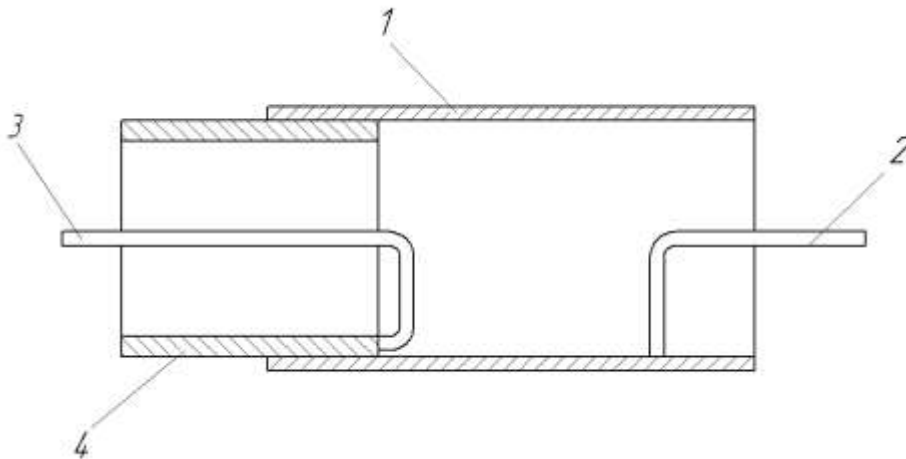


Рис. 3. Конструкция предельного аттенюатора с плунжером, расположенным соосно предельному волноводу

Существует конструкция малогабаритного аттенюатора предельного типа [7], в которой внутри предельного волновода соосно и перпендикулярно оси волновода введена металлическая диафрагма с переменным по диаметру отверстием связи (рис. 4). Диаметр отверстия может меняться по величине от размера диаметра волновода до нуля.

Применение такого аттенюатора, например, в генераторах СВЧ сигналов, позволяет значительно снизить габариты прибора, улучшить экранировку и избавиться от ненадежного гибкого кабеля, соединяющего выход аттенюатора с неподвижным внешним разъёмом. Кроме того, такой аттенюатор может применяться в тех случаях, когда необходима большая разрешающая способность по ослаблению при малых значениях ослабления.

Аттенюатор, представленный на рис. 4, рассогласован.

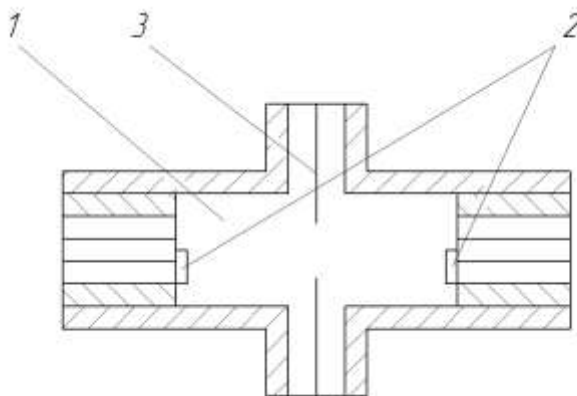


Рис. 4. Схематический чертеж малогабаритного переменного предельного аттенюатора:

1 – отрезок круглого предельного волновода; 2 – элементы связи (в данной конструкции петли связи), имеющие выход на высокочастотные коаксиальные разъёмы; 3 – диафрагма

Для согласования резистор 1 размещают между центральным проводником 2 и корпусом 3 волновода (рис. 5). В этом случае резистор выполняет функции петли связи и согласующего элемента. В качестве резисторов применяются малогабаритные цилиндрические тонко-пленочные безколпачковые резисторы типа С6-2 с сопротивлением по постоянному току 50 ± 1 Ом, длиной от 2 до 9 мм, диаметром от 2 до 3 мм, рассеиваемой мощностью от 0,125 до 0,5 Вт [8].

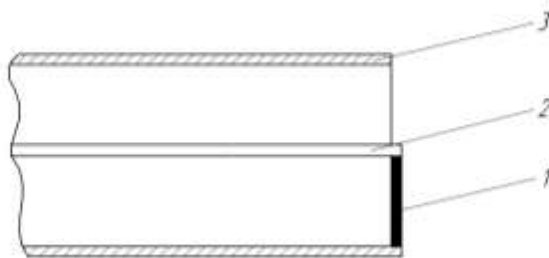


Рис. 5. Резистор в качестве петли связи и согласующего элемента

Мощность на входе предельного аттенюатора ограничивается рассеиваемой мощностью согласующего резистора. Обычно она не превышает 0,5 Вт. Для повышения мощности входного сигнала, поступающего на аттенюатор, применима тройниковая конструкция, схема которой показана на рис. 6.

В таких аттенюаторах величина мощности входного сигнала определяется мощностью нагрузки, которая подключается к аттенюатору как самостоятельный прибор. Кроме того, в этом случае легко решается вопрос согласования аттенюатора по входу. Величина КСВН на входе аттенюатора будет определяться в основном КСВН внешней нагрузки. Одна-

ко предельные аттенюаторы такой конструкции обладают существенным недостатком: предельный волновод в них возбуждается слабо, поскольку центральный проводник (возбуждающий элемент) основной коаксиальной линии расположен далеко от входного отверстия (окна связи) волновода. В связи с этим аттенюатор имеет большое начальное ослабление и значительный нелинейный участок характеристики ослабления (линейный участок обычно начинается с 25–35 дБ).

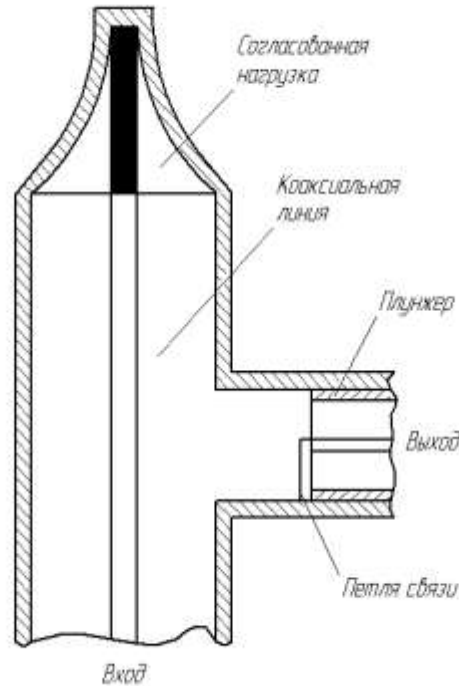


Рис. 6. Принципиальная схема предельного аттенюатора тройниковой конструкции

Принципиальное решение увеличения связи между возбуждающим и воспринимающим элементами связи и тем самым уменьшения начального ослабления предельного аттенюатора индуктивного типа (аналогично и емкостного типа) тройниковой конструкции изложено в [9] и показано на рис. 7.

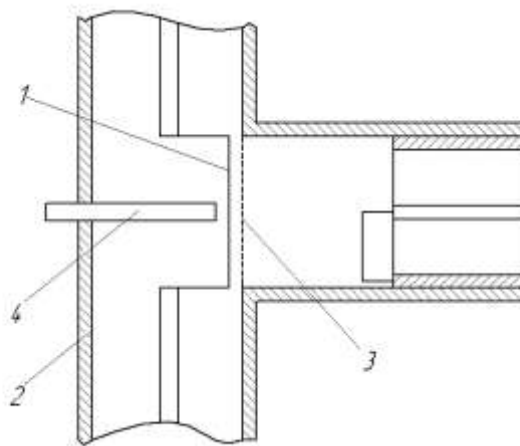


Рис. 7. Коаксиальный предельный аттенюатор тройниковой конструкции с прямоугольной петлей связи

Особенностью предложенного коаксиального аттенюатора является то, что часть цен-

трального проводника 1 отрезка коаксиальной линии 2 изогнута вблизи ответвления волновода в виде прямоугольной петли, направленной в сторону этого ответвления. Эта часть проводника должна иметь толщину, позволяющую волновому сопротивлению полученной эксцентрической линии оставаться близкой к волновому сопротивлению коаксиальной линии.

Предельный аттенюатор предложенной конструкции обладает малым начальным ослаблением. Для фильтрации высших типов волн во входном отверстии предельного волновода устанавливается экран Фарадея 3 на близком расстоянии от проводника 1 . Для лучшего согласования аттенюатора со стороны основной коаксиальной линии в ней устанавливается емкостной штырь 4 . Размещение тонкого участка петли 1 и экрана Фарадея 3 возможно непосредственно внутри предельного волновода.

Указанные предложения особо эффективны при разработке предельных аттенюаторов низкочастотного диапазона (от единиц МГц до 1000 МГц), поскольку предельный волновод имеет большие размеры (диаметр волновода 30 мм и более), что дает возможность вносить различные конструктивные усовершенствования в экран Фарадея и петлю связи.

Вопросам расчета согласования входного устройства, линеаризации характеристики ослабления предельных аттенюаторов индуктивного типа тройниковой конструкции в низкочастотном диапазоне посвящен ряд работ [10, 11, 12].

В измерительной технике СВЧ диапазона широкое применение нашли малогабаритные встроенные предельные аттенюаторы индуктивного типа (например, в генераторах стандартных сигналов), а также отсчетные плавно-переменные предельные аттенюаторы емкостного типа как самостоятельные приборы.

Выбор типа рабочей волны для предельных аттенюаторов в диапазоне частот более 3 ГГц определяется тем, что при небольших сечениях предельных волноводов (их радиус порядка 4 мм и менее) конструкция возбуждающего и воспринимающего устройств связи для волны E_{01} обеспечивает хорошее согласование аттенюатора в широком диапазоне частот и оказывается надежнее в жестких условиях эксплуатации, чем устройства связи для волны H_{11} . Кроме того, габаритные размеры предельного аттенюатора на волне E_{01} несколько меньше, чем аттенюатора на волне H_{11} .

Важным аргументом при выборе рабочей волны E_{01} является тот факт [6], что в предельном аттенюаторе емкостного типа нелинейность характеристики определяется в основном волнами E высших типов. На больших ослаблениях при паразитном возбуждении волны H_{11} точность емкостного аттенюатора сохраняется.

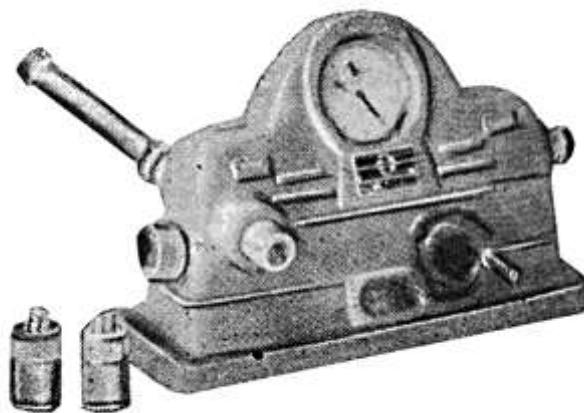


Рис. 8. Фото внешнего вида аттенюатора Д4–6

К числу часто используемых для измерения ослабления на СВЧ относится коаксиальный предельный аттенюатор типа Д4–6 с емкостной связью. Он предназначен для плавного

ван на корпус плунжера емкостью C_0 общей величиной 4,5 пФ, образованной прокладкой из фторопласта и центрирующим керамическим кольцом.

Эквивалентная электрическая схема аттенюатора представляет собой емкостной делитель напряжения, коэффициент деления которого определяется соотношением емкостей C_0 и C_x . Величина емкости C_0 выбрана так, чтобы емкостное сопротивление было мало по сравнению с суммарным сопротивлением $R = R_{\text{вых}} + R_H$. Величина емкости C_x определяется расстоянием между возбуждающим и воспринимающим элементами и их геометрическими размерами.

Для обеспечения электрического контакта плунжера с поверхностью предельного волновода на внешней поверхности плунжера размещены контактные пружины в виде колец, а для уменьшения «пролезания» электромагнитной энергии на выход аттенюатора на поверхности плунжера размещены цилиндрические втулки из объемного СВЧ поглотителя, основу которого составляет смесь порошка карбонильного железа с диэлектриком. В качестве диэлектрика используются полиэтилен, полистирол, полипропилен.

Между подвижным плунжером и неподвижным выходным СВЧ разъемом аттенюатора находится телескопическая система, которая на рис. 9 не показана.

Отсчетно-приводная система аттенюатора включает приводной механизм, шкалу отсчета ослабления в децибелах и индикатор малых перемещений часового типа для точного отсчета линейного перемещения плунжера. Индикатор крепится на корпусе предельного волновода.

Приводной механизм состоит из червячной пары и реечного зацепления. Зацепление осуществляется через прорезь, профрезерованную в корпусе предельного волновода вне рабочей его части.

Для устранения люфта при передаче вращательного движения от ручки управления на поступательное движение плунжера и вращательное движение шкалы отсчета зубчатые колеса червячной пары снабжены люфтовыбирающим устройством.

Аттенюатор вместе с отсчетно-приводным механизмом помещен в литой разъемный силуминовый корпус, служащий одновременно основанием прибора. Отсчет величины ослабления производится по шкале непосредственного отсчета в децибелах и по шкале индикатора линейных перемещений с помощью градуировочных графиков, а отсчет разностного ослабления – по шкале индикатора с применением градуировочных графиков.

Шкала непосредственного отсчета отградуирована для «средней» частоты (7 ГГц) рабочего диапазона частот. К этой шкале придается график частотных поправок для крайних частот рабочего диапазона (3 и 10 ГГц). Градуировочные графики ослабления аттенюатора приводятся для трех указанных частот рабочего диапазона на весь диапазон ослаблений до 100 дБ.

В состав документации аттенюатора входит график погонного ослабления на линейном участке, которым пользуются при подсчете разностной величины ослабления на линейном участке от 40 до 100 дБ.

Величина изменения ослабления аттенюатора составляет 20 – 120 дБ при сохранении линейности характеристики в пределах не менее 60 дБ. Значение КСВН входа на линейном участке ослаблений не превышает 1,4; выхода – 1,5. Максимальная погрешность определения разностного ослабления по шкале индикатора с применением градуировочных графиков на линейном участке характеристики составляет не более $\pm (0,1 + 0,005A)$ дБ, где A – величина разностного ослабления (дБ), при условии, что значение КСВН внешней нагрузки не более 1,4. Погрешность определения ослабления на нелинейном участке характеристики с применением градуировочных графиков не превышает $\pm 1,2$ дБ при условии, что КСВН выхода генератора и входа нагрузки не более 1,4. Погрешность определения ослабления по шкале, проградуированной непосредственно в децибелах с использованием частотных поправок не превышает ± 2 дБ при КСВН выхода генератора и входа нагрузки не более 1,8. Наибольшая допустимая мощность сигнала на входе аттенюатора не более 1 Вт.

Расчетная величина частотной зависимости ослабления на линейном участке в 60 дБ составляет около 3,5 дБ.

При работе с измерительным аттенуатором в реальном тракте необходимо учитывать погрешность измерения ослабления из-за рассогласования, которую определяют по формуле [1]

$$\Delta A_p = \pm 8,68 \left[| \Gamma_r | | \Gamma_c | (K^2 + 1) + | \Gamma_r | | \Gamma_1 | + | \Gamma_c | | \Gamma_2 | \right], \quad (13)$$

где $| \Gamma_r |$, $| \Gamma_c |$ – значения модулей коэффициентов отражения элементов, стоящих на входе $| \Gamma_r |$ и выходе $| \Gamma_c |$ аттенуатора соответственно; $| \Gamma_1 |$, $| \Gamma_2 |$ – значения модулей коэффициентов отражения входа и выхода аттенуатора; K – модуль коэффициента передачи аттенуатора, который связан с значением ослабления A соотношением

$$K = 10^{-\frac{A}{20}}. \quad (14)$$

Библиографический список

1. ГОСТ 19158-73 Аттенуаторы. Технические требования. – М.: Изд-во стандартов. 1973.
2. **Лебедев, И.В.** Техника и приборы СВЧ / И.В. Лебедев. – М.: Высш. шк., 1970. Т. 1. – 440 с.
3. **Раевская, О.И.** Методика расчета характеристик ослабления предельных аттенуаторов высшей точности / О.И. Раевская // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1979. Вып. 7. С. 32–38.
4. **Вайнштейн, Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Сов. радио, 1957. – 582 с.
5. **Раевская, О.И.** Метод расчета предельного аттенуатора емкостного типа / О.И. Раевская // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1977. Вып. 5. С. 47–52.
6. **Калмык, В.А.** Влияние эксцентрисности возбуждающего электрода на характеристику ослабления предельного аттенуатора / В.А. Калмык, О.И. Раевская // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1974. Т. 17. № 10. С. 58–62.
7. А.С. 224624 СССР. Аттенуатор предельного типа / Г.И. Шишков, С.Г. Афанасов // Б. И., 1968. № 26.
8. ОСТ В 11 0013 – 85. Резисторы постоянные. Общие технические требования.
9. А.С. 213937 СССР. Коаксиальный аттенуатор/Г.И. Шишков, В.Н. Исаев// Б.И., 1968. № 11.
10. **Горячев, Ю.А.** К расчету согласования входного устройства аттенуатора индуктивного типа / Ю.А. Горячев, В.А. Калмык, Л.Г. Симкина // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1975. Вып. 2. С. 61–67.
11. **Горячев, Ю.А.** Линеаризация начального участка характеристики ослабления предельного аттенуатора / Ю.А. Горячев, В.А. Калмык, С.Б. Раевский // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1976. Вып. 2. С. 78–82.
12. **Раевская, О.И.** Методика расчета аттенуатора индуктивного типа с улучшенными характеристиками / О.И. Раевская, В.А. Калмык // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1977. Вып. 1. С. 92–96.

Дата поступления
в редакцию 12.07.2011

G.I. Shishkov

CUTOFF ATTENUATORS

The principle of operation and the design of cutoff attenuators are described.

Key words: cutoff attenuators, cutoff waveguides, attenuation, errors.

УДК 621.3.013.62

С.С. Зельманов

ОБОБЩЕННЫЙ РЕЗОНАНС В ЛИНЕЙНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Волго-Вятский филиал МТУСИ

Приводится оценка ограниченности классической теории резонанса в линейных стационарных динамических системах. Показана невозможность использования традиционного подхода к системам с произвольным числом степеней свободы и конструктивными потерями. Предлагается более широкий спектральный критерий частотного резонанса. Вводится понятие и определение резонанса формы сигнала как обобщенного определения резонанса для класса линейных стационарных динамических систем.

Ключевые слова: резонанс, спектральный критерий, экстремум огибающей, модуль спектра, резонанс формы.

Понятие резонанса в физике и радиотехнике является одним из фундаментальных понятий теории колебаний. Однако рассматриваемое в теории колебаний понятие резонанса применительно к линейным стационарным системам относится только к одиночному резонатору с пренебрежимо малыми потерями энергии. И, конечно же, считалось, что возникновение колебаний и резонансных явлений в системе может быть связано только с ее реактивными параметрами, но не с потерями в ней. Это обстоятельство в определенной степени повлияло на формирование определения резонанса, предложенного академиками Л.И. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси [1], [2]:

"Резонанс – резкое возрастание амплитуд установившихся вынужденных колебаний, наступающее при приближении частоты p гармоничного внешнего воздействия к частоте ω одного из нормальных колебаний, свойственных данной колебательной системе".

"Нормальные колебания – гармонические собственные колебания, которые могли бы существовать в линейных колебательных системах, если бы в них не происходило рассеяние энергии".

Это определение исчерпывающе объясняло условие резонанса в одиночном резонаторе, но не распространялось на системы с произвольным числом степеней свободы и потерями, пренебречь которыми не представляется возможным.

При таком подходе в теории резонанса образовался некоторый пробел. Этот пробел означает отсутствие теории резонанса в динамических линейных стационарных системах с входом, обладающих существенными потерями и произвольным числом степеней свободы. К таким системам классическая теория резонанса принципиально неприменима.

В теоретической радиотехнике по прошествии нескольких десятилетий XX века и в XXI веке теория резонанса, объединяющая существующие линейные динамические стационарные системы с произвольным числом степеней свободы, так и не появилась. При этом RC-системы, связанные LCR системы различного вида, гребенчатые фильтры, различные виды систем с распределенными параметрами и другие резонансные системы широко использовались и продолжают использоваться в радиотехнической практике. Необходимость в общей теории резонанса была и подтверждалась известными учеными, например такими, как академик А.А.Харкевич, который в работе [3] утверждал, что **«ощущается потребность в таком развитии теории, которая позволила бы в общем виде рассматривать системы со многим степенями свободы. Именно каждой степени свободы может соответствовать один резонанс (на частоте, в общем случае не совпадающей с резонансной частотой данного контура, взятого отдельно)»**.

Предпринятая попытка расширения классической теории резонанса применительно к линейным стационарным системам с существенными потерями и произвольным числом степеней свободы позволила установить следующее [4]:

1. Одиночный резонатор, на базе которого была построена классическая теория резонанса в линейных стационарных системах, не только не является типичным представителем этого класса систем, но, скорее, является исключением из этого класса. Это следует из того факта, что свободный процесс в нем совпадает с собственным процессом, а резонансная частота тока в нем $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ от величины потерь не зависит, что типичным не является. В

общем случае для линейных стационарных систем, в которых на величину потерь энергии не накладывается каких-либо ограничений, справедливо однородное уравнение вида

$$\frac{d^n i_{\text{CB}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} i_{\text{CB}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{di_{\text{CB}}}{dt} + a_n i_{\text{CB}} = 0, \quad (1)$$

где i_{CB} – свободный процесс тока в системе, как реакция системы на входной δ – импульс.

В зависимости от вида корней характеристического уравнения существуют различные решения этого уравнения и соответствующие им виды свободных процессов. Этим свободным процессам будут соответствовать различные виды линейных стационарных систем. Остановимся на некоторых линейных системах, которым соответствуют свободные процессы, представляющие сумму собственных процессов

$$i_{\text{CB}}(t) = \sum_{k=1}^m (C'_k \sin \omega_k t + C''_k \cos \omega_k t); \quad (2)$$

$$i_{\text{CB}}(t) = \sum_{k=1}^m (C'_k e^{-\alpha_k t} \sin \omega_k t + C''_k e^{-\alpha_k t} \cos \omega_k t); \quad (3)$$

$$i_{\text{CB}}(t) = C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t} + \dots + C_n e^{-\alpha_n t}. \quad (4)$$

Классическая теория резонанса адресована к виду систем (2), так как она предполагает наличие резонанса на частотах нормальных колебаний, т.е. при отсутствии потерь в системе. Что касается приведенных свободных процессов вида (3) и (4), то совершенно очевидно, что они относятся к системам с потерями, пренебречь которыми не представляется возможным. К системам (4) классическая теория резонанса абсолютно неприменима так как в случае пренебрежения потерями они перестают существовать.

Итак, свободный процесс в любой линейной стационарной системе является суммой n собственных процессов. Для подавляющего большинства систем этого класса $n > 1$. Эта особенность не учтена в классическом определении резонанса.

2. Учет наличия нескольких собственных процессов в свободном процессе резонансной системы при наличии потерь приводит к рассмотрению результатов их взаимодействия в системе при резонансе. Ведь в системах с потерями спектры собственных процессов перекрываются, что совершенно несвойственно спектрам нормальных колебаний. Результатом суперпозиционного взаимодействия собственных процессов является свободное колебание, экстремум огибающей модуля спектра которого соответствует резонансной частоте системы. Однако ни о каком совпадении этой резонансной частоты с частотой нормальных колебаний системы речь идти не может. Это различные частоты.

При действии на входе системы гармонического колебания выходное колебание зависит от входного колебания и свободного колебания особым образом. Это напряжение можно определить с помощью интеграла Дюамеля:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = \int_{t_0}^t u_{\text{ВХ}}(\xi) h(t - \xi) d\xi, \quad (5)$$

где $h(t - \xi)$ – реакция системы на δ -импульс, представляющая собой свободное колебание, то есть сумму затухающих апериодических и колебательных собственных процессов. При $t \geq \xi$ эта реакция имеет вид

$$h(t - \xi) = \sum_{k=1}^n \left\{ a_k e^{-\alpha_k(t-\xi)} + b_k e^{-\beta_k(t-\xi)} \cos[\omega_k(t - \xi) + \varphi_k] \right\}, \quad (6)$$

а при $t < \xi$ $h(t - \xi) = 0$. В этом выражении α_k , β_k и ω_k – положительные величины, а a_k , b_k и φ_k – вещественные постоянные числа. Иначе говоря, функция (6) изображает свободное колебание, возникающее на выходе системы в результате подачи на ее вход δ -импульса в момент ξ .

Из выражения (5) следует, что выходное колебание представляет собой результат взаимодействия входного гармонического напряжения и свободного колебания системы.

Выходное колебание появляется только в том случае, когда существуют одновременно входное и свободное колебания. Амплитуда выходного колебания имеет тем большую величину, чем меньше свободное колебание отличается от входного по форме.

Точнее говоря, чем больше величина спектральной плотности свободного колебания на частоте входного колебания, тем больше амплитуда установившегося выходного колебания. Поэтому, если на частоте входного гармонического напряжения спектральная плотность свободного колебания имеет максимум, то на этой же частоте имеет максимум и амплитуда выходного гармонического напряжения. Поэтому имеется полное основание считать, что выходное колебание появляется в результате взаимодействия входного и свободного колебаний.

Таким образом, можно заключить, что каждый из резонансов в системе возникает в результате взаимодействия вынуждающей силы с суммой всех собственных процессов системы, а не в результате взаимодействия только с отдельными собственными процессами, как это следует из традиционного подхода. Это связано с тем, что спектр «нормального» колебания не может перекрываться со спектрами других «нормальных» колебаний.

В системе связанных контуров выражение свободного процесса имеет вид

$$i_{св}(t) = -\frac{1}{L} e^{-\alpha t} \sin \Omega t \sin \omega_{св} t = \frac{1}{L} e^{-\alpha t} \left[\cos(\omega_{св} + \Omega)t - \cos(\omega_{св} - \Omega)t \right], \quad (7)$$

где $\Omega = k\omega_{св}/2$; k – коэффициент связи; $\omega_{св} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$.

Из выражения (1.50) следует:

а) свободный процесс с частотой $\omega_{св}$ в системе равен сумме собственных процессов с частотами $\omega_{св1} = (\omega_{св} + \Omega)$ и $\omega_{св2} = (\omega_{св} - \Omega)$;

б) резонансные частоты связи не равны резонансным частотам $\omega_p = \omega_0$ каждого из контуров, т. е. частотам их нормальных колебаний.

Так мы приходим к спектральной теории резонанса, с позиций которой легко объяснить условие резонанса в любой линейной стационарной системе с потерями и произвольным числом степеней свободы. Спектральная теория резонанса опирается на спектральный критерий резонанса, который утверждает, **что наличие экстремумов огибающей модуля спектра свободного процесса системы означает возможность существования в ней резонансов на частотах, соответствующих этим экстремумам** [4].

С этих позиций уже представляется возможным теоретически объяснить явление резонанса в системах с экспоненциальными собственными процессами, сумма которых, т. е. свободный процесс представляет собой затухающее гармоническое колебание. Для этого необходимо показать, что в линейной стационарной системе, свободный процесс которой есть сумма произвольного числа собственных экспоненциальных процессов, возможен

резонанс на частотах, соответствующих экстремумам огибающей модуля спектра свободного процесса.

Рассмотрим общий случай, когда свободный процесс есть сумма произвольного числа собственных экспоненциальных процессов вида

$$u_{св} = C_1 e^{-\alpha_1 t} + C_2 e^{-\alpha_2 t} + \dots + C_n e^{-\alpha_n t}. \quad (8)$$

Тогда частотный спектр свободного колебания (8) системы может быть определен как сумма спектров вида

$$S(j\omega) = \sum_{k=1}^n S(j\omega) = \sum_{k=1}^n C_k \frac{1}{\alpha_k + j\omega}. \quad (9)$$

Поскольку выражение (9) является спектром свободного колебания (8), представляющего собой сумму экспонент, то необходимо сформулировать условия, при которых в данной системе возможен резонанс. Эта задача сводится к доказательству возможности существования величин α_k и C_k ($k = 1, 2, 3, \dots, n$), при которых решение (8) будет с заданной степенью точности представлять собой заранее заданную непрерывную функцию $u_{св}(t)$ с максимумом частотного спектра на заданной частоте ω_p . Покажем вначале, что решение поставленной задачи возможно для случая $\alpha_k = k\alpha$ ($k = 1, 2, 3, \dots, n$). Это допущение является приемлемым, так как α_k – это корни характеристического уравнения, которое соответствует уравнению системы (1). Эти корни связаны с коэффициентами уравнения a_1, a_2, \dots, a_n формулой Виета, в соответствии с которой для класса систем с кратными корнями характеристического уравнения справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} a_1 &= -(\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n) = -\alpha(1 + 2 + \dots + n); \quad \alpha = -\frac{a_1}{1 + 2 + \dots + n}; \\ a_2 &= \alpha_1\alpha_2 + \alpha_2\alpha_3 + \dots + \alpha_1\alpha_n + \alpha_2\alpha_3 + \dots + \alpha_{n-1}\alpha_n; \\ a_3 &= -\alpha_1\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_2\alpha_4 + \dots + \alpha_{n-2}\alpha_{n-1}\alpha_n; \\ a_{n-1} &= (-1)^{n-1}[(\alpha_1\alpha_2\dots\alpha_{n-1}) + (\alpha_1\alpha_2\dots\alpha_{n-2}\alpha_n) + \dots + \alpha_2\alpha_3\alpha_n]; \\ a_n &= (-1)^n(\alpha_1\alpha_2\dots\alpha_n) = (-1)^n \alpha^n n!; \\ \frac{a_n}{a_1} &= \frac{(-1)^n \alpha^n n!}{(-1)\alpha 0,5n(n+1)} = \frac{(-1)^{n-1} \alpha^{n-1} n!}{0,5n(n+1)}; \\ \alpha^{n-1} &= \frac{a_n}{a_1} \frac{0,5n(n+1)}{(-1)^{n-1} n!} = \frac{a_n}{a_1} \frac{(n+1)}{2(n-1)!(-1)^{n-1}}. \end{aligned}$$

Из формулы Виета вытекает конструктивный ответ на вопрос о принадлежности любого полинома степени n к рассматриваемому классу полиномов, у которых $\alpha_k = k\alpha$. Действительно, чтобы произвести полином, принадлежащий к рассматриваемому классу, в соответствии с формулой Виета необходимо, чтобы отношение a_n/a_1 имело вид:

$$\frac{a_n}{a_1} = \frac{\alpha^n}{\sum_{k=1}^n \alpha_k} = A \alpha^{n-1} (-1)^{n-1},$$

где $A = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n}{1 + 2 + 3 + \dots + n} = \frac{n!}{0,5n(1+n)} = \frac{2(n-1)!}{n+1}$

Тогда для величины α получим

$$\alpha = -\left(n\sqrt[n]{a_n/a_1A}\right). \quad (10)$$

Это означает, что представление решения (8) в виде суммы экспонент с кратными показателями возможно лишь при величине α , зависящей от коэффициентов уравнения (1). Тогда свободное колебание системы может быть представлено в виде:

$$u_{\text{св}}(t) = \sum_{k=1}^n C_k e^{-\alpha_k t} = \sum_{k=1}^n C_k (e^{-\alpha t})^k. \quad (11)$$

Введем обозначение $e^{-\alpha t} = x$, откуда $t = -\frac{1}{\alpha} \ln x$. Очевидно, что если $0 \leq t < \infty$, то

$1 \geq x > 0$. С учетом этого выражение (11) примет вид

$$u_{\text{св}}\left(-\frac{1}{\alpha} \ln x\right) = \sum_{k=1}^n C_k x^k. \quad (12)$$

Обозначим $u_{\text{св}}\left(-\frac{1}{\alpha} \ln x\right) = f(x)$. Тогда поставленная задача может быть сформулирована так: существуют ли величины $C_k (k = 1, 2, 3, \dots, n)$, при которых степенной полином с заданной степенью точности аппроксимирует заданную непрерывную функцию $f(x)$ в интервале $1 \geq x > 0$?

В соответствии с теоремой Вейерштрасса при достаточно большом n существуют такие коэффициенты C_k , при которых выполняется неравенство $\left|f(x) - \sum_{k=1}^n C_k x^k\right| \leq \varepsilon$, $0 < x \leq 1$, где ε – сколь угодно малая положительная величина.

Теорема верна для любой непрерывной функции $f(x)$, а значит, и для свободного колебания $u_{\text{св}}(t)$, которое может иметь частотный спектр с экстремумом типа "максимум" на частоте ω_p , причем количество таких частот может быть произвольным.

Отсюда следует, что в линейной системе, в которой все собственные процессы – аperiodические (экспоненциальные), возможен сколь угодно резко выраженный резонанс на заранее заданной частоте. С учетом спектрального критерия можно сформулировать более общее определение резонанса для линейных стационарных динамических систем, на величину потерь в которых и количество степеней свободы не накладывается никаких ограничений:

Резонанс – это явление возрастания амплитуды установившихся вынужденных колебаний в линейной стационарной системе до величины относительного максимума при приближении частоты гармонического внешнего воздействия к значению, соответствующему любому экстремуму огибающей модуля спектра свободного колебания этой системы.

3. Для частотного резонанса характерна особенность экстремального реагирования системы на внешнее воздействие и способность выделения резонирующего сигнала из совокупности других, не обладающих этим свойством.

Однако существуют сигналы, более сложные, нежели гармонический сигнал, и системы, которые экстремально на них реагируют. Система связанных колебательных контуров экстремально реагирует на АМ-сигнал, т.е. на колебание со сложным спектром. Экстремальное реагирование системы на сложный сигнал может носить различный характер, не обязательно связанный с появлением данного сигнала на выходе системы. Система, реагируя на сигнал, на который она «настроена», может иным способом информировать получателя о том, что на ее входе находится именно этот сигнал, тем самым «выделяя» его из совокупности других сигналов.

В этом случае частота не будет варибельным параметром резонанса; им может быть амплитуда, фаза или какой-нибудь другой параметр. Такой подход свидетельствует о том, что возможно дальнейшее обобщение понятия резонанса в линейных стационарных динамических системах.

Напряжение на выходе линейной системы возникает в результате взаимодействия вынуждающей силы (входного сигнала) со свободным процессом системы, т.е. с ее импульсной характеристикой, и может быть представлено интегралом Дюамеля (5).

Известно также, что свойством экстремального реагирования на входной сигнал обладает такая линейная система как согласованный фильтр, выражение импульсной характеристики которого имеет вид

$$h_{\delta}(t) = a_1 u_1 [T_0 - (t - \xi)] = a_1 u_1 [\xi - (t - T_0)]. \quad (13)$$

Это означает, что импульсная характеристика согласованного фильтра имеет вид согласованного с ней сигнала, представленного в зеркальном отображении.

Импульсная характеристика фильтра воспроизводит значения входного сигнала $u_1(t)$ в обратной последовательности, начиная с момента $t = T_0$ и заканчивая моментом $t = 0$. Поэтому в интервале времени $0 \leq t \leq T_0$ на выходе системы будет иметь место переходный режим. Этот режим характеризуется возрастанием выходного напряжения до максимальной величины к моменту времени $t = T_0$. Так формируется максимальный отклик на «свой» входной сигнал. Это означает, что согласованный фильтр, **максимально, т.е. резонансно реагирует** только на определенный сигнал, с которым этот фильтр согласован. В этом смысле согласованный **фильтр можно считать резонансной системой**. Рассмотрение этой особенности согласованного фильтра приводит к следующим вопросам:

1. С каким видом экстремального реагирования мы имеем дело в данном случае?
2. Каков параметр настройки согласованного фильтра, связанный с эффектом его экстремального реагирования?

При гармоническом частотном резонансе таким параметром служит частота гармонического воздействия, на которую настраивается резонансная система путем изменения её параметров.

Аналогично в случае согласованного фильтра условие резонанса выполняется для того сигнала, на который «настроен» или с которым согласован фильтр.

Очевидно, что в случае согласованного фильтра **параметром настройки будет являться форма сигнала**, с которым согласован фильтр. **Объектом настройки** в фильтре является **форма его импульсной характеристики**, на которую «настраивается в резонанс» согласованный фильтр в соответствии с условием (13).

В случае вариации формы входного сигнала относительно формы импульсной характеристики или формы импульсной характеристики относительно зеркального отображения формы входного сигнала будет иметь место режим расстройки по форме, приводящий к уменьшению пикового значения выходного сигнала по отношению к его экстремальному значению.

Следовательно, характеристика экстремальности согласованного фильтра должна иметь вид функционала $F[h_{\delta}(t), u_1(t, k)]$, зависящего от импульсной характеристики фильтра, т.е. от его свободного процесса, и формы входного сигнала, обладающего некоторым параметром формы k .

Зависимость степени реагирования фильтра от формы входного сигнала может быть определена как избирательность согласованного фильтра по форме сигнала.

В частности, для гармонического воздействия параметр формы k является частотой и определяется номером k гармоники $\sin k\omega t$. **Гармоники с разными номерами отличаются по частоте и соответственно по форме**. Изменение формы гармонического сигнала происходит за счет изменения его частоты.

Каков же должен быть критерий экстремальности согласованного фильтра или критерий резонанса в нем?

Какой вид должна иметь математическая операция, позволяющая оценить степень отличия формы входного сигнала от формы свободного процесса или импульсной характеристики фильтра и обеспечить максимальное значение выходного сигнала при их соответствии друг другу?

В качестве такого критерия может быть использовано максимальное значение функционала F , при резонансном значении вариационного параметра k_p [14]:

$$F_{\max}[h_{\delta}(t), u_1(t, k_p)] = \max_0^{T_0} \int_0^{T_0} u_1(t, k_p) h_{\delta}(T_0 - t) dt \quad (14)$$

где T_0 – длительность входного сигнала $u_1(t, k_p)$; k_p – резонансный вариационный параметр формы сигнала.

Критерием экстремальности (резонанса формы) в согласованном фильтре является относительный максимум (экстремум) максимальной величины свертки входного сигнала и его зеркального отображения, т.е. свободного процесса фильтра. Термин «резонанс» традиционно имеет отношение к частоте, как параметру настройки. Поскольку в нашем случае в этой роли выступает форма сигнала, то это, возможно, дает нам право определить явление экстремальности в согласованном фильтре как **резонанс формы сигнала**.

Явление, при котором наблюдается этот относительный максимум (экстремум) величины свертки, мы можем определить как резонанс формы входного сигнала.

Резонансная характеристика по варьируемому параметру формы может быть представлена функционалом (15).

$$F_1[h_{\delta}(t), u_1(t, k)] = \max_0^{2T_0} \int_0^{2T_0} u_1(t, k) h_{\delta}(T_0 - t) dt \quad (15)$$

Каждый отсчет функционала (15) представляет собой пиковое значение взаимнокорреляционной функции входного сигнала $u_1(t, k)$ длительностью T_0 и импульсной характеристики (свободного процесса) согласованного фильтра $h_{\delta}(t)$. При заданной форме импульсной характеристики согласованного фильтра $h_{\delta}(t)$ каждому значению функционала (15) соответствует своя реализация входного сигнала $u_1(t, k)$ определенной формы при данном значении параметра формы k .

Резонансное значение вариационного параметра k_p определяется из условия

$$F_{\max}[h_{\delta}(t), u_1(t, k_p)] = \max \left[\max_0^{T_0} \int_0^{T_0} u_1(t, k_p) h_{\delta}(T_0 - t) dt \right]. \quad (16)$$

Таким образом, мы приходим к обобщению понятия резонанса в виде резонанса формы сигнала в линейной стационарной динамической системе:

Резонанс формы сигнала в линейной динамической системе – это явление возрастания до экстремального значения максимальной величины свертки входного сигнала с импульсной характеристикой системы при приближении формы входного сигнала в процессе вариации этой формы к виду, соответствующему форме импульсной характеристики системы, являющейся зеркальным отображением формы входного сигнала.

Понятие резонанса формы, вероятно, может быть использовано при теоретических обобщениях, касающихся формирования информационных сигналов в системах связи. При этом не исключается, что модуляцию, манипуляцию и кодирование сигналов можно рассматривать как разнообразное по характеру, целенаправленное изменение формы сигнала.

Библиографический список

1. **Мандельштам, Л.И.** Лекции по теории колебаний / Л.И. Мандельштам. – М.: 1972.
2. **Папалекси, Н.Д.** Эволюция понятия резонанса / Н.Д. Папалекси // Успехи физических наук. 1947. Т. 31. Вып. 4.
3. **Харкевич, А.А.** Основы радиотехники. – М.: ГИЛ по вопросам связи и радио, 1963. – 559 с.
4. **Зельманов, С.С.** Развитие теории резонанса в линейных стационарных и управляемых системах. Детектирование обобщенных АМ и ЧМ-колебаний / С.С. Зельманов; Московский технический университет связи и информатики (Волго-Вятский филиал МТУСИ). – М., 2007. – 200 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.07.2001*

S.S. Zelmanov

THE SUMMARIZED RESONANCE IN THE LINER STATIONARY DYNAMIC SYSTEM

The subject of this article is the appreciation of the classical theory of the resonance in the liner stationary dynamic systems. It is shown that it is impossible to use the traditional approach to systems with any number of the freedom degree and constructive losses. It is suggested a wider spectral criteria of the frequency resonance and it is introduced the concept and the definition of the resonance of the signal from as a summarized definition of the resonance for the class of liner stationary dynamic system

Key words: spectral criteria, extremum rounding module of the spectra, resonance of the form.

УДК 621.396.96

Ф.Н. Ковалев

ПРОСВЕТНЫЕ МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ ЧАСТОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются принципы построения просветных многобазовых радиолокационных комплексов с измерениями доплеровской частоты. Приведены классификация многопозиционных РЛС и методика оценки потенциальной точности.

Ключевые слова: просветная многопозиционная радиолокация, просветная многобазовая РЛС, доплеровская частота, точность оценки координат.

Введение

В просветных радиолокаторах обнаружение цели осуществляется при её расположении между приемной и передающей антеннами (рис. 1). Благодаря такой геометрии системы происходит резкое увеличение бистатической эффективной площади рассеяния (ЭПР) лоцируемых объектов, практически не зависящее от применения противорадиолокационных покрытий [1, 2].

Повышенный интерес у исследователей и конструкторов вызывают бистатические просветные радары с монохроматическим излучением [1, 3, 4]. В них рассеянный целью сигнал поступает на вход приемника совместно с мощным прямым сигналом передатчика. Получаемый в точке приема интерференционный сигнал вследствие движения цели становится модулированным по амплитуде с доплеровской частотой, так что для выделения сигнала доплеровской частоты можно использовать амплитудный детектор. К достоинствам такого приемника следует отнести его простоту и отсутствие специальной привязки по высокой частоте с передатчиком, что особенно важно при большом разнесении приемника и передатчика. Координаты цели определяются по измерениям доплеровской частоты и направления прихода рассеянного объектом сигнала.

На рис. 1 изображена схема расположения элементов бистатической системы на плоскости. Приемная антенна (Пр) имеет координаты $(0, 0)$, передающая (П) – $(d, 0)$. Отрезок между приемной и передающей антеннами называется базой, его длина – d . Обнаружение цели происходит в окрестности базы, когда имеет место заметный рост ЭПР [1, 4]. Условно зону действия можно ограничить некоторым минимальным значением бистатического угла $|\beta| = |\beta_{\min}|$.

Для определенности систему на рис. 1 будем называть однобазовой радиолокационной системой (РЛС). С учетом введенных обозначений выражения для доплеровского сдвига частоты и угла прихода сигнала имеют вид

$$f = -\frac{1}{\lambda} \frac{dl}{dt}, \quad (1)$$

$$\alpha = \arctg(y/x), \quad (2)$$

λ – рабочая длина волны; t – время; $l = r_{\Pi} + r_{\text{пр}}$ – суммарная дальность, $r_{\Pi} = \sqrt{(d-x)^2 + y^2}$, $r_{\text{пр}} = \sqrt{x^2 + y^2}$.

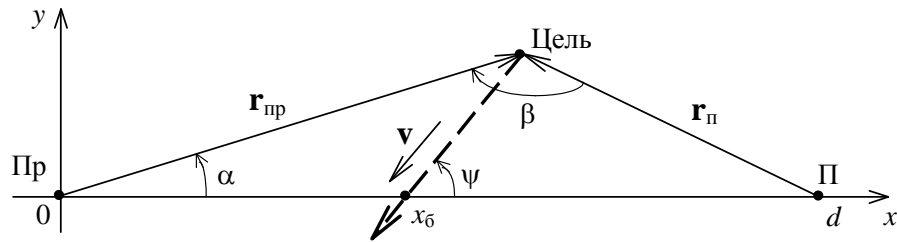


Рис. 1. Геометрия бистатического радиолокатора:

$r_{\text{п}}$ и $r_{\text{пр}}$ – дальности от антенн до цели; α – пеленг цели; β – угол между направлениями от цели на передающую и приемную антенны (бистатический угол); v – скорость цели

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития просветной радиолокации является переход от бистатических к многопозиционным системам, состоящим из нескольких однобазовых РЛС, в которых совместно осуществляется радиолокационное наблюдение целей. Однобазовые РЛС в этом случае удобно называть бистатическими ячейками. И поскольку просветная многопозиционная радиолокация находится на начальном этапе исследований, то для их упорядоченности целесообразно наметить основные принципы работы и перспективные способы построения таких систем, что и сделано в данной статье.

Виды просветных многопозиционных РЛС

К многопозиционным радиолокационным системам (МПРЛС) относят системы с несколькими разнесенными в пространстве передающими и приемными позициями, в которых производится совместная обработка получаемой информации о целях [5]. Существует большое число различных типов МПРЛС, различающихся назначением, составом и основными характеристиками. Для удобства анализа МПРЛС их классифицируют по ряду характерных признаков. Например, в [5, 6] МПРЛС разделяют: по степени когерентности и уровню объединения информации; по степени автономности приема сигналов; по месту расположения позиций и т.д. Не вдаваясь в детали этой классификации, отметим, что определение МПРЛС и указанные признаки можно в полной мере отнести и к просветным радиолокационным устройствам. Однако последние имеют некоторые особенности, что необходимо учитывать при анализе их работы.

Просветная радиолокация предопределяет расположение в разных точках пространства передатчика и приемника – цель должна находиться между ними – и тем самым минимальное количество позиций. По принятой в радиолокации терминологии просветная система с одним передатчиком и одним приемником – однобазовая РЛС (рис. 1) – является бистатической РЛС [5,6]. Все просветные системы с большим количеством позиций можно условно разделить на два класса:

1) системы с одним передатчиком и несколькими приемниками – их часто называют РЛС с разнесенным приемом [5]. Они реализуются наиболее просто, так как бистатические ячейки, образованные передатчиком и каждым из приемников, работают с одним и тем же зондирующим сигналом;

2) системы с несколькими передатчиками и одним и более приемниками – заметно сложнее в организации, поскольку ячейки, образованные разными передатчиками, должны работать в различных частотных диапазонах или поочередно во времени. Это предотвращает проникновение рассеянных и излученных сигналов одной системы в приемники других РЛС.

В случае частотного разнесения, селекция каналов в приемниках осуществляется высокоизбирательными фильтрами. Разница частот передатчиков и полосы пропускания приемных фильтров каналов определяется диапазоном доплеровских смещений, или, проще говоря, максимальным смещением f_{max} . Согласно (1), оно соответствует наиболее скоростным

целям $v = v_{\max}$, находящимся в окрестности границы зоны действия (т.е. $|\beta| = |\beta_{\min}|$) и двигающимся по биссектрисе угла β (рис. 1) в направлении базы:

$$f_{\max} = \frac{2v_{\max}}{\lambda} \cos(\beta_{\min}/2).$$

Если пользоваться временным разделением сигналов, то в системе организуются поочередное излучение передатчиков и временные окна для работы бистатических радаров. Основой временной селекции являются относительно узкая ширина зоны действия и небольшое время задержки рассеянного сигнала относительно прямого.

Потенциально каждая пара передатчика и приемника может образовывать бистатическую ячейку. Для этого должен использоваться кооперированный прием [5]: все приемники РЛС рассчитаны на прием сигналов от целей, облученных любым передатчиком.

На практике переход к нескольким передатчикам может быть оправдан простотой и удобством их возможного размещения, необходимости повышения помехозащищенности системы, соображениями по увеличению зоны местоопределения, а также желанием создания РЛС с измерениями пеленга относительно передающей системы.

Расстояние между приемниками (передатчиками) определяет степень пространственной когерентности рассеянных объектами сигналов в пунктах приема. Например, относительно небольшие расстояния – не более нескольких длин волн – между приемниками РЛС с разнесенным приемом позволяют рассматривать приемную систему МПРЛС как единую антенную решетку (или разреженную решетку), способную измерять фазовые сдвиги сигналов. Точно также небольшое разнесение передающих антенн и измерение в приемнике разности фаз сигналов, рассеянных на объекте, дает возможность оценивать угловое положение объекта относительно системы передатчиков.

Существенным признаком классификации просветных МПРЛС является набор первичных параметров, используемых для последующей оценки координат и траектории цели. Так, в “традиционных” просветных РЛС с выделением сигнала доплеровской частоты [1, 3 и т.д.], как отмечалось ранее, измерению подлежат доплеровская частота и пеленг (1), (2): этих данных достаточно для определения координат в однобазовых РЛС, т.е. при минимальном числе элементов системы.

Отказ от угловых измерений существенно упрощает конструкцию приемников. Это делает актуальной задачу построения многопозиционных (многобазовых) систем только на доплеровских измерениях.

Доплеровская система с одним передатчиком и двумя приемниками исследовалась в [7]. В основе её работы лежит связь доплеровской частоты с дальностью до цели (1). Интегрирование (1) с учетом того, что в момент t_0 пересечения целью базы $l(t_0) = d$, позволяет определить суммарную дальность [7]

$$l(t) = \begin{cases} d + \lambda \int_t^{t_0} f(t) dt, & t \leq t_0, \\ d - \lambda \int_{t_0}^t f(t) dt, & t > t_0. \end{cases} \quad (3)$$

На практике момент t_0 определяется по наблюдениям частоты $f(t)$ из условия $f(t_0) = 0$.

Суммарной дальности l в однобазовой системе соответствует линия положения в виде эллипса с фокусами в пунктах приема и излучения. В системе с двумя разнесенными приемниками (рис. 2, а) по измерениям $f_1(t)$ в приемнике Пр₁ и $f_2(t)$ в приемнике Пр₂ по формулам (3) можно определить дальности $l_1(t)$, $l_2(t)$ и соответствующие им эллипсы положения. Пере-

сечение эллипсов и даст искомое местоположение объекта. Отсюда следуют два важных вывода:

- в многопозиционной РЛС на доплеровских измерениях приемники надо располагать так, чтобы в зоне их совместной видимости находилось единственная точка пересечения эллипсов положения, однозначно определяющая координаты цели (ближайшие окрестности приемника и передатчика обычно во внимание не принимаются);
- при равноточных оценках суммарных дальностей $l_1(t)$, $l_2(t)$ для получения наилучшей точности оценки местоположения цели следует увеличивать разнос между приемниками, так чтобы острый угол между линиями положения был максимален. При этом расстояние между приемниками должно обеспечивать совместное наблюдение цели (зоны видимости бистатистических ячеек должны перекрываться).

Пример неудачного расположения приемников приведен на рис. 2, б: они вместе с передатчиком расположены на одной линии. Здесь невозможно однозначное определение координат в отличие от РЛС с правильным расположением приемников (рис. 2, а), когда они равноудалены от передатчика и насколько возможно разнесены между собой. Аналогичные выводы справедливы и для системы с одним приемником и двумя передатчиками, с той лишь разницей, что разносить надо передатчики.

Уточнение координат цели, найденных с использованием (3), по всем имеющимся на текущий момент первичным (доплеровским) измерениям можно произвести, например, методом максимального правдоподобия [7] с учетом предполагаемых модели движения цели и закона распределения ошибок измерения доплеровской частоты [5].

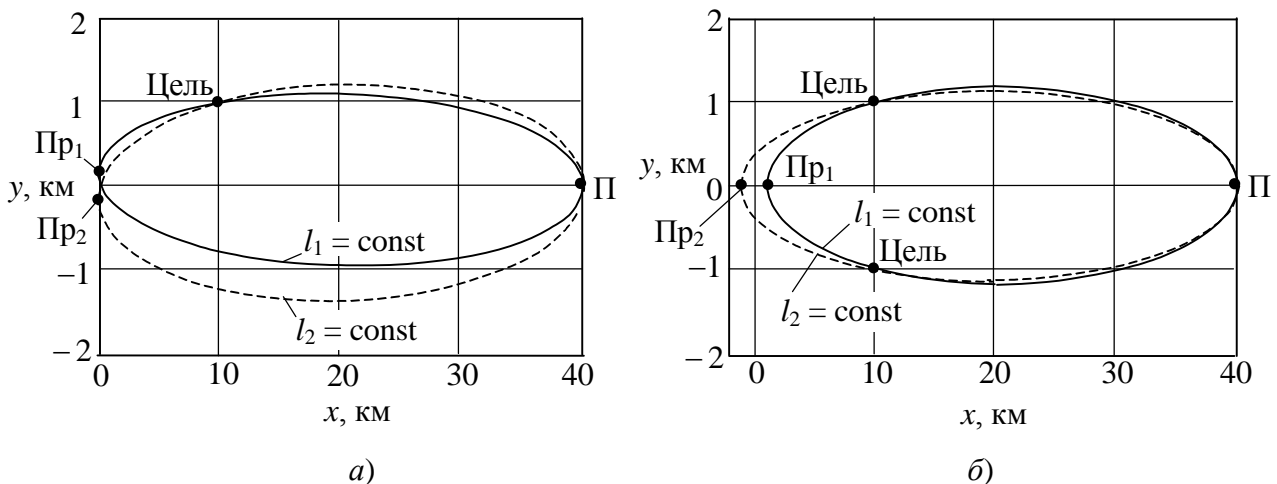


Рис. 2. Геометрия разнесенной просветной РЛС с однозначным (а) и неоднозначным (б) определением координат

Точность определения координат

При использовании метода максимального правдоподобия потенциальную точность определения траекторных параметров находят с помощью информационной матрицы Фишера [5]. Для этого распределение оценок первичных параметров полагают нормальным с нулевым средним. Траекторию цели описывают линейной моделью, что связано с узостью зоны действия системы [1, 3].

Оценка точности позволяет выявить преимущества от использования той или иной геометрии системы и определить эффект от добавления приемников и передатчиков.

Приведем методику составления матрицы Фишера и расчета соответствующей ей потенциальной точности в многобазовых системах с измерениями доплеровской частоты принимаемого сигнала.

Для линейного изменения координат цели доплеровская частота, согласно (1), в бистатической ячейке, образованной j -м передатчиком и k -м приемником, выражается следующим образом:

$$f_{jk}(\boldsymbol{\chi}) = -\frac{1}{\lambda_j} \left\{ \frac{(x - x_{пj})v_x + (y - y_{пj})v_y}{\sqrt{(x - x_{пj})^2 + (y - y_{пj})^2}} + \frac{(x - x_{пк})v_x + (y - y_{пк})v_y}{\sqrt{(x - x_{пк})^2 + (y - y_{пк})^2}} \right\}, \quad (4)$$

где λ_j – рабочая длина волны j -го передатчика; $(x_{пj}, y_{пj})$, $(x_{пк}, y_{пк})$ – координаты j -й передающей и k -й приемной антенны; $\boldsymbol{\chi}$ – вектор траекторных параметров,

$$\boldsymbol{\chi} = [x_n, y_n, v_x, v_y]^T;$$

$x_n = x(t_n)$, $y_n = y(t_n)$ – координаты цели в момент наблюдения t_n ; $x = x(t) = x_n - v_x(t_n - t)$, $y = y(t) = y_n - v_y(t_n - t)$ – координаты цели в предыдущие моменты времени t ; v_x, v_y – алгебраические проекции вектора скорости \mathbf{v} цели на координатные оси; T – знак транспонирования.

Для определенности положим, что измерения в ячейках производятся дискретно в одинаковые моменты времени t_i через один и тот же интервал T : $t_i = iT$, $i = \overline{1, n}$. В этом случае (4) определяет связь частоты принимаемого сигнала с координатами x и y , соответствующие этим моментам:

$$x = x(t_i) = x_n - v_x(n - i)T, \quad y = y(t_i) = y_n - v_y(n - i)T.$$

Результаты вычислений по (4) для системы и траектории с заданными параметрами объединим в блочную матрицу-вектор:

$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\chi}) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11}(\boldsymbol{\chi}) \\ \mathbf{F}_{12}(\boldsymbol{\chi}) \\ \dots \\ \mathbf{F}_{jk}(\boldsymbol{\chi}) \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \text{где } \mathbf{F}_{jk}(\boldsymbol{\chi}) = \begin{bmatrix} f_{jk1}(\boldsymbol{\chi}) \\ f_{jk2}(\boldsymbol{\chi}) \\ \dots \\ f_{jki}(\boldsymbol{\chi}) \\ \dots \end{bmatrix},$$

а число подматриц \mathbf{F}_{jk} соответствует числу бистатических ячеек.

Производные элементов векторной функции $\mathbf{h}(\boldsymbol{\chi})$ по составляющим вектора $\boldsymbol{\chi}$ также расположим в блочной матрице:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11} \\ \mathbf{H}_{12} \\ \dots \\ \mathbf{H}_{jk} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \text{где } \mathbf{H}_{jk} = \frac{\partial \mathbf{F}_{jk}(\boldsymbol{\chi})}{\partial \boldsymbol{\chi}}.$$

С учетом введенных обозначений матрица Фишера \mathbf{J} и корреляционная матрица \mathbf{Q} ошибок определения составляющих вектора $\boldsymbol{\chi}$ примут вид

$$\mathbf{J} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}, \quad \mathbf{Q} = \mathbf{J}^{-1}, \quad (5)$$

где $\mathbf{R} = M\{\Delta\mathbf{z}\Delta\mathbf{z}^T\}$ – корреляционная матрица ошибок первичных измерений (измерений доплеровской частоты), $\Delta\mathbf{z}$ – вектор ошибок:

$$\Delta\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{F}_{11} \\ \Delta\mathbf{F}_{12} \\ \dots \\ \Delta\mathbf{F}_{lk} \\ \dots \end{bmatrix}, \quad \Delta\mathbf{F}_{lk} = \begin{bmatrix} \Delta f_{lk1} \\ \Delta f_{lk2} \\ \dots \\ \Delta f_{lki} \\ \dots \end{bmatrix}.$$

Диагональные элементы матрицы \mathbf{Q} (5) представляют собой минимальные значения дисперсий ошибок определения координат

$$\sigma_x^2 = Q_{11}, \quad \sigma_y^2 = Q_{22}, \quad \sigma_{v_x}^2 = Q_{33}, \quad \sigma_{v_y}^2 = Q_{44}, \quad (6)$$

которые достижимы в рассматриваемой системе.

В качестве примера численного расчета возьмем четырехбазовую систему с двумя приемниками и двумя передатчиками, расположенными так, как показано на рис. 3, а. Рабочая длина волны передатчиков $\lambda_j = 1$ м, $j = \overline{1,2}$; расстояние между j -м приемником и j -м передатчиком $d_{jj} = 40$ км. Разнесение приемников такое же, как и передатчиков, и составляет величину $b = 500$ м. Измерения частоты производятся независимо с интервалом $T = 2$ с и погрешностью $\sigma_f = 0,5$ Гц: корреляционная матрица \mathbf{R} в (5) является диагональной $\mathbf{R} = \sigma_f^2 \mathbf{I}$, где \mathbf{I} – единичная матрица.

На рис. 4 сплошными линиями показаны графики зависимости среднеквадратического отклонения ошибки определения координаты x (6) от времени t_n для двух траекторий (обозначены цифрами 1 и 2), ограниченных значениями $1 \text{ км} < y < 2 \text{ км}$. Траектории изображены штрихом на рис. 3, а и пересекают ось Ox в точках с абсциссами 10 км и 20 км. Скорость цели $v = 200$ м/с. Так как интервал между первичными измерениями $T = 2$ с, а число позиций – 4, то временная ось характеризует и количество S_4 измерений доплеровской частоты $S_4(t_n) = 4((t_n - t_1)/T + 1)$.

Здесь же на рис. 4 штрихом изображены аналогичные графики для увеличенного до $b = 1$ км расстояния между приемниками и между передатчиками, а штрихпунктиром – при добавлении ещё одного приемника к исходной системе, как показано на рис. 3, б.

Из расчетов следует, что заметного улучшения точности можно добиться как за счет добавления позиций, так и за счет большего их разнесения. Это указывает не только на значимость числа приемников (передатчиков), но и пространственной конфигурация системы. На практике, конечно, следует учитывать сужение зоны взаимной видимости ячеек, и результаты могут быть не столь очевидны.

Расчет ошибок определения координаты y показал, что они в рассмотренных случаях существенно (на один – два порядка) меньше чем σ_x . Соотношение ошибок определения составляющих скорости v_x и v_y имеет аналогичный характер.

Дальнейшее добавление позиций, как показано на рис. 3, в, создает своеобразный “просветный коридор”, в котором одновременно срабатывают несколько ячеек, расположенных вблизи от движущейся цели. Помимо более широкой зоны действия, подобные системы за счет разнесения пунктов приема (излучения) и совместной обработки сигналов позволяют получать более полную информацию о структуре рассеянного поля, что дает дополнительные преимущества, например, в задаче распознавания объектов [4, 5].

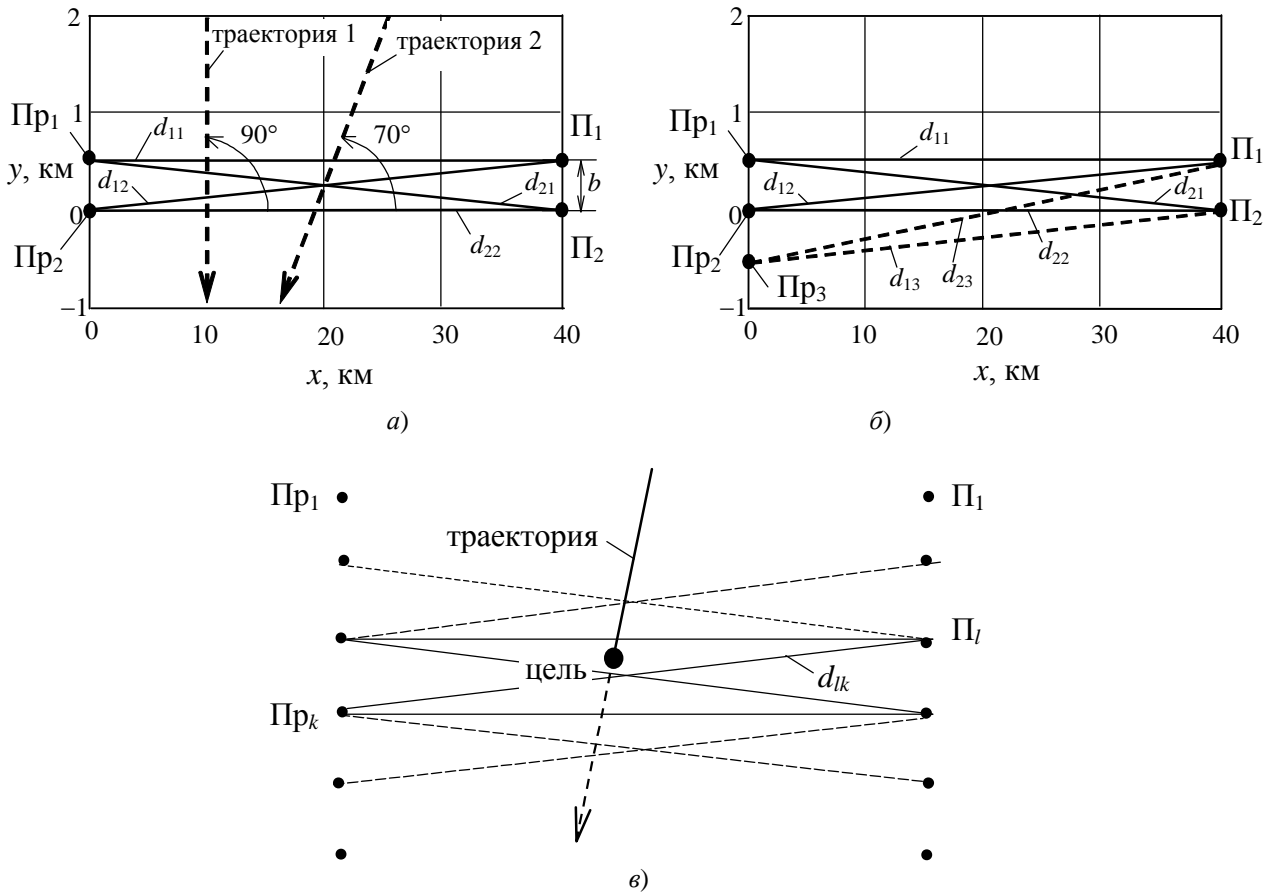


Рис. 3. Примеры просветных многопозиционных систем

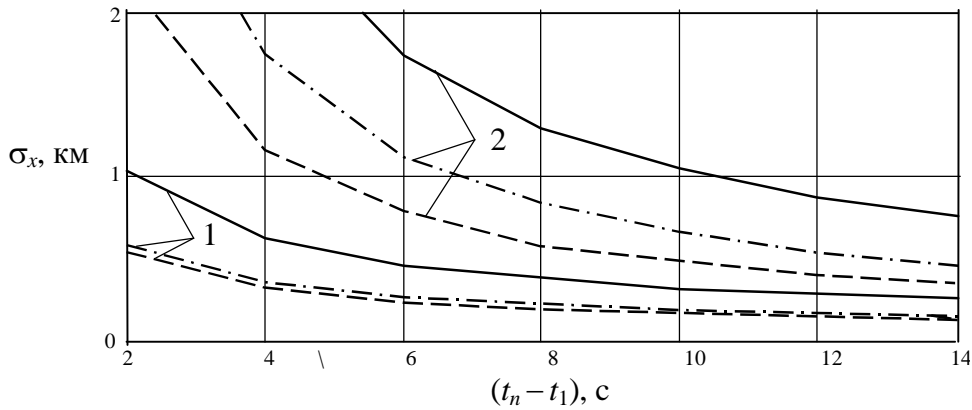


Рис. 4. Зависимость текущего среднеквадратического отклонения ошибки определения координаты x от времени t_n

Выводы

Создание просветных многопозиционных систем является одним из перспективных направлений развития просветных радиолокаторов. Поскольку в МПРЛС наиболее полно используется информация о структуре рассеянного поля, то они приобретают ряд новых и заметно улучшают имеющиеся свойства бистатических просветных систем. В частности, они способны оценивать местоположение цели исключительно по замерам доплеровской частоты принимаемого сигнала, что существенно упрощает конструкцию приемников.

Помощь в проектировании и анализе многопозиционных РЛС могут оказать рассмотренные в работе варианты построения просветных систем с прямым сигналом передатчика в качестве опорного, алгоритмы и методика расчета точности определения координат.

Библиографический список

1. **Бляхман, А.Б.** Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации «на просвет»/ А.Б. Бляхман, И.А. Рунова // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 4. С. 424–432.
2. **Уфимцев, П.Я.** Черные тела и теневое излучение// Радиотехника и электроника. 1989. Т. 34. № 12. С. 2519–2527.
3. Точность определения координат методом максимального правдоподобия при локации «на просвет»/ А.Г. Рындык [и др.]// Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 12. С. 1436–1440.
4. **Chapurskiy, V.** SISAR: shadow inverse synthetic aperture radiolocation/ V. Chapurskiy V. Sablin // IEEE International Radar Conference, Alexandria. – USA, May 2000. P. 322–328.
5. **Черняк, В.С.** Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
6. **Бакулев, П.А.** Радиолокационные системы/ П.А. Бакулев. – М.: Радиотехника, 2004.– 320 с.
7. **Ковалев, Ф.Н.** Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением «на просвет»// Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 331–339.

*Дата поступления
в редакцию 12.07.2011*

F.N. Kovalev

**FORWARD-SCATTERING MULTIRADARS ON THE BASIS
OF DOPPLER FREQUENCY MEASUREMENTS**

Principles of forward-scattering Doppler multiradars construction are considered. Classification of multiradars and calculation of accuracy are shown.

Key words: forward-scattering multibase radiolocation, forward-scattering multiradar, Doppler frequency, accuracy of trajectory parameters measurement.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 534.222

А.Е. Малашенко, В.В. Перунов, А.А. Малашенко

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ ПОДВОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации
морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

Рассматриваются особенности передачи возмущения, вызванного землетрясением, в водной толще. Обосновывается необходимость использования сейсмогидроакустических систем для регистрации звуковых волн, порождённых землетрясением, в водной среде. Приводится описание и технические характеристики автономной морской сейсмоакустической станции (АМСС), созданной в СКБ САМИ ДВО РАН.

Ключевые слова: гидроакустические предвестники землетрясений, автономная морская сейсмоакустическая станция, гидрофон, регистратор.

Особенность сейсмических процессов в северо-западной части Тихого океана состоит в том, что эпицентры подавляющего большинства землетрясений располагаются в прибрежной зоне Курило-Камчатской островной системы на подводном континентальном склоне, обращенном в сторону открытого океана. В таких условиях становится очевидным, что контроль сейсмического режима в этом регионе возможен с использованием гидроакустических донных систем. В качестве ведущего приемного элемента в этих системах используется гидрофон, представляющий собой пьезоэлектрический датчик давления.

Основным механизмом образования акустических сигналов в гидросфере, обусловленных землетрясением, является то, что они проявляются в виде сейсмических волн, распространяющихся в твердой оболочке Земли. Для Курило-Камчатского региона скорости распространения продольных волн составляют 5-6 км/с, поперечных - 3-4 км/с [4]. При приеме сейсмических сигналов на дне океана или водной толще гидрофон регистрирует давление, пропорциональное вертикальной составляющей скорости смещения дна. Поэтому гидрофон эффективно воспринимает **P**-волну сейсмического сигнала. Поперечная волна подходит ко дну практически под прямым углом, поэтому в воде не происходит ее трансформации в волну сжатия. В связи с этим на записях сейсмических сигналов, полученных с помощью гидрофона, **S**-волна практически отсутствует. Но особенно эффективен гидрофон при регистрации **T**-волны сейсмического сигнала, поскольку она представляет собой гидроакустическую волну давления, распространяющуюся в водной массе со скоростью звука, равной примерно 1,5 км/с.

При этом гидроакустическая волна из-за многократных отражений от водной поверхности и наклонного дна, при постепенном изменении углов падения акустических лучей от скользящих к крутым, попадает в подводный или приповерхностный звуковой канал. В дальнейшем распространение лучей происходит без касания дна, т.е. в условиях минимальных потерь энергии. В результате акустический луч может содержать значительную часть энергии сигнала, а его интенсивность и длительность нередко превышают аналогичные параметры **P**-волны. Из-за практически полной потери энергии гидроакустической волной, при

ее переходе из воды в донные грунты и в случае трансформации ее на этой границе, прием T -волны наземными сейсмостанциями оказывается, как правило, неэффективным. Однако сведения о T -волне могут быть с успехом использованы для определения эпицентра сейсмических событий с малой глубиной очагов. Это связано с тем, что при распространении сейсмических сигналов из-за рефракционных эффектов в приповерхностном слое земной коры обычно наблюдаются большие потери энергии P -волны, чем объясняется низкая эффективность регистрации событий наземными сейсмостанциями. Кроме того, T -волна в ряде случаев вследствие своей физической природы оказывается единственным источником информации для определения цунамигенности землетрясений. Использование возможностей по расширению и переносу частотного диапазона волн, излучаемых близкими землетрясениями, в область звуковых частот с одновременным повышением чувствительности приемных гидроакустических систем позволяют получать значительно больше информации о сейсмическом режиме исследуемого района, чем наблюдения с применением только сейсмической аппаратуры.

В качестве одной из наиболее информативных характеристик служит изменчивость шума океана, отражающая явное влияние сейсмической активности как на общие свойства его акустического поля, так и на формирование и последующую трансформацию отдельных акустических волн. На фоне последних при их параллельной записи сейсмограмм, достаточно отчетливо выделяется и прослеживается T -волна, обусловленная упругими свойствами морской воды на акваториях дальневосточных морей.

Для более детального анализа шумовых составляющих океанских вод при поиске гидроакустических предвестников землетрясений могут быть использованы с высокой степенью информационной обеспеченности:

- среднее значение квадрата шумового сигнала на коротких временных интервалах длительностью до десятых секунд;
- величина и длительность превышений квадратов шумового сигнала относительно его среднего значения;
- распределение количества превышений амплитуды сигналов и их суммарной длительности на заданных временных интервалах.

Количество превышений квадратов шумового сигнала относительно его среднего уровня и суммарная длительность превышений среднего уровня в интервале до 300 с возрастают в несколько раз перед возникновением сейсмического события, затем уменьшаются до прежнего, начального, уровня и далее вновь возрастают в момент, непосредственно предшествующий или совпадающий с собственно сейсмическим событием. Эти обстоятельства говорят о достаточно однозначной связи перечисленных выше характеристик шума океана, начиная со стадии подготовки землетрясения в зоне очага предстоящего сейсмического события. Для доказательства эффективности использования наблюдаемой шумовой гидроакустической аномалии океана перед землетрясением при анализе 8-11 энергетических классов в качестве предвестника требуются дополнительные, достаточно продолжительные исследования, особенно при наблюдении за временной изменчивостью шума перед сильными землетрясениями, а также о возможной акустической стратификации водных толщ, которая может нести более однозначную и непротиворечивую информацию об акустических предвестниках землетрясений [6].

Развитие цифровой техники сбора, обработки и передачи информации позволяет создать цифровые автономные сейсмоакустические станции с разнесенными в пространстве акустическими приемниками, объединенными в единую информационную сеть.

Автономная морская сейсмоакустическая станция (АМСС) (рис. 1), созданная в СКБ САМИ, предназначена для регистрации акустических сигналов в автономном режиме и конструктивно состоит из аппаратного модуля, в прочном корпусе которого размещен источник питания и модуль регистратора, а также из цифровой приемной антенны из гидрофонных модулей [2, 3]. В качестве первичного источника питания используются литиевые батареи ФУЛ-600 в количестве 3 штук.



Рис. 1. Автономная морская сейсмоакустическая станция

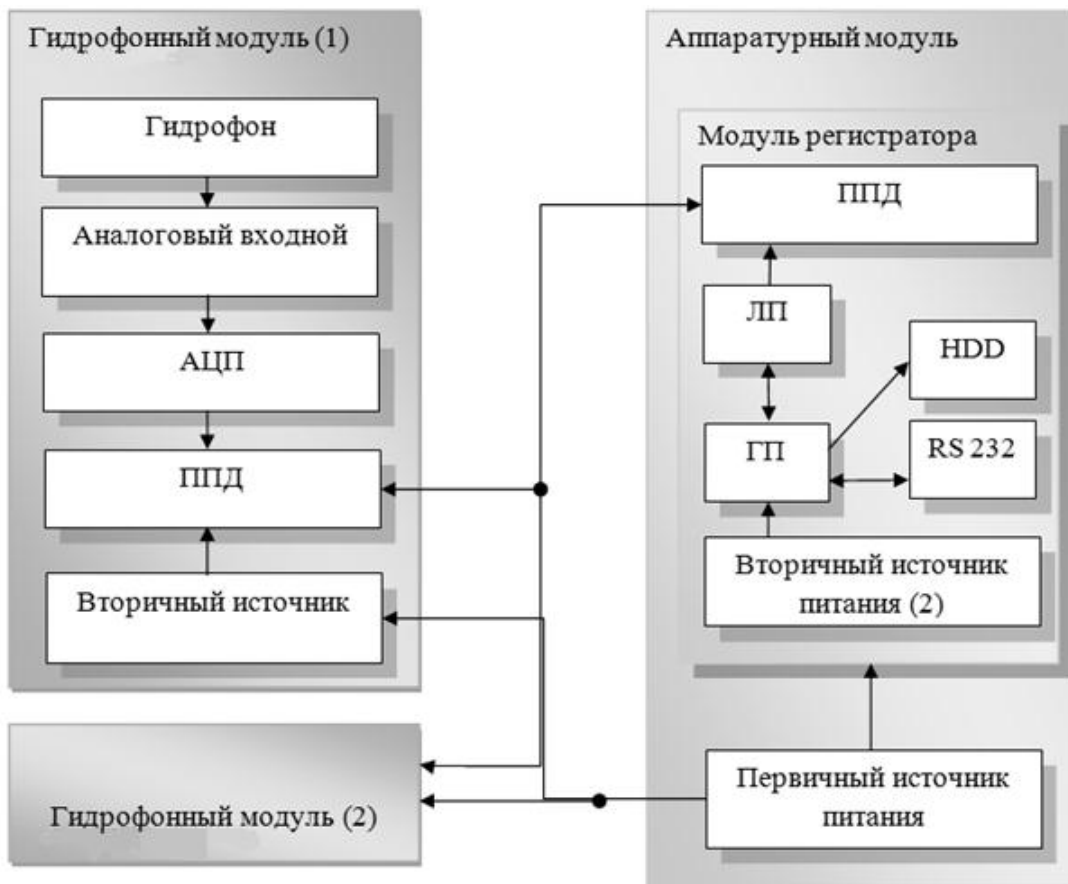


Рис. 2. Структурная схема АМСС:

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ГП – головной процессор; ЛП – лучевой процессор; ППД – приёмо-передатчик данных; HDD – накопитель на жёстком магнитном диске

Приемная антенная состоит из трех гидрофонных модулей. Гидрофонный модуль (ГМ) (рис. 3) выполняет функции преобразования аналогового сигнала с выхода гидрофона в циф-

ровую форму с широким динамическим диапазоном и малым уровнем собственных шумов. Полученные данные передаются в аппаратный модуль по локальной сети в цифровом виде по витой паре экранированных проводов интерфейса RS-485.

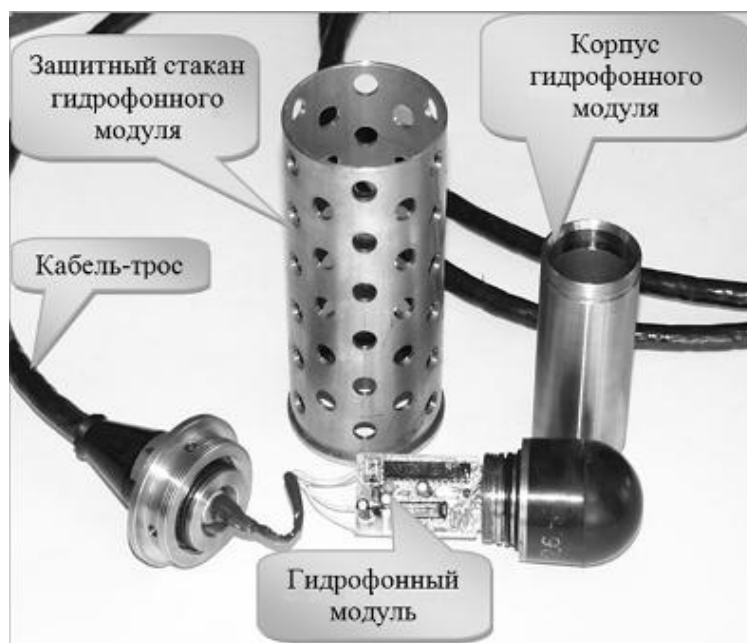


Рис. 3. Конструкция цифровой приёмной антенны

Основные технические характеристики гидрофонного модуля:

полоса частотот 30 до 300 Гц;
частота дискретизации АЦП4000 Гц;
рабочая глубина до100 м;
напряжение питания5 В.

Модуль регистратора предназначен для сбора цифровой информации, преобразования протоколов, буферизации данных и записи их на жёсткий диск HDD по интерфейсу IDE. Регистратор так же имеет интерфейс RS-232 для связи с технологическим компьютером либо модемом.

Модуль регистратора опрашивает гидрофонный модуль в соответствии с протоколом обмена и собирает блок данных в буферной статической памяти. После этого данные по интерфейсу SPI передаются по определённому протоколу головному процессору, который преобразует блоки и осуществляет запись данных на жёсткий диск по интерфейсу IDE. Головной процессор также поддерживает обмен данными и командами с внешней ПЭВМ по интерфейсу RS-232 со скоростями до 115 кБод. Собранные с гидрофонного модуля данные, дополняются служебной информацией и записываются на жёсткий диск в виде файлов. Размер записываемой информации ограничен лишь объёмом жёсткого диска [2, 5].

Конструкция автономной морской сейсмической станции позволяет устанавливать и поднимать ее с маломерных судов в условиях мелководных бухт и озер Сахалина. В отсутствии шумов развитого поверхностного волнения и удаленного судоходства, шумов обтекания, вызванных течениями, весьма характерных для дальневосточных морей, регистрация сейсмоакустических шумов в условиях озера оказывается более эффективной, а проведение эксперимента менее затратным.

Отработка конструкции проводилась на острове Сахалин в озере Червячное (рис. 4, 5). Продолжительность исследования 15 суток. Глубина места постановки автономной морской сейсмоакустической станции 6,5 м [7].



Рис. 4. Место постановки станции



Рис. 5. Постановка станции

Выводы

Для поиска гидроакустических предвестников землетрясений могут быть использованы с высокой степенью информационной обеспеченности автономные цифровые сейсмоакустические станции с пространственно развитыми многоэлементными приемными антеннами. Развертывание сейсмоакустических приемных комплексов большой автономности в условиях озер Сахалина и Курильских островов позволит получить статистику наблюдений за временной изменчивостью гидроакустического шума перед сильными землетрясениями и повысить достоверность прогноза землетрясений.

Библиографический список

1. **Кадыков, И.Ф.** Акустика подводных землетрясений / И.Ф. Кадыков. – М.: Наука, 1986.
2. **Малашенко, А.Е.** Глубоководный автономный комплекс для измерения и передачи информации о характеристиках полей морской среды / А.Е. Малашенко, М.В. Мироненко, Ю.В. Киян // Сборник трудов 14-й сессии РАО. – М.: ГЕОС. 2011.
3. **Малашенко, А.Е.** Морское приборостроение комплексного мониторинга Мирового океана / А.Е. Малашенко [и др.] // Экологические системы и приборы. – М.: ООО Научтехиздат. №7. 2003. С. 3–6.
4. **Мироненко, М.В.** Прогнозирование сильных землетрясений по измерениям их предвестни-

- ков / М.В. Мироненко [и др.] // Сборник трудов 13-й сессии РАО. – М.: ГЕОС. 2003. Т. 2. С. 70–71.
5. Пат. 49286 РФ МПК, G01V 1/38. Автономная донная сейсмическая станция / Перунов В.В. [и др.], 20035111413/22; заявл. 18.04.2005; опубл. 10.11.2005. Бюл. № 31.
 6. Соловьев, С.Л. Регистрация фаз Т в сигналах землетрясений в северо-западной части Тихого океана / С.Л. Соловьев [и др.] // Вулканология и сейсмология. 1980. №1. С. 60–69.
 7. Таболяков, А.А. Широкомасштабный акустический эксперимент по измерениям характеристик гидродинамических возмущений морской среды, сформированных синоптическими процессами / А.А. Таболяков, М.В. Мироненко, Л.Э. Карачун // Сборник трудов 14-й сессии РАО. – М.: ГЕОС, 2011.

*Дата поступления
в редакцию 15. 07.2011*

А.Е. Malashenko, V.V. Perunov, A.A. Malashenko

THESES SEISMOACOUSTICAL MEANS OF REGISTRATION OF UNDERWATER EARTHQUAKES

Special features of propagation of disturbance caused by an earthquake, in water mass is examined. Necessity of using seismoacoustical systems for acquisition of sound waves generated by an earthquake, in water environment is proved. Description and specifications of autonomous marine seismoacoustical station (AMSS), made in Special Design Bureau of Sea Research Automation Equipment (SDB SRAE) of FEBRAS is given.

Key words: hydroacoustic earthquake precursors, independent marine seismic stations, hydrophone, the registrar.

УДК 517.465

Е.Н. Пелиновский¹, А.И. Зайцев²**ОЦЕНКА И КАРТИРОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ
НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ УКРАИНЫ**Институт прикладной физики РАН¹,
СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск²

Обсуждается проблема прогноза высот волн цунами на Украинского побережье Черного моря. Выполнены расчеты прогностических цунами, источники которых равномерно распределены в бассейне Черного моря (всего 55 событий). Их результаты сопоставлены с результатами численного моделирования исторических событий (1939 и 1966 годов) и данными немногочисленных измерений. На этой основе выдан предварительный прогноз высот волн цунами вдоль Украинского побережья Черного моря.

Ключевые слова: цунами, численное моделирование; Чёрное море.

Введение

Район Черного моря не отличается большой сейсмической активностью [1]. Совсем недавно опубликован каталог цунами в Черном море, составленный специалистами из Греции и Болгарии [5]. Он составлен по тому же принципу, что и так называемый Новый европейский каталог цунами, принятый сейчас странами Европейского Союза. В нем содержится описание 29 случаев цунами, из которых три случая (815 до н.э., 557 до н.э. и 1341) признаются ошибочными. Таким образом, остается 26 событий. Источники цунами расположены на побережья Крыма, Болгарии и Турции, и в большинстве своем цунами возникло в результате землетрясения. 22 случая цунами признаются достоверными и почти достоверными (3 и 4 балла по принятой сейчас 4-бальной системе достоверности). Интенсивность цунами оценена по новой 12-бальной шкале, разработанной Пападопулосом и Имамурой [6]. За период с 544 года случилось всего два события большой интенсивности (больше 7 баллов), так что период повторяемости таких событий составляет примерно 750 лет. Число средних цунами (с интенсивностью от 4 до 7) равно 5, и они зафиксированы с 1650 года. Таким образом, период повторяемости «средних» цунами равен 72 года в среднем. Важно подчеркнуть, что в Черном море не было сильных цунами (с интенсивностью, больше 10), подобных случившемуся в 1908 году в Италии (Мессинское цунами) или в 1956 году в Греции. Поэтому опасность цунами в Черном море ниже, чем в Средиземном море или на Дальнем Востоке, но не может игнорироваться.

Методика расчетов

Как и в наших расчетах для российского побережья Чёрного моря [3], мы использовали гидродинамический очаг (рис. 1), который представляет собой в сечении окружность диаметром 65 км. Высота волны в очаге 4 м (3 м выше уровня моря и 1 м ниже). Такие параметры имеют в среднем очаги цунами от подводных землетрясений с магнитудой 7 [4]. Такой источник в океане с постоянной глубины излучает волны одинаково во всех направлениях, так что возможная анизотропия распределения высот волн вдоль побережья связана только с расстоянием до очага и переменной глубиной бассейна.

Расчёты характеристик волн цунами производились с помощью авторского кода NAMI-DANCE [2], основанного на уравнениях мелкой воды в декартовых координатах. В расчетах была использована 1-минутная батиметрия Мирового океана (GEBCO1 Digital Atlas, British Oceanographic Data Centre) с добавлением более точной прибрежной батиметрии, шаг по сетке равняется в среднем 0,5 км. Вся акватория Чёрного моря равномерно по-

крывалась гидродинамическими источниками с шагом по долготе $0,8652$ градуса (в среднем $71,2$ км), и по широте $0,6504$ ($72,2$ км). Общее количество очагов составило 55 . Выполненные выше расчеты распространения цунами от различных источников так же могут быть использованы и для оценки цунами риска Украинского побережья Черного моря. Учитывая то, что береговая линия Украины является одной из самых длинных и сильно изрезанной, мы разбили береговую линию на две части: западную и восточную. Западная часть включает в себя западную часть Крымского полуострова и береговую линию западнее. Все источники цунами мы разбили на три группы по отношению к западной части Черноморского побережья Украины, назвав их близкие, средние и далекие (рис. 2). Эта часть побережья на рисунке выделена штрих пунктирной линией. Это позволит нам оценить роль различных зон в генерации цунами, опасных для Украинского побережья.

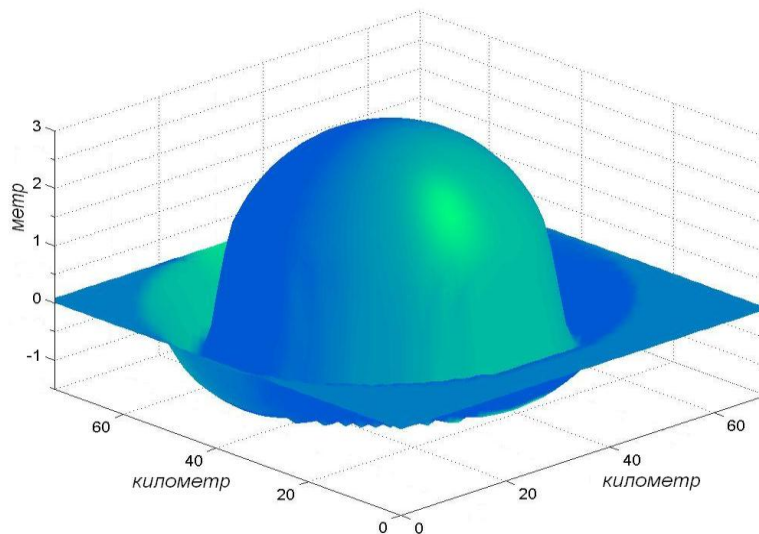


Рис. 1. Гидродинамический очаг

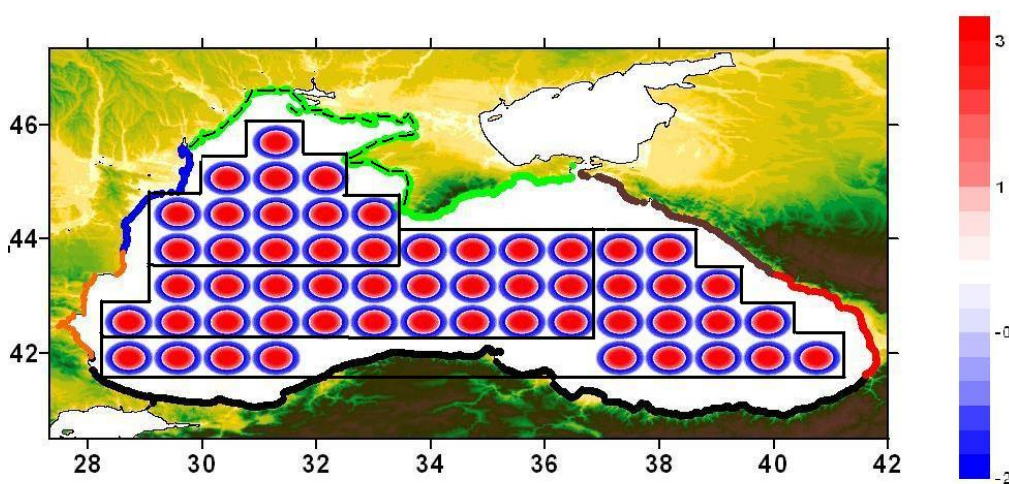


Рис. 2. Разделение источников в Черном море (западная часть) на три зоны: близкие, средние и далекие

Рассмотрим теперь более детально распределение характеристик цунами вдоль различных участков Украинского побережья. Данная модель позволяет рассчитывать накат волн цунами на берег, однако, эти расчеты требуют большого времени и лучшего знания прибрежной батиметрии и береговой топографии. Поэтому здесь такие расчеты не производились, и фактически вычислялся уровень воды в последней мористой точке (на глубине около 5 м), где исполь-

зованы условия полного отражения. Такая ситуация соответствует наличию «стенки» на малых глубинах, и данный прием активно используется, когда надо выполнить большой объем вычислений для сравнительного анализа цунами в различных пунктах побережья.

Рассмотрим теперь одну из частей Украинского побережья Черного моря в районе Донузлавского озера - Евпатории. Рис. 3 демонстрирует распределение высот волн от гидродинамических источников. Распределение высот схожи вне зависимости от расположения источника, что свидетельствует о роли прибрежной батиметрии. В районе Евпатории относительные высоты не более 0–5. В районе Донузлавского озера относительные высоты в пределах 0,7-0,9. Более подробно результаты представлены в табл. 1.

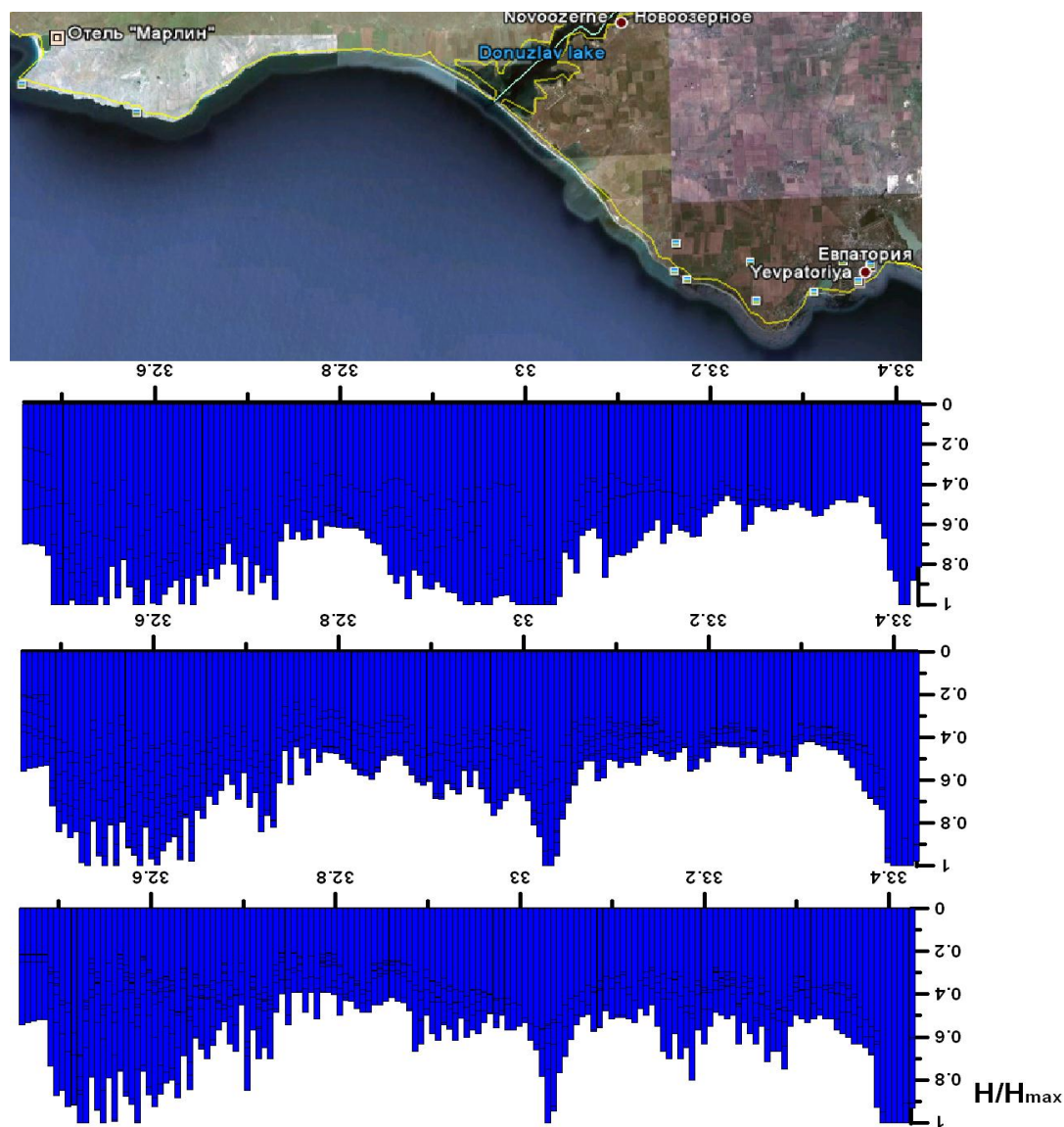


Рис. 3. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (снизу вверх – от дальних, средних и близких соответственно) на Украинском побережье (район Евпатории)

Далее рассмотрим восточную часть Черноморского побережья Украины. Она включает в себя восточную часть Крымского полуострова до Керченского пролива. Все источники цунами мы разбили на три группы по отношению к этой части побережья Украины, назвав их близкие, средние и далекие (рис. 4). Эта часть побережья на рис. 4 выделена штрих пунктирной линией, что позволит нам оценить роль различных зон в генерации цунами, опасных для Украинского побережья.

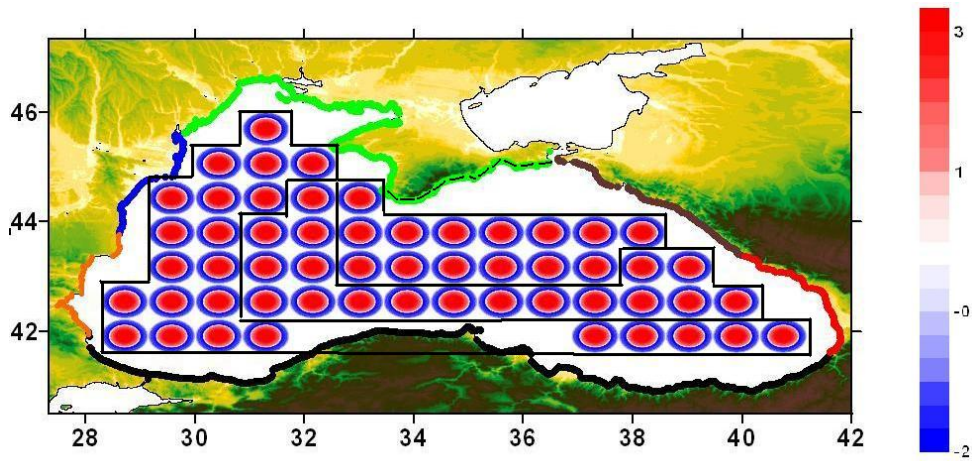


Рис. 4. Разделение источников в Черном море (восточная часть) на три зоны: близкие, средние и далекие

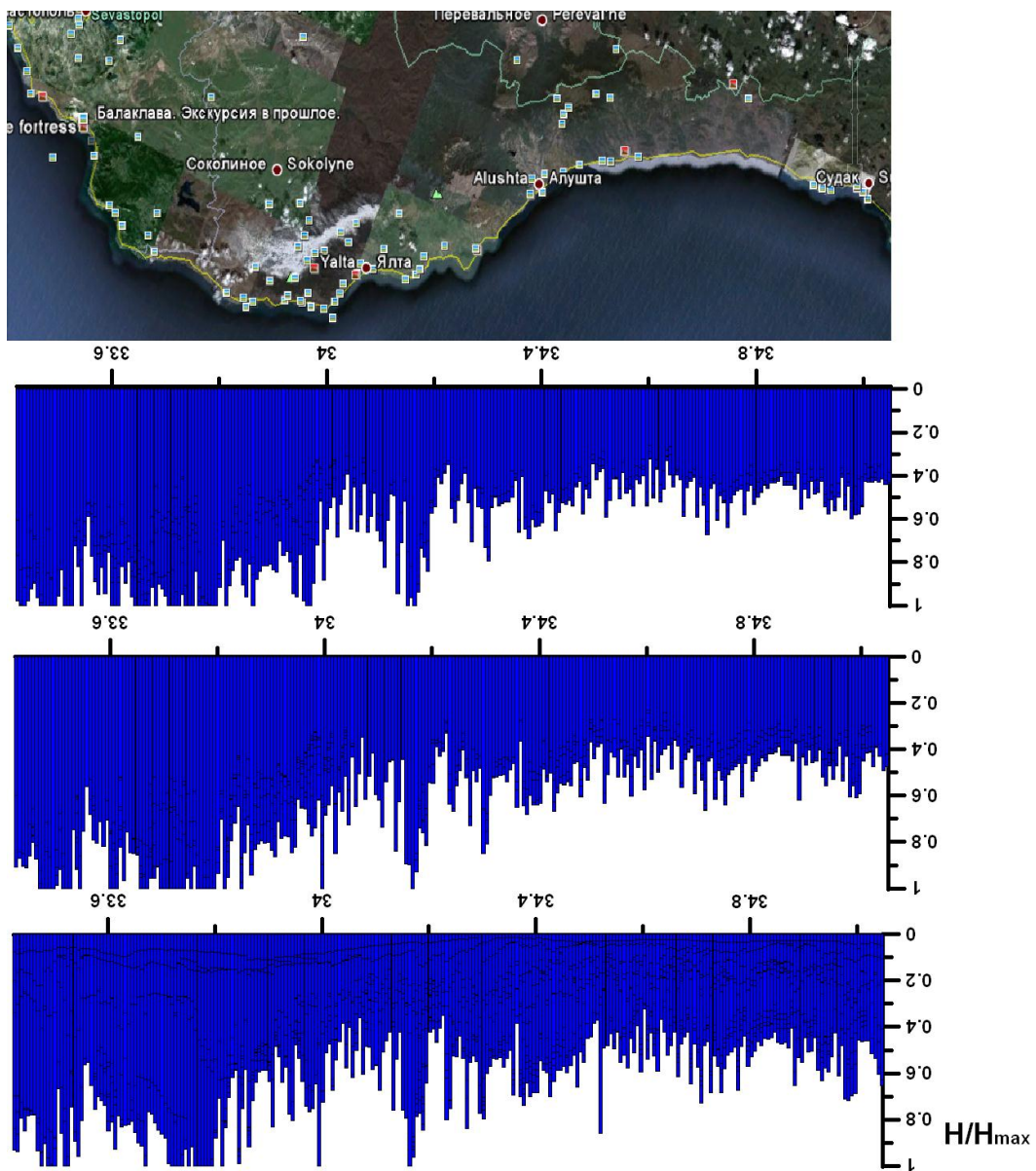


Рис. 5. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (снизу вверх – от дальних, средних и близких соответственно) на Украинском побережье (район Ялта – Судак)

Рассмотрим так же одну из частей Украинского побережья Черного моря, центральную часть Крымского полуострова в районе Ялта – Судак. Рис. 5 демонстрирует распределение высот волн от гидродинамических источников. От средне удалённых и от дальних источников можно видеть «провал» до 0,6 (в относительных единицах) западнее п. Южное. В самом п. Южном высоты волн цунами находятся в пределах 0,6–0,7. Следует отметить, что в районе Одессы высоты наблюдаются не менее 0–8 от средне удалённых и дальних источников. Распределения от всех видов источников, независимо от удалённости, практически схожи. В районе западнее Ялты наблюдаются максимальные высоты, в пределах 0,8–1. В Ялте «провал» до 0,4–0,5, несмотря на то, что восточнее Ялты снова «подъём» до 1. Таким образом, около Ялты высота цунами меняется сильно из-за донной и береговой топографии. Район Алушты – Судака спокоен, относительные высоты не более 0,5. Более подробно результаты представлены в табл. 1.

Рассмотрим другую часть Украинского побережья Черного моря, восточную часть Крымского полуострова в районе Феодосия – Керчь. Рис. 6 демонстрирует распределение высот волн от гидродинамических источников. На всех трёх графиках можно видеть «подъёмы» до 0,9 в районе п. Орджоникидзе (западнее Феодосии) и в районе г. Керчь и Керченского пролива. На всей остальной части можно видеть относительные высоты не более 0,4.

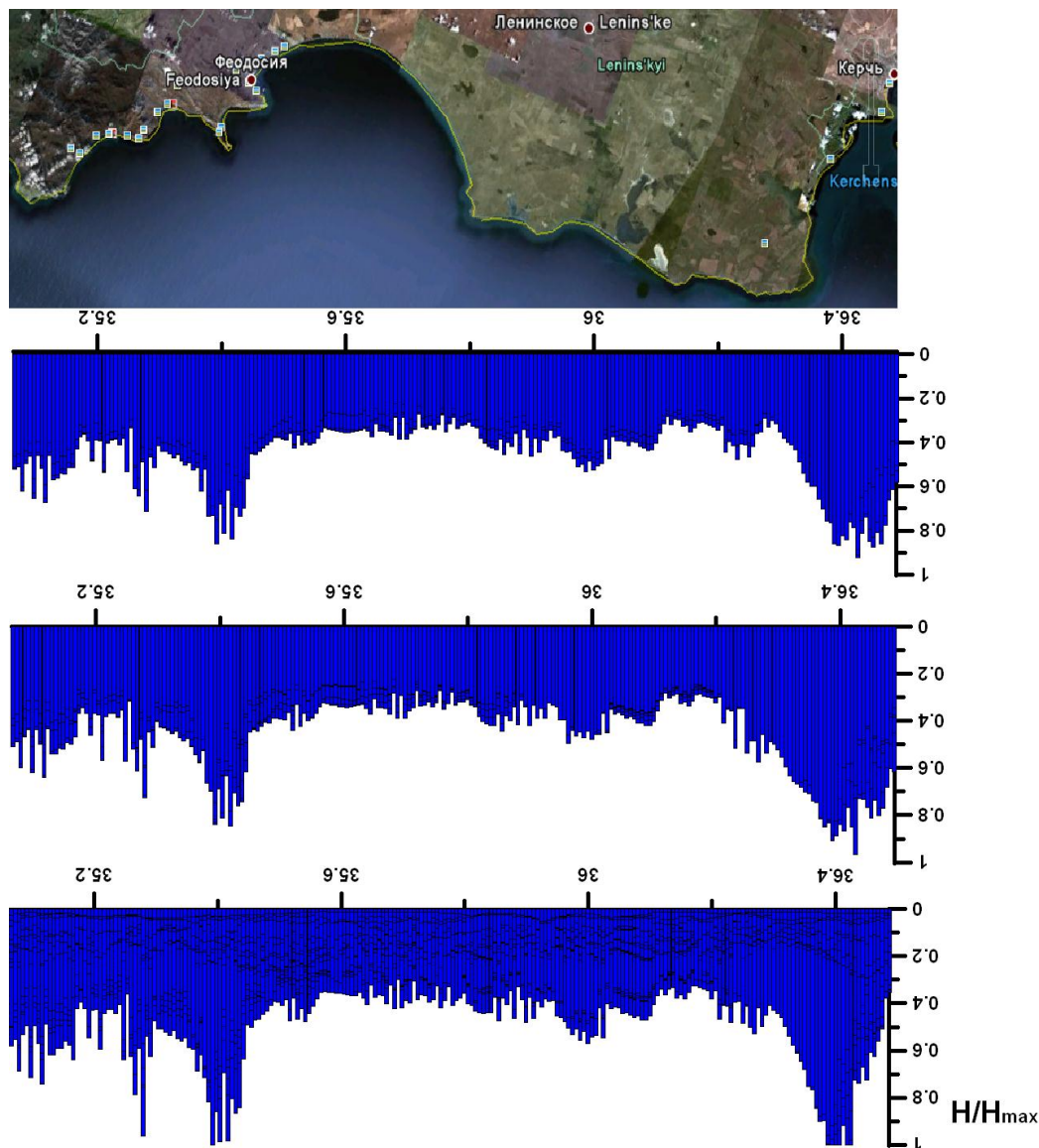


Рис. 6. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (снизу вверх — от дальних, средних и близких соответственно) на Украинском побережье (район Феодосия – Керчь)

Оценки высот цунами на побережье Украины

Результаты выполненных модельных расчетов для основных пунктов побережья Черного моря сведены в табл. 1 и представлены на рис. 1. Здесь же представлены рассчитанные высоты волн от двух исторических событий (Турецкое цунами 1939 года и Анапское цунами 1966 года), результаты моделирования которых описаны в прошлом отчете за 2010 год. Наконец, два наиболее сильные сейсмические события в Черном море (1942 и 1944 годов) с магнитудой более 6,5, использованные в прошлом отчете как прототипы возможных цунами, также были использованы для расчета высот волн цунами на различных участках побережья.

Описанные выше данные использованы для выдачи прогностических значений высот волн цунами в данных пунктах. Как мы уже указывали, в нашем распоряжении нет «расчетных» параметров сильных землетрясений, которые были бы ответственны за цунами в Черном море с повторяемостью раз в 100 лет. Поэтому прогноз выдается на основании моделирования уже имеющихся цунами 20 столетия, прогностических цунами с магнитудой более 6.5 и «гидродинамических» цунами, позволяющих сопоставить высоты цунами в различных пунктах. Кроме того, накат волн на берег пока не рассматривается, так что высоты волн цунами задаются в последней мористой точке примерно на глубине 5 м. Тем не менее, для удобства мы даем для них названия близлежащих населенных пунктов. Вдольбереговая дискретность этих точек имеет масштаб около 0,9 км. Прогностическое значение высоты волны определялось как максимальное значение из всех данных для каждого пункта с точностью до 0.5 м. В дальнейшем, эти цифры могут быть использованы для построения детальной схемы цунамирайонирования населенных пунктов с учетом заплеска берега волн цунами.

Таблица 1

Сводные данные о высотах волн цунами на побережье Украины

Пункт	Относительное распределение	Цунами 1966 г. (м)	Цунами 1939 г. (м)	Событие 1944 г. (м), относит. распр.	Событие 1942 г. (м) относит. распр.	Наблюдения (м)	Прогноз высоты волны (м)
Затока	1	0.1	0.1	0.3	0.1		0.5
Ильичевск	0.9	0.1	0.1	0.3	0.1		0.5
Одесса	0.8	0.1	0.1	0.5	0.1		0.5
Южное	0.7	0.1	0.1	0.3	0.1		0.5
Очаков	0.7	0.1	0.1	0.3	0.1		0.5
Донузлавское озеро	0.8	0.1	0.1	0.3	0.2		0.5
Евпатория	0.5	0.4	0.1	0.4	0.2	1 (1869)	1.0
Ялта	0.4	0.4	0.2	0.4	0.3	0.4 (1927)	1.0
Алушта	0.5	0.4	0.2	0.6	0.4	0.7 (1927)	1.0
Судак	0.5	0.4	0.5	1	0.4		1.0
п. Орджоникидзе	0.9	0.6	0.6	0.7	0.7		1.0
Феодосия	0.4	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5 (1939)	0.5
Керчь	0.8	1.2	0.4	0.5	1	0.5 (1939)	1.0

Подчеркнем еще раз, что предлагаемые оценки высот волн цунами не включают локальные эффекты, связанные с возможностью оползневых эффектов. Они основаны только на информации о землетрясениях в бассейне Черного моря и уже прошедших цунами. По-

этому исполнители отчета рассматривают выдаваемый прогноз как предварительный, который будет уточняться в дальнейшем.

Выводы

В данной работе исследована проблема цунами риска для Украинского побережья Черного моря. Цунами в Черном море не является экзотическим событием (за 2000 лет произошло уже 26 событий), так что повторяемость цунами оценивается примерно один раз в 77 лет. Большинство событий произошло у побережья Украины. Исследована сравнительная защищенность различных участков побережья от возможных цунами, возникающих в открытом море. Для этого выбрано около 50 гидродинамических источников, равномерно расположенных в бассейне Черного моря. На этой основе выделены зоны более сильного и более слабого риска цунами. Показано, что сильные цунами могут проявиться на всем побережье Черного моря. В то же время объем количественной информации об исторических цунами крайне мал, поэтому для предварительного прогноза высот цунами мы использовали результаты численного моделирования исторических событий (цунами 1939 и 1966 годов) и возможных прогностических событий. Результаты моделирования показывают, что высоты волн цунами вдоль побережья распределены неравномерно, не превышая 1 м вблизи населенных пунктов. Эти значения могут быть использованы для детального цунамирайонирования отдельных населенных пунктов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (09-05-00971, 11-05-00216, 11-05-92002 ННС_а, 11-05-90740), МК-6734.2010.5 и ГК № 02.740.11.0732.

Библиографический список

1. **Доценко, С.Ф.** Природные катастрофы Азовско-Черноморского региона / С.Ф. Доценко, В.А. Иванов. – Севастополь: НПЦ «Экоси-гидрофизика», 2010. – 174 с.
2. **Куркин, А.А.** Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Изв. АИН РФ Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
3. **Пелиновский, Е.Н.** Оценка и картирование опасности цунами в Чёрном море / Е.Н. Пелиновский, А.И. Зайцев. – Н. Новгород: ИПФАН2010, 2010
4. **Okada, Y.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. America. 1985. V. 75. P. 1135–154.
5. **Papadopoulos, G.A.** Tsunami hazard in the Black Sea and the Azov Sea: a new tsunami catalogue / G.A. Papadopoulos [at al.] // Natural Hazards and Earth Systems, 2011. V. 11. P. 945–963.
6. **Papadopoulos, G.A.** A proposal for a new tsunami intensity scale / G.A. Papadopoulos, F. Imamura // Proceedings International Tsunami Symposium 2001, Seattle, Session 5 (5-1). 2001. P. 569–577.
7. **Yalciner, A.** Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalciner [at al.] // J. Geophys. Research. 2004. V. 109. N. C. 12. C. 12023.

*Дата поступления
в редакцию 26. 07.2011*

E.N. Pelinovsky, A.I. Zaytsev

THE ESTIMATION AND MAPPING OF TSUNAMI DANGEROUS AT THE UKRAINIAN BLACK SEA COAST

In the present work the forecasting of tsunami heights for Ukrainian Coast of the Black Sea is discussed. The numerical simulation of the prognostic events (55) which sources are distributed uniformly in a basin of the Black Sea is performed. Their results are compared with results of the numerical simulations of the historic events (1939 and 1966) and data of tsunami observations. It is used to predict possible tsunami wave heights along the Ukrainian coast of the Black Sea.

Key words: tsunami, numerical modeling, Black sea.

УДК 532.5

С.В. Семин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ БАРОКЛИННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ БАССЕЙНАХ МЕТОДАМИ ПОЛНОНЕЛИНЕЙНОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрена полнонелинейная численная модель MITgcm. На ее основе проведено моделирование эволюции наклонного пикноклина, показана значимость учета рельефа дна при анализе бароклинных волновых процессов. Проведено моделирование локализованного импульсного возмущения, заданного на основе солитона слабонелинейной теории волн. Численно продемонстрирован закон спада амплитуда в результате цилиндрической расходимости солитоноподобного возмущения.

Ключевые слова: численное моделирование, внутренние волны, солитон, цилиндрическая расходимость.

Введение

Даже небольшой плотностной неоднородности водной среды достаточно, чтобы стимулировать образование внутренних волн. Их формы в мировом океане весьма разнообразны. Длинные и низкочастотные волны, как правило, имеют квазисинусоидальный характер и редко встречаются в шельфовой зоне. Короткопериодные внутренние волны зачастую имеют форму значительно отличающуюся от синусоидальной. В большинстве своем они появляются в шельфовой зоне и существуют в виде уединенных стационарных волн – солитонов и групп солитонов, а так же осциллирующих волновых пакетов – бризеров. Данные виды волн могут распространяться на большие расстояния без потери энергии и без изменения своей формы. В результате того, что изменения плотности в водной среде, как правило, небольшие, перемещение частиц между слоями не требует значительных затрат энергии, потому внутренние волны могут иметь большую амплитуду. Аномально большие внутренние волны представляют большую опасность для человеческой деятельности на шельфе. Именно изучению солитоноподобных волновых структур посвящена данная работа.

В определенных условиях внутренние волны активно влияют на процессы переноса грунта, взвесей, загрязнений, на процессы трансформации донных поверхностей, на продуктивность планктона, подводную и надводную навигацию (явление «мертвой воды»). Невооруженным взглядом видно, что все это может оказать пагубный эффект на такие виды человеческой деятельности, как транспортные перевозки, шельфовое строительство, рыбный промысел. Потому изучение явлений внутренних волн является актуально и практически значимо задачей.

Анализ влияния внутриволновых процессов различных режимов и природы в рамках выбранной акватории – это отнюдь не тривиальная задача, для решения которой требуется мощнейший математический и вычислительный потенциал. Стремительное развитие современных компьютерных технологий и теории численных методов позволяет решать ряд подобных проблем, составлять прогнозы последствий относительно сценария развития большого спектра океанических явлений. Появление мощных вычислительных комплексов и адаптированных к ним сложных математических моделей помогает приоткрыть завесу тайны и заглянуть глубже в недры мирового океана, лучше понять природу происходящих в нем процессов.

Одним из способов изучения таких процессов может служить численное моделирование, то есть прямое численное решение уравнений гидродинамики, реализованное при помощи выбранного языка программирования. В настоящее время существует ряд реализаций численных алгоритмов, позволяющих моделировать как гидродинамические, так и атмосферные явления в различных ситуациях. В основном все они отличаются территориальной

ориентированностью, вследствие чего основываются практически на одних и тех же уравнениях гидродинамики, но, как правило, с различными ограничениями и приближениями, поэтому могут описывать различные классы процессов.

Одной из таких реализаций является вычислительный комплекс, основанный на модели профессора университета Ватерлоо (Канада) К.Г. Лэмба [1], позволяющий рассчитывать динамику внутренних гравитационных волн при помощи двумерных уравнений гидродинамики несжимаемой стратифицированной жидкости в приближении Буссинеска с учетом силы Кориолиса. Данная система хорошо изучена сотрудниками нашей лаборатории, с ее использованием проведено большое число экспериментов и выпущено множество публикаций [2, 3, 4, 5, 6, 7]. Однако этот комплекс имеет большой недостаток, отсутствие третьего измерения, потому непригоден для расчета гидродинамических процессов в реальной выбранной акватории.

Другим вариантом может служить система ROMS (Regional Ocean Modeling System) [8,9,10], в основе которой лежат гидростатические примитивные уравнения для расчета океанических процессов. Стоит уточнить, что вообще говоря, эта система состоит из трех моделей: океанической, атмосферной и волновой. Это позволяет ей описывать эффекты от взаимодействия процессов в различных средах. Однако такое усложнение модели привело к сильному увеличению расчетного времени и заставило разработчиков упростить математическую модель. В результате гидростатическое приближение уравнений гидродинамики не позволяет точно описывать поведение внутренних волн, потому данная модель непригодна для достижения целей этой работы. Кроме того отсутствие полной и хорошо структурированной документации усложняет процесс исследований.

В результате наш выбор пал на глобальную модель циркуляции, созданную в Массачусетском Технологическом Институте – MITgcm (Massachusetts Institute of Technology global circulation model) [11,12,13]. Океаническая ее часть основывается на уравнениях гидродинамики трехмерной несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска с учетом ускорения Кориолиса. Однако в отличие от ROMS, MITgcm позволяет учитывать негидростатические процессы, то есть в данном случае эволюция вертикального потока напрямую зависит от диффузионных, вязкостных и адвективных свойств жидкости, что предоставляет возможности для более точного описание динамики внутренних волн.

В основе системы MITgcm лежит грамотно спроектированное вычислительное ядро. Оно позволяет запускать расчеты, как в однопроцессорном режиме, так и распределенно (в *mp*-режиме или при помощи кластера). И наконец, отличная документированность теоретических основ и архитектурных особенностей системы выгодно отличают MITgcm от других рассмотренных комплексов.

Целью данной работы является демонстрация возможностей программного комплекса MITgcm по моделированию полнонелинейных внутрижидкостных бароклинных возмущений, моделирование двумерных и трехмерных случаев распространения изолированных интенсивных внутренних волн в рамках данной модели. Для корректного формирования начальных возмущений гидродинамических полей представляется целесообразным обратиться к аппарату слабонелинейной теории волн. Одним из классов решений уравнения Гарднера (которое наиболее часто используется для описания нелинейно-дисперсионных эффектов в динамике слабонелинейных внутренних волн) являются солитоны, или уединенные волны, которые распространяются без изменения формы и упруго взаимодействуют между собой и с внешним волновым полем. На их основе можно задать начальное распределение плотности и поля скоростей. Эти начальные возмущения будут являться прообразами полнонелинейных локализованных неизлучающих возмущений большой амплитуды, свойства и характеристики которых представляют значительный интерес в механике жидкости.

В закрытых бассейнах, особенно небольшой площади, стратификация обычно обусловлена термической неоднородностью, так как вода в таких водоемах в большинстве случаев пресная. И в этом случае так же могут иметь место процессы распространения внутрен-

них волн. Поскольку для таких акваторий энергия в основном поступает через поверхность за счет ветровых, сгонно-нагонных явлений, то появление внутренних волн обусловлено эволюцией отклоненного пикноклина. Какой волновой режим при этом устанавливается и как в этом случае влияет рельеф дна? Последующие эксперименты помогут выяснить это.

И наконец, трехмерное моделирование представляет наибольший интерес, так как является наиболее приближенным к реальным случаям. С использованием MITgcm было проведено несколько экспериментов по распространению цилиндрического возмущения с целью проанализировать закон спадания амплитуды для цилиндрически расходящейся солитонной волны.

Основные уравнения

В основе океанической модели программного комплекса MITgcm лежит система уравнений Навье-Стокса с приближением Бассинеска (1)–(7).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{D\vec{v}}{Dt} + \frac{1}{\rho_0} (\nabla_h p_S + \nabla_h p_{HY} + e_{NH} \nabla_h p_{NH}) = G_{\vec{v}}, \quad (1) \\ \frac{\partial p_{HY}}{\partial r} = -b, \quad (2) \\ e_{NH} \frac{Dw}{Dt} + \frac{\partial p_{NH}}{\partial r} = G_w, \quad (3) \\ \nabla_h \vec{v} + \frac{\partial w}{\partial r} = 0, \quad (4) \\ b = b(\Theta, S, r), \quad (5) \\ \frac{D\Theta}{Dt} = Q_{\Theta}, \quad (6) \\ \frac{DS}{Dt} = Q_S. \quad (7) \end{array} \right.$$

где \vec{v} - вектор горизонтальной составляющей скорости, ρ_0 - характерная плотность, p_S - давление на поверхности жидкости, p_{HY} - гидростатическое давление, p_{NH} - негидростатическое давление, w - вертикальная составляющая скорости, e_{NH} - коэффициент негидростатичности (равен единице, когда учитываются негидростатическое давление), b - плавучесть, Θ - температура, S - соленость.

В случае решения примитивных уравнений негидростатическое давление не учитывается, а вертикальная составляющая скорости рассчитывается как интеграл от дивергенции горизонтального вектора скорости. В дальнейших расчетах использовался негидростатический режим, когда давление представлено тремя слагаемыми в (1), а в правой части уравнений учитываются все слагаемые (8)-(12):

$$G_u = -\vec{V} \cdot \nabla u - \left\{ \frac{ur}{r} - \frac{uv \tan(\varphi)}{r} \right\} - \left\{ -2\Omega v \sin(\varphi) + \underline{2\Omega \dot{r} \cos(\varphi)} \right\} + A_h \nabla^2 u + A_4 \nabla^4 u + F_u \quad (8)$$

$$G_v = -\vec{V} \cdot \nabla v - \left\{ \frac{vr}{r} - \frac{u^2 \tan(\varphi)}{r} \right\} - \left\{ -2\Omega u \sin(\varphi) \right\} + A_h \nabla^2 v + A_4 \nabla^4 v + F_v \quad (9)$$

$$G_w = -\underline{\vec{V} \cdot \nabla w} + \left\{ \frac{u^2 + v^2}{r} \right\} + \underline{2\Omega u \cos(\varphi)} + A_v \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \underline{F_w} \quad (10)$$

$$Q_{\Theta} = \nabla \cdot [K \nabla \Theta] - \Theta \nabla \cdot \vec{V} + F_{\Theta} \quad (11)$$

$$Q_S = \nabla[K\nabla S] - S\nabla \cdot \vec{V} + F_S \quad (12)$$

где Ω - угловая скорость вращения Земли, A_h - коэффициент горизонтальной вязкости, A_v - коэффициент вертикальной вязкости, A_4 - бигармонический коэффициент вязкости, K - тензор диффузии (диагональная матрица коэффициента диффузии), F_i - внешнее воздействие соответствующей величины i . Так же здесь слагаемые подчеркнутые одной линией используются в квазигидростатическом режиме, в случае негидростатики они дополняются слагаемыми, подчеркнутыми дважды.

В последующих расчетах были использованы следующие приближения касательно описанных ранее уравнений: режим негидростатики включен, диффузия и вязкость отсутствуют, на поверхности условие твердой крышки, границы твердые, внешнее воздействие отсутствует.

Эксперимент с отклоненным пикноклином

Далее будут рассмотрены два случая распространения внутренних волн, сгенерированных в результате эволюции отклоненного пикноклина в двумерной области. В первом случае дно ровное (рис. 1, а), а во втором имеет параболический рельеф (рис. 1, б).

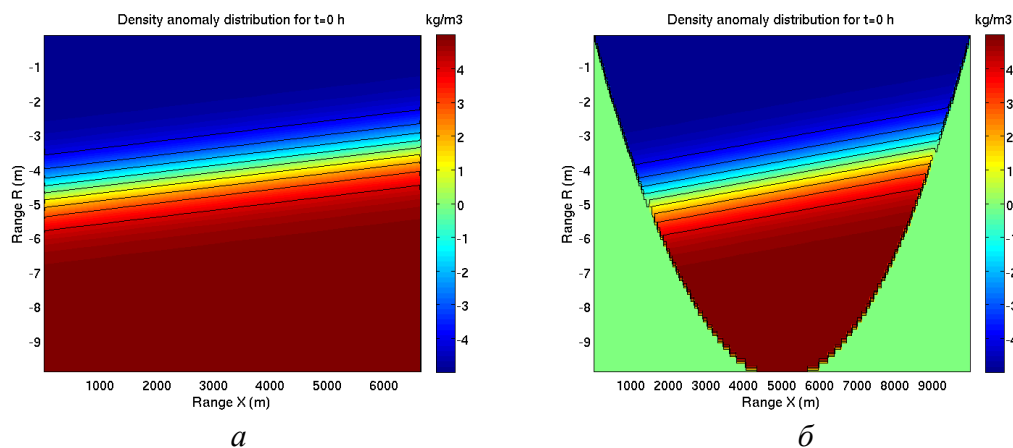


Рис. 1. Начальное распределение плотности:
а – эксперимент с ровным дном; б – параболическое дно

Начальное распределение плотности задавалось по формуле:

$$\rho(x, z) = \rho_0 d_\rho \cdot \tanh\left(\frac{(z - ax - z_{pyc})}{d_{pyc}}\right), \quad (13)$$

где ρ_0 - характерное значение плотности для выбранной области, d_ρ - коэффициент аномалии плотности, z - вертикальная координата, x - горизонтальная координата, a - коэффициент наклона пикноклина, z_{pyc} - глубина залегания пикноклина, d_{pyc} - ширина пикноклина. Для последующих экспериментов коэффициенты имели следующие значения: $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $d_\rho = 0,005$, $a = 0,0002$, $z_{pyc} = 4,7 \text{ м}$, $d_{pyc} = 1 \text{ м}$.

Расчетное время для каждого эксперимента составляло 50 часов с шагом по времени в 5 секунд. Размеры области задавались таким образом, чтобы объем жидкости в обоих случаях был одинаковым, таким образом, область с ровным дном задавалась $6667 \times 10 \text{ м}$, а область с параболическим дном – $10000 \times 10 \text{ м}$. Пространственная дискретизация для обоих экспериментов совпадала: 500×500 точек. Поэтому шаги по горизонтальной оси были разные: 13.3 м для случая ровного дна и 20 м - для параболического; шаги по вертикальной координате в обоих экспериментах одинаковы.

Результаты моделирования можно видеть на рис. 2 и рис. 3, на которых представлена эволюция пикноклина и образование внутренних волн для эксперимента с ровным дном и с параболическим соответственно.

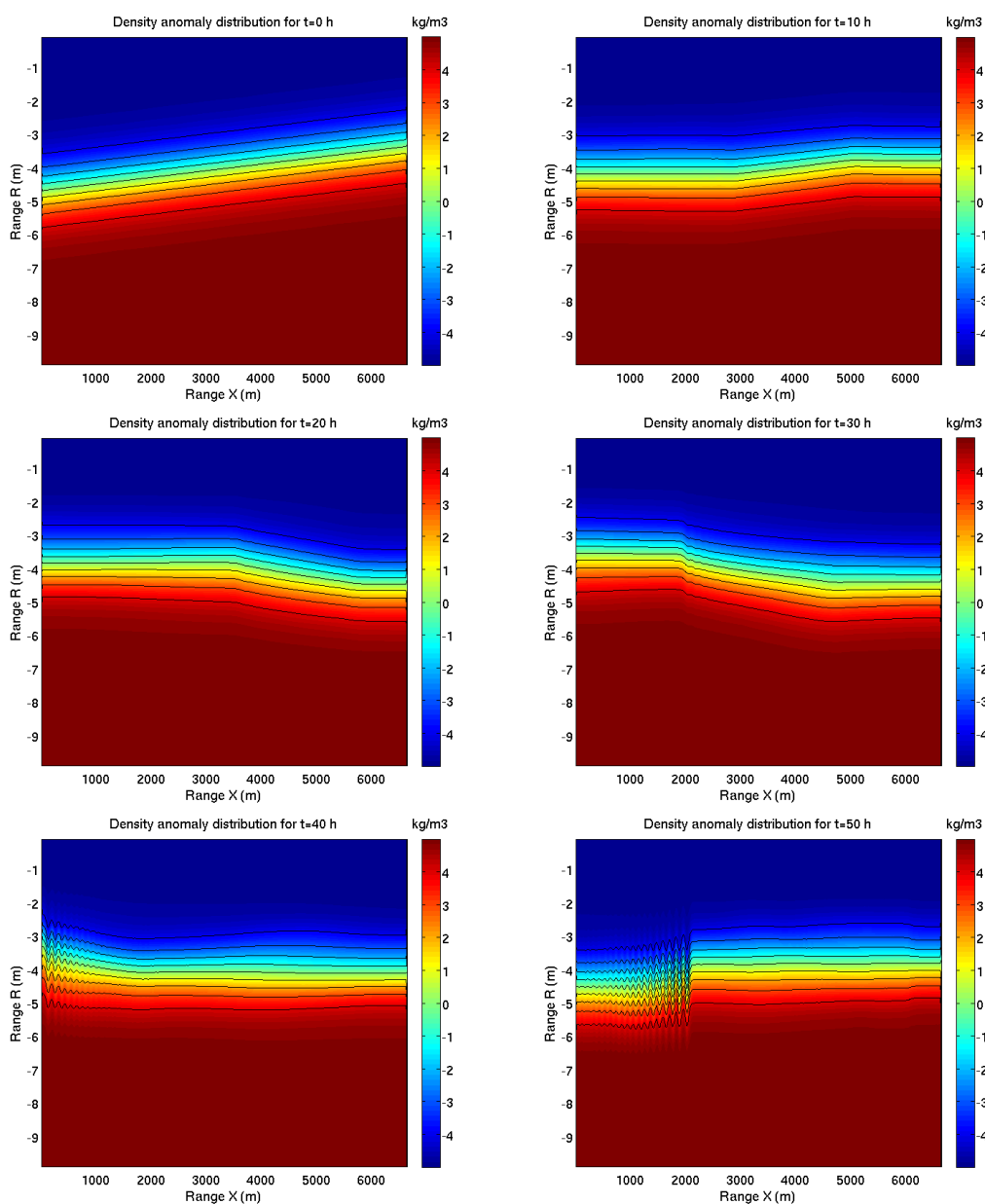


Рис. 2. Эволюция поля плотности для эксперимента с ровным дном

На рис. 2 видно, что различные части металимниона смещаются практически параллельно, что свидетельствует об одномодовом характере волнения, очевидно представляющем низшую – первую бароклинную моду. Так же на фоне длинноволновой внутренней сейши видно нелинейное образование – внутренний бор и его последующая трансформация в солибор, т.е. рождение цепочки внутренних солитонов на переднем крае бора.

В случае с параболическим дном процесс имеет явно многомодовый характер, и характеризуется по большей части высшими модами колебательных процессов.

Невооруженным взглядом видно качественное отличие результатов моделирования распространения полнонелинейных возмущений над ровным и параболическим дном. Если в первом случае процесс распространения внутренних волн имеет явно выраженный одномодовый характер, то во втором распространяются возмущения по большей части высших мод.

Это говорит о необходимости учета рельефа донной поверхности как важного фактора при моделировании волновой динамики в замкнутых водоемах.

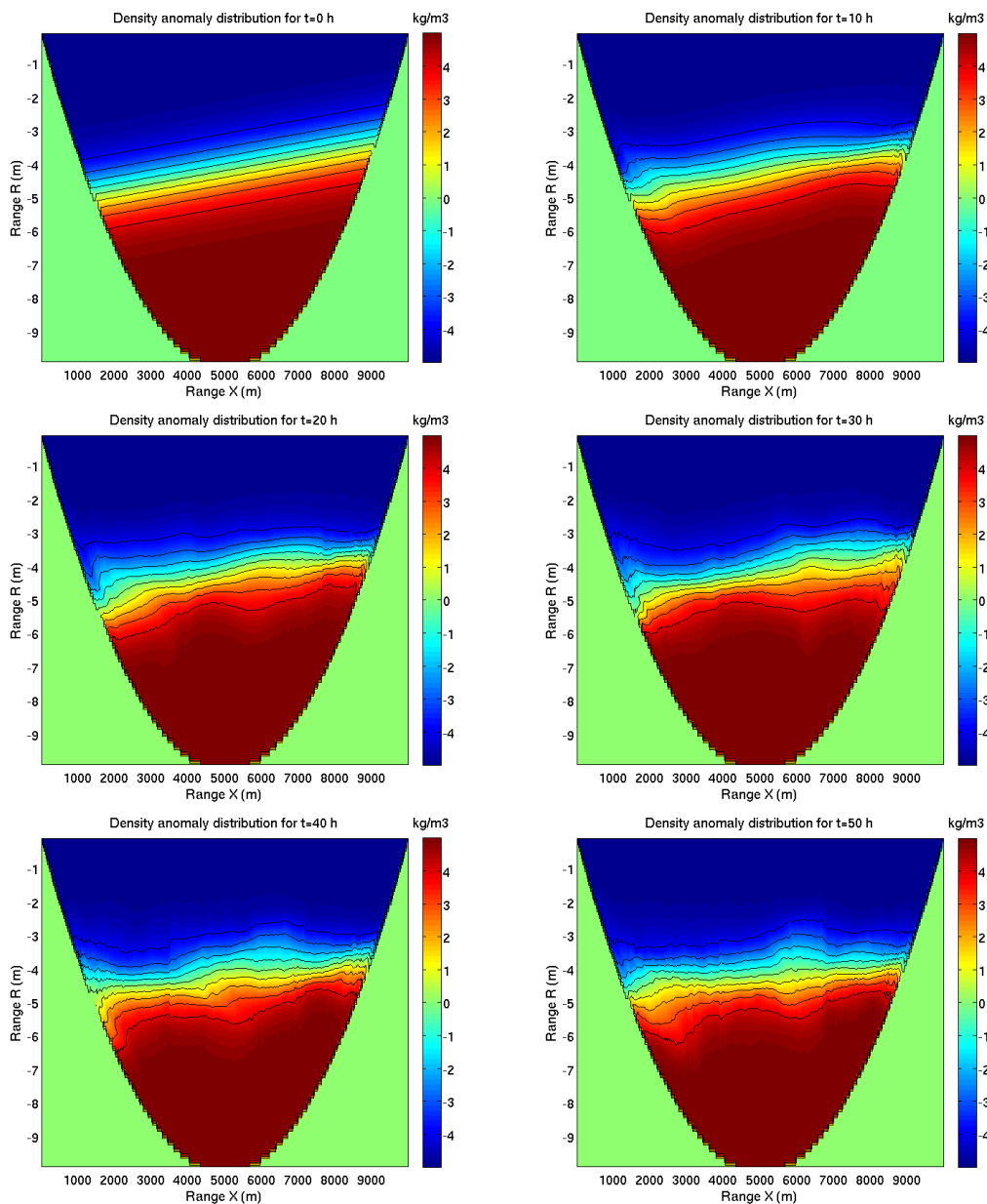


Рис. 3. Эволюция плотности для эксперимента с параболическим дном

Эксперимент с распространением локализованного начального возмущения вида солитон

Далее будет рассмотрено так же два случая распространения внутренних волн в двумерной области. В обоих случаях начальное распределение плотности и скоростей задавалось на основе слабонелинейной теории волн [14], отличались эксперименты параметрами начального возмущения и полем скорости.

Распределение плотности (рис. 4) задавалось по формуле:

$$\rho(x, z) = \rho_0 \cdot d_p \cdot \tanh\left(\frac{(z - \eta(x, z) - z_{pyc})}{d_{pyc}}\right), \quad (14)$$

где $\eta(x, z) = F(x) \cdot \Phi(z)$, $F(x)$ - горизонтальная структура - солитон уравнения Гарднера с известными параметрами:

$$F(x) = \frac{A}{1 + B \operatorname{ch}(\gamma x)}, \quad (15)$$

$$A = \frac{(B^2 - 1) \cdot \alpha}{\alpha_1}, \quad (16)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{(B^2 - 1)\alpha^2}{6\alpha_1\beta}}, \quad (17)$$

где B - свободный параметр, определяющий форму солитона (этим параметром и отличались приведенные эксперименты), остальные параметры принимали значения: $z_{\text{pyc}} = -30$ м,

$$d_{\text{pyc}} = 4 \text{ м}, \quad d_p = 0,005, \quad c = 1,8544 \text{ м/с}, \quad \beta = 731,5959 \text{ м}^3/\text{с}, \quad \alpha = -0,052069 \frac{1}{\text{с}},$$

$$\alpha_1 = -2,4859 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{м} \cdot \text{с}}.$$

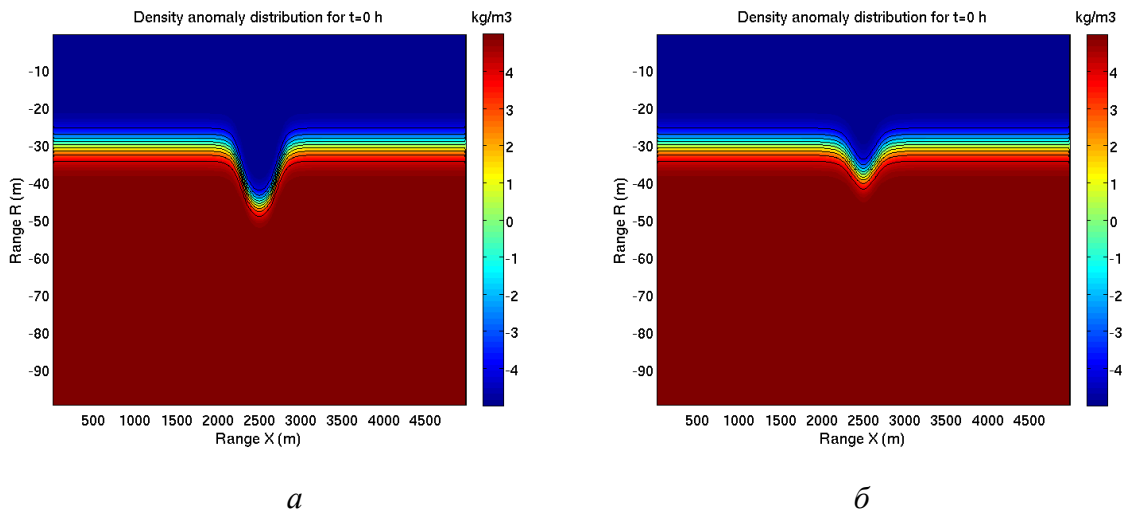


Рис. 4. Начальное распределение плотности:
 а – солитон с параметром $B = 0,1$; б – $B = 0,6$

Начальное поле горизонтальной скорости определялось по формуле:

$$u(x, z) = cF(x) \frac{d\Phi}{dz}. \quad (18)$$

Вертикальная составляющая высчитывалась средствами модели MITgcm согласно выбранному режиму моделирования (гидростатический, квази-гидростатический, негидростатический).

Поскольку в обоих случаях возникает множество высокочастотных возмущений, то в качестве результатов моделирования будет нагляднее представить $x-t$ диаграммы распространения начального возмущений. На рис. 5 и рис. 6 изображены эти диаграммы для изопикн, залегающих на 28-, 30- и 32-метровой глубине.

В обоих случаях область имела размеры 5000×100 м, расчетное время составляло 6 часов с шагом по времени 0.5 с, пространственная дискретизация 500×100 шагов. Таким образом, шаг по горизонтальной оси – 10 м, а по вертикальной оси – 1 м.

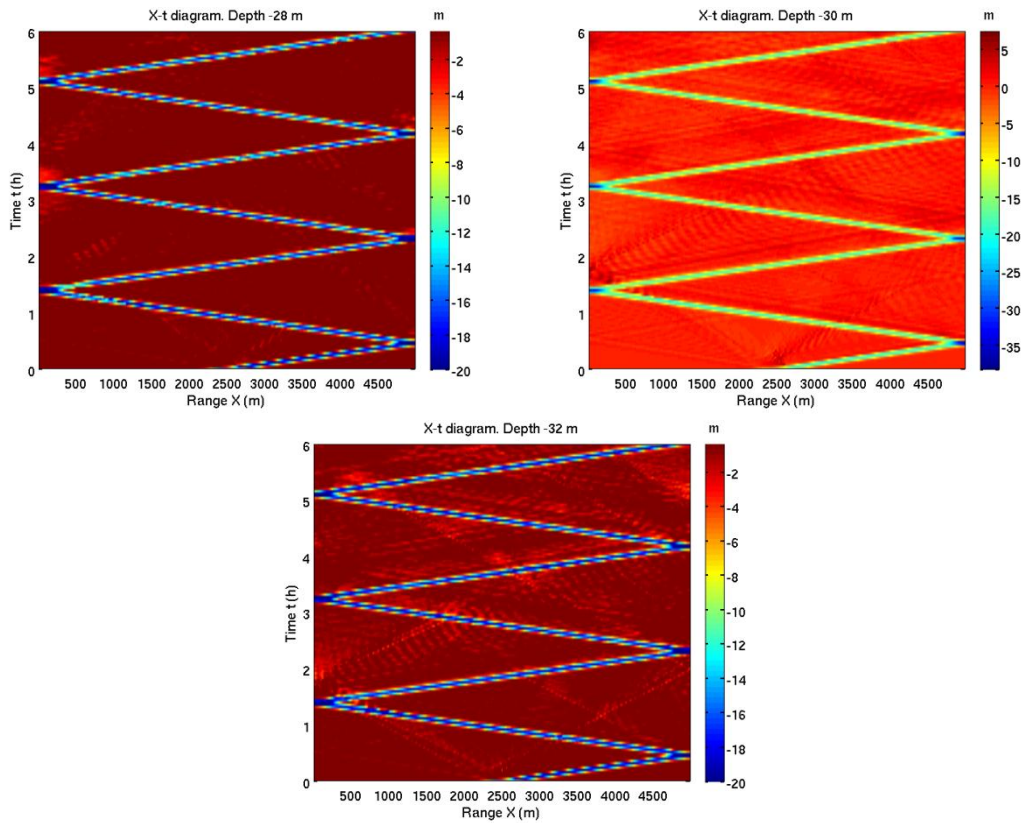


Рис. 5. $X-t$ диаграммы эволюции изопикнических поверхностей на глубине 28, 30 и 32 м для начального возмущения с параметром $B = 0,1$

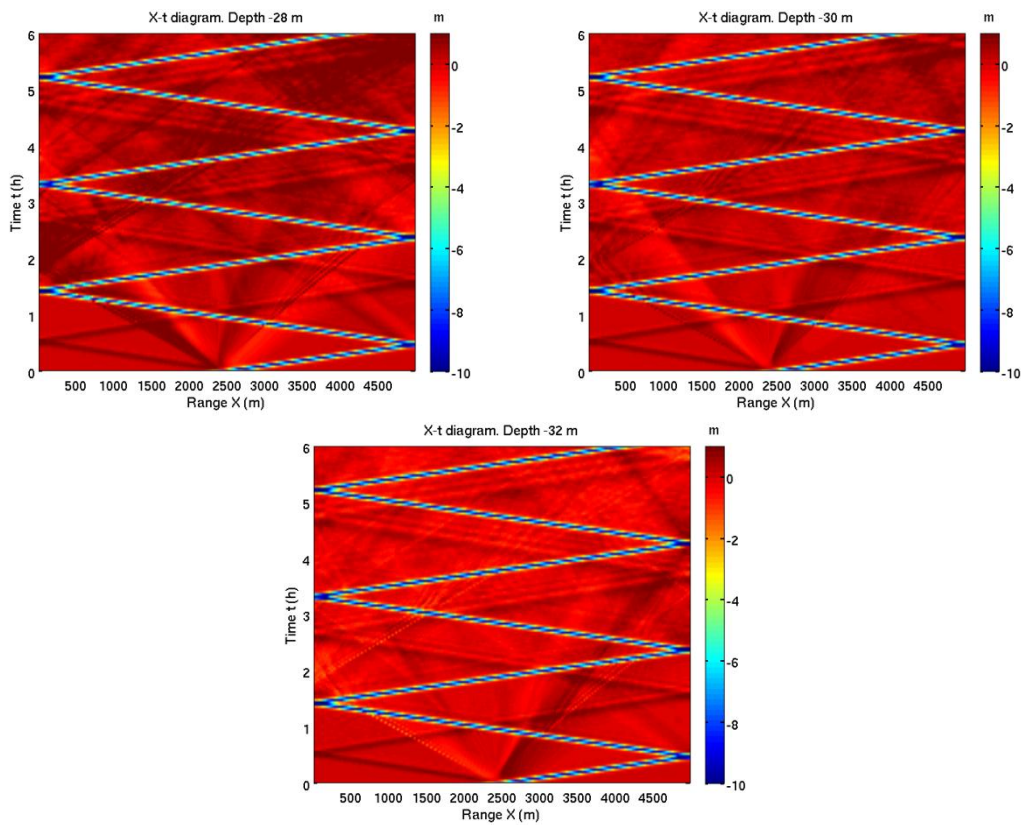


Рис. 6. $X-t$ диаграммы эволюции изопикнических поверхностей на глубине 28, 30 и 32 м для начального возмущения с параметром $B = 0,6$

Как видно из $x-t$ диаграмм в обоих случаях распространяется полнонелинейный солитон первой моды, хотя в начальный момент времени задавалось слабонелинейное возмущение. Так же наблюдаются и высшие бароклинные моды, особенно отчетливо это видно для эксперимента с параметром $B = 0,1$, где возникает больше возмущений, чем в случае с более слабой нелинейностью начального возмущения при $B = 0,6$.

Эксперимент с цилиндрической расходимостью солитоноподобной волны

Далее будут рассмотрены два эксперимента, отличающиеся начальным распределением скорости, а так же параметром B для возмущения пикноклина в поле плотности. Начальные данные взяты на основе теории рассмотренной в случае распространения двумерного полнонелинейного солитона. В последующих экспериментах начальное распределение плотности и скоростей взято из предыдущего примера и радиально продолжено на третью координату.

На рис. 6 представлен пикноклин, залегающий на 29-метровой глубине в случае распространения возмущения с параметром $B = 0,1$ и $B = 0,6$.

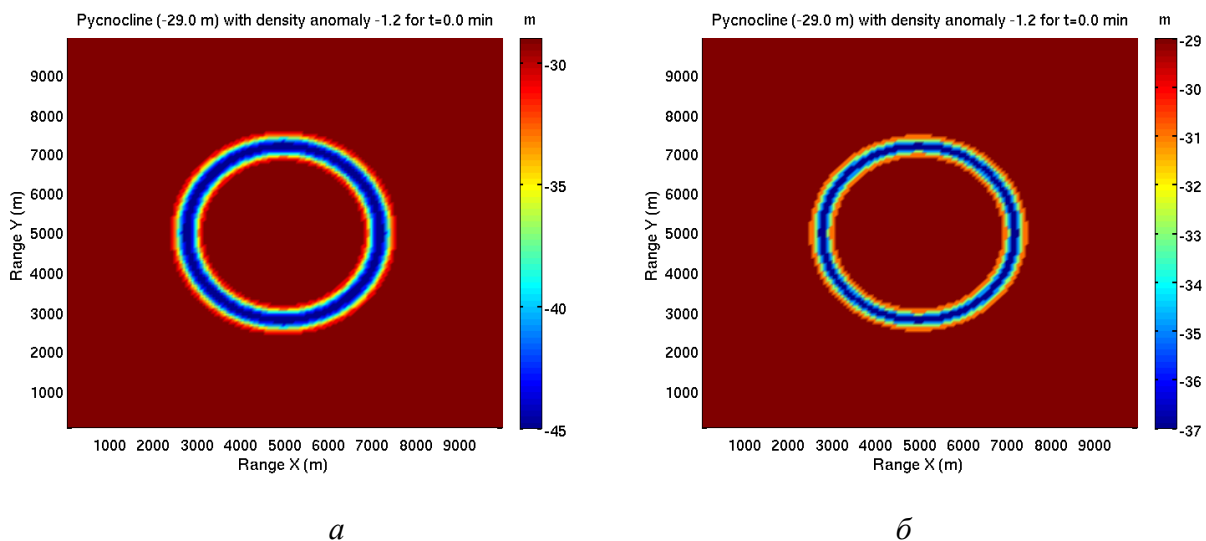


Рис. 7. Начальное состояние изопикнической поверхности, залегающего на 29 метровой глубине:

a – солитон с параметром $B = 0,1$; *б* – $B = 0,6$

Наличие третьего измерения сильно замедляет расчеты, поэтому решено было уменьшить дискретизацию расчетной области до следующих параметров: $150 \times 150 \times 50$ точек, сама же расчетная область в этом случае имела размеры: $10000 \times 10000 \times 100$ м. Однако в результате такого изменения стало невозможно отслеживать положение центральной изопикны, где плотностная аномалия равна нулю, потому далее будут представлены рисунки для изопикн, залегающих на 29- и 31-метровой глубине.

В рамках данных экспериментах не рассматривались процессы отражения от границ, потому расчетное время задавалось таким образом, что возмущения не успевало их касаться. В данном случае $T = 48$ минут с шагом в 0,5 с.

По аналогии с предыдущими экспериментальными результирующими здесь будут рисунки с $r-t$ диаграммами, этого будет достаточно, так как распространение возмущений в описанных экспериментах – радиально-симметричное.

Как видно из представленных рис. 8 и рис. 9, амплитуда солитона при распространении спадает как для случая с параметром $B = 0,1$, так и для $B = 0,6$.

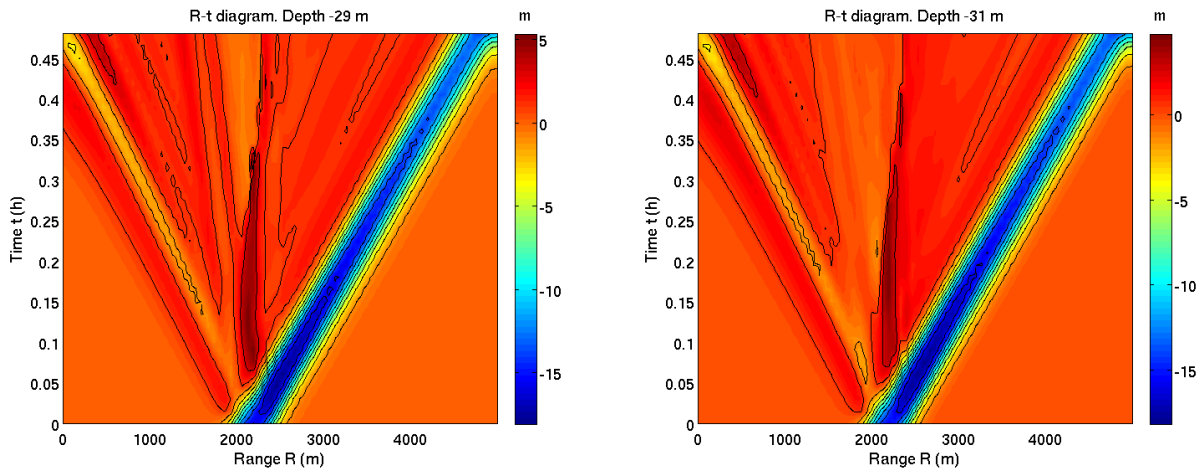


Рис. 8. $R-t$ диаграммы эволюции изопикнических поверхностей на глубине 29 и 31 м для начального возмущения с параметром $B = 0.1$ в трехмерном случае

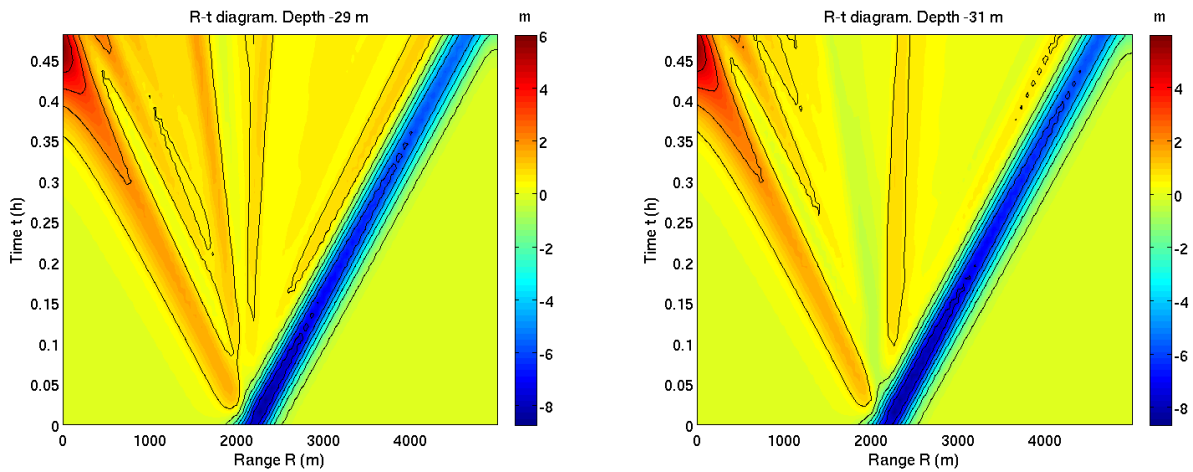


Рис. 9. $R-t$ диаграммы эволюции изопикнических поверхностей на глубине 29 и 31 м для начального возмущения с параметром $B = 0.6$ в трехмерном случае

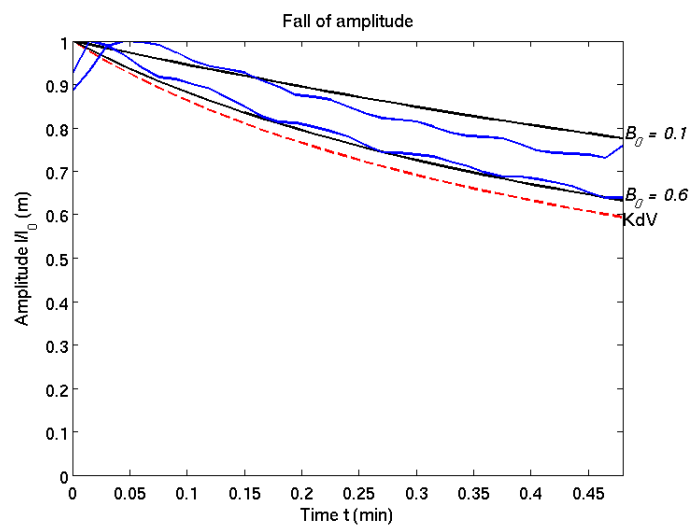


Рис. 10. Законы спадания амплитуды, полученные аналитически и численно

В работе [15] теоретически и численно проанализированы трансформация цилиндрических уединенных волн в рамках уравнения Гарднера, а так же определены зависимости

амплитуд солитонов от лучевой координаты для различных сочетаний внешних параметров. На рис. 10 эти зависимости представлены черными линиями, а полученные в рассмотренных экспериментах численные данные на основе полнонелинейной модели MITgcm – синими.

Как видно из графиков рис. 10 в начале расчетов происходит адаптация полей начального возмущения и формирование полнелинейной локализованной структуры. Для возмущения $B = 0,6$ из-за меньшей амплитуды начального поля на рис. 10 видно неплохое согласие результатов аналитических слабонелинейных и численных полнонелинейных расчетов, тогда как для возмущения большей амплитуды (с $B = 0,1$) различия более заметны.

Выводы

В рамках данной работы продемонстрировано применение полнонелинейной численной модели к моделированию интенсивных внутренних гравитационных волн, на примере ряда двумерных и трехмерных расчетов. Первый эксперимент касался моделирования эволюции отклоненного пикноклина, в результате чего появлялись внутренние волны различных мод. В данном случае продемонстрированы качественные отличия в результатах распространения возмущений над ровным и параболическим дном, что свидетельствует о необходимости учета рельефа донной поверхности при описании таких процессов.

Во втором эксперименте показан пример динамики локализованного начального возмущения и формирование полнонелинейного солитоноподобного импульса в рамках полнонелинейной численной модели MITgcm, причем начальные данные были взяты на основе слабонелинейной теории волн (односолитонное решение уравнения Гарднера).

И наконец, в третьем эксперименте проведено трехмерное численное моделирование цилиндрической расходимости начального импульсного возмущения. Показан численный закон спада амплитуды цилиндрического солитоноподобного импульса.

Библиографический список

1. **Чернов, А.Г.** Динамика внутренних гравитационных волн в трехслойной среде / А.Г. Чернов, О.Е. Полухина, А.А. Куркин // Двенадцатая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых («ВНКСФ – 12», Новосибирск): материалы конф. / Новосиб. гос. ун-т, 2006. С. 624.
2. **Чернов, А.Г.** Исследование динамики внутренних волн в трехслойной жидкости / А.Г. Чернов, О.Е. Полухина, А.А. Куркин // XI нижегородская сессия молодых ученых. Естественно-научные дисциплины: материалы конф. – Н. Новгород: Изд-во Гладкова О.В., 2006. С. 11.
3. **Chernov, A.G.** Dynamics of two-dimensional long internal gravity waves in a three-layer fluid / A.G. Chernov, O.E. Poloukhina, A.A. Kurkin // Advanced Problems in Mechanics: book of Abstracts. XXXIII Summer School – Conference. St. Petersburg. 2006. P. 26.
4. **Чернов, А.Г.** Нелинейная динамика длинных внутренних волн / А.Г. Чернов [и др.] // Тринадцатая Всероссийская научной конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-13, Ростов-на-Дону, Таганрог): материалы конф. / Екатеринбург-Ростов-на-Дону-Таганрог: Изд-во АСФ России. 2007. Т. 1. С 548–550.
5. **Bezruk, I.V.** Large amplitude long nonlinear internal gravity waves in stratified basins: models and dynamics / I.V. Bezruk [at al.] // EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 15-20, 2007. Geophysical research abstracts. V. 9. EGU07-A-05326, European Geosciences Union 2007.
6. **Chernov, A.G.** Nonlinear dynamics of internal gravity waves in a three-layer fluid / A.G. Chernov, I.V. Bezruk, O.E. Polukhina // EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 15-20, 2007. Geophysical research abstracts. V. 9. EGU07-A-05321, European Geosciences Union 2007.
7. **Езерский, А.Б.** Динамика солитонов возбуждаемых в резонаторах на поверхности мелкой воды / А.Б. Езерский [и др.] // Прикладная нелинейная динамика. 2004. Т. 1-2. №1-2. С. 138–158.
8. **Haidvogel, D.B.** Numerical Ocean Circulation Modeling / D.B. Haidvogel, A. Beckmann // Numerical Ocean Circulation Modeling. 1999. P. 318.
9. **Song, Y.T.** A general pressure gradient formulation for ocean models. Part I: Scheme design and diagnostic analysis // Monthly Weather Review (MWR), 1998. P. 3213–3230.

10. **Song, Y.T.** A general pressure gradient formulation for ocean models. Part II: Energy, momentum and bottom torque consistency / Y.T. Song, D.G. Wright // Monthly Weather Review (MWR). 1998. P. 3231–3247.
11. **Adcroft, A.** Overview of the formulation and numerics of the MITgcm / A. Adcroft [et al.] // Proceedings of the ECMWF seminar series on Numerical Methods, Recent developments in numerical methods for atmosphere and ocean modeling. 2004. P. 139–149.
12. **Adcroft, A.** Numerical algorithms for use in a dynamical model of the ocean / Ph.D dissertation, 1995.
13. **Hill, C.** Application of a parallel navier-stokes model to ocean circulation in parallel computational fluid dynamics / C. Hill, J. Marshal // Implementations and Results Using Parallel Computers, 1995. P. 545–552.
14. **Езерский, А.Б.** Возбуждение солитонов внутренних волн в резонаторах / А.Б. Езерский, О.Е. Полухина, Е.Н. Пелиновский // Изв. АИН РФ. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 6. С. 90–97.
15. **Полухина, О.Е.** Цилиндрическая расходимость уединенных волн в рамках обобщенного уравнения Гарднера / О.Е. Полухина, Н.М. Самарина // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2007. № 6 Т. 43. С. 818–825.

*Дата поступления
в редакцию 02.07.2011*

S.V. Semin

**TWO AND THREE DIMENSIONAL BAROCLINIC PERTURBATIONS
MODELING IN CLOSED STRATIFIED BASINS BY METHODS
OF FULLY NONLINEAR NUMERICAL MODEL**

In the present work fully nonlinear numerical model MITgcm considered. On its basis modeling of evolution tilting pycnocline spent, the importance of a relief of a bottom is proved at carrying out of similar experiments. Modeling of fully nonlinear soliton, set on a basis of weakly nonlinear theory of waves spent. The law of falling off amplitude as a result of solitons cylindrical divergence numerically proved.

Key words: numerical modeling, internal waves, soliton, cylindrical divergence.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.396.6

О.Б. Качалов, К.Ю. Плесовских, Н.П. Ямпурин

СИНТЕЗ УСТОЙЧИВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСХОДА НЕФТЕВОДОГАЗОВОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ РЕГРЕССИИ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексева

Предлагается метод снижения числа обусловленности матрицы данных для получения устойчивой модели расхода нефтеводогазового потока.

Ключевые слова: многокомпонентный поток, регрессионное уравнение, математическая модель, число обусловленности, устойчивая модель.

В нефтедобывающей промышленности, как ни в какой другой отрасли, без анализа расходных параметров технологических процессов невозможно управление практически ни одним процессом, будь то бурение или цементирование скважины, добыча или транспортировка нефти, нагнетание воды в системах поддержания пластового давления и т.п. Измерение расхода добываемых флюидов из нефтяного пласта служит не только основой для решения задач оптимизации процесса извлечения нефти, но и информационным средством для создания систем контроля за разработкой месторождения [1].

Большую роль измерение расхода играет и во вспомогательных технологических процессах – от бурения скважины до сдачи подготовленной нефти в трубопроводные транспортные системы.

Измерение расходных параметров всех компонент продукции нефтяной скважины является необходимым для решения двух важных задач:

- 1) оперативного контроля, в результате которого обнаруживаются внезапные и постепенные отказы в работе скважин и прискважинного оборудования;
- 2) контроля и регулирования разработки нефтяного месторождения [1].

Решение второй задачи предполагает и учет добываемой продукции, точность которого напрямую влияет на величину налоговой базы недропользователя. В связи с этим разработан, но до сих пор не введен в действие ГОСТ Р. 8.615- [2]. В ГОСТ Р. 8.615-2005 установлены пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений массы нефти и зависимости от содержания воды по отдельной скважине от 2,5 до 15%.

Существует несколько способов измерения расхода нефти, однако их применение затрудняется сложным составом извлекаемой нефти.

Нефть из скважин всегда поступает с газом, поэтому ее относят к двухфазным средам. Как правило, продукт, выходящий из нефтяных скважин, состоит не только из нефти и газа, но и сопутствующей им воды, т.е. является трехкомпонентным.

Решение этой проблемы осуществляется двумя путями.

Первый предполагает разделение потока на отдельные компоненты с последующим прямым измерением каждого компонента в отдельности. Такой подход дает наиболее точные результаты, но самый дорогостоящий, длительный во времени, требует установки специаль-

ного оборудования и потенциально небезопасен для экологии в силу возможной утечки нефти из измерительных установок (рис. 1, а).

Второй способ заключается в том, что поток беспрепятственно движется в нефтяной трубе, измерительная система (рис. 1, б) напрямую измеряет определенные параметры потока, а затем по полученным данным косвенным путем рассчитывает покомпонентный расход содержимого. Получение данных при этом возможно в режиме реального времени, замеры могут осуществляться бесконтактными способами, сохраняя при этом целостность трубопровода, что существенно снижает вероятность утечки нефти. Стоимость подобных измерительных систем значительно ниже, чем у сепарационных установок, применяемых в первом способе, но техническая реализация расчета расхода нефтеводогазового потока сама по себе при этом является сложной научно-технической задачей.



Рис. 1. Сепарационная установка (а) и измерительная система «Ультрафлоу» (б)

Дополнительные сложности в расчет вносит и тот факт, что структура двухфазного потока зависит от различных технологических, технических и других параметров: скорости потока, давления, диаметра трубопровода, его расположения в пространстве и процентного содержания той или другой фазы.

При успешном разделении калибровочных данных на отдельные режимы движения [3] потока, решение задачи сводится к построению многофакторной математической модели. И одним из способов построения при определенных условиях может являться нахождение уравнения регрессии.

Полученная модель при этом должна являться устойчивой, т.е. обеспечивать результаты расчетов, с отклонением от истинных значений в пределах диапазона, устанавливаемого ГОСТ Р. 8.615-2005.

Однако при построении математических моделей, основанных на уравнениях регрессии, возникает проблема мультиколлинеарности экспериментальных данных. Мультиколлинеарность проявляется в сильной корреляции между двумя или более признаками, что затрудняет оценивание параметров модели.

Мультиколлинеарность факторов является основной причиной того, что модель имеет значительные погрешности, а в некоторых случаях решаемая задача становится некорректно поставленной и требует специальных методов её решения.

Существует множество методик, позволяющих проверить устойчивость модели, но ни одна из них не является универсальной. Например, для проверки гипотезы об устойчивости результатов может быть использован критерий Уилкоксона, который служит для проверки

того, относятся ли две выборки к одной и той же генеральной совокупности, т. е. обладают ли они одним и тем же статистическим признаком [4].

Критерий применим в тех случаях, когда признаки измерены, по крайней мере, в порядковой шкале. Целесообразно применять данный критерий, когда величина самих сдвигов варьируется в некотором диапазоне (10-15% от их величины). Это объясняется тем, что разброс значений сдвигов должен быть таким, чтобы появлялась возможность их ранжирования. В случае если сдвиги незначительно отличаются между собой, и принимают какие-то конечные значения, например, +1, -1 и 0, формальных препятствий к применению критерия нет, но ввиду большого числа одинаковых рангов ранжирование утрачивает смысл, и те же результаты проще получить с помощью критерия знаков.

Суть метода состоит в том, что сопоставляются абсолютные величины выраженности сдвигов в том или ином направлении. Для этого сначала все абсолютные величины сдвигов ранжируются, а потом суммируются ранги. Если сдвиги в ту или иную сторону происходят случайно, то и суммы их рангов окажутся примерно равны. Если же интенсивность сдвигов в одну сторону больше, то сумма рангов абсолютных значений сдвигов в противоположную сторону будет значительно ниже, чем это могло бы быть при случайных изменениях.

Недостатки данного метода:

- малый объем выборки – от 5 до 50 элементов;
- нулевые сдвиги исключаются из рассмотрения;
- сдвиг в более часто встречающемся направлении принято считать «типичным» и наоборот [5].

Другим, менее известным способом, является оценка числа обусловленности cond матрицы плана эксперимента [6].

Число обусловленности является мерой чувствительности системы линейных уравнений к погрешностям задания вектора правых частей уравнений:

$$Ax = b, \quad (1)$$

где A – определяемая матрица данных; b – вектор правых частей уравнений; x – результат решения системы.

Число обусловленности вычисляется по формуле

$$\text{cond}(A) = \|A^{-1}\| \|A\|, \quad (2)$$

где $\|A\|$ - норма матрицы A ; $\|A^{-1}\|$ - норма обратной матрицы A .

Чем больше число обусловленности cond , тем сильнее это воздействие и тем более неустойчив процесс нахождения решения. Хотя число обусловленности матрицы зависит от выбора нормы, если матрица хорошо обусловлена, то её число обусловленности будет мало при любом выборе нормы, а если она плохо обусловлена, то её число обусловленности будет велико при любом выборе нормы.

В работе [6] показано, что устойчивая модель имеет число обусловленности cond порядка 1. При cond от 1 до 10 модель имеет хорошую устойчивость, а от 10 до 100 - удовлетворительную устойчивость. При cond больше 100 модель имеет неудовлетворительную устойчивость.

В работе С. Радченко, П. Бабича получена устойчивая модель (число обусловленности $\text{cond} = 1$) [7]. Однако метод ее получения не описан, что не позволяет применять его на практике. В данной работе авторами предлагается альтернативный способ приведения числа обусловленности к единице, на основе которого синтезирована устойчивая модель для расчета расходов нефтеводогазового потока. Приведение матрицы к числу обусловленности, равному единице, осуществляется в три этапа.

На первом этапе проводится нормировка данных по формуле

$$\bar{Z} = \frac{Z - Z_s}{\sigma},$$

где значение признака \bar{Z} – нормированное; Z_S – среднее; Z – абсолютное; σ – среднеквадратическое.

На втором этапе для нормированной матрицы строятся главные компоненты. Вычисление главных компонент сводится к вычислению собственных векторов и собственных значений ковариационной матрицы исходных данных. Соответствующие собственные числа этой матрицы равны дисперсиям проекций множества объектов на оси главных компонент.

Метод главных компонент осуществляет переход к новой системе координат y_1, \dots, y_p в исходном пространстве признаков x_1, \dots, x_p , которая является системой ортонормированных линейных комбинаций.

В основе модели для выражения исходных признаков через компоненты лежит предположение о том, что число компонент равно числу исходных признаков:

$$\begin{aligned} X_1 &= a_{11}F_1 + \dots + a_{1m}F_m \\ &\vdots \\ X_m &= a_{m1}F_1 + \dots + a_{mm}F_m. \end{aligned} \quad (2)$$

Компоненты F_1, \dots, F_m в модели (2) предполагаются независимыми стандартизованными показателями, распределенными по нормальному закону.

Очевидно, система уравнений (2) определяет здесь систему преобразования одних параметров в другие, поэтому каждое значение каждого исходного признака будет отображено в главных компонентах в соответствующей пропорции относительно других значений, определяемой весами $a_{11} - a_{mm}$.

Линейные комбинации выбираются таким образом, что среди всех возможных линейных нормированных комбинаций исходных признаков первая главная компонента $y_1(x)$ обладает наибольшей дисперсией. Геометрически это выглядит как ориентация новой координатной оси y_1 вдоль направления наибольшей вытянутости эллипсоида рассеивания объектов исследуемой выборки в пространстве признаков x_1, \dots, x_p .

Вторая главная компонента имеет наибольшую дисперсию среди всех оставшихся линейных преобразований, некоррелированных с первой главной компонентой. Она интерпретируется как направление наибольшей вытянутости эллипсоида рассеивания, перпендикулярное первой главной компоненте. Следующие главные компоненты определяются по аналогичной схеме [9, 10]. В результате формируется матрица, в которой дисперсия уменьшается с увеличением номера столбца.

На третьем этапе вновь проводится нормировка матрицы по указанной выше формуле, и в результате получается матрица с числом обусловленности равным единице.

Для того чтобы показать преимущества использования предложенного метода в практических расчетах, проведем сравнение ошибок моделей при изменении числа обусловленности. В расчетах использовались экспериментальные данные, полученные при калибровке прибора «Ультрафлоу» (табл. 1).

Таблица 1

Экспериментальные данные калибровки прибора «Ультрафлоу»

Дебит жидкости, м ³ /сут	Сдвиг Доплера	Обводненность, %	Газонасыщенность, доли	Давление, МПа	Температура жидкости, °С
1	2	3	4	5	6
10.10	9150.06	19.98	0.834	0.355	26.5
30.19	6503.24	10.15	0.869	0.401	25.3
30.30	7423.88	10.30	0.908	0.403	25.1
30.03	8335.41	10.05	0.930	0.450	25.1

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
10.14	6646.71	20.95	0.983	0.502	25.3
30.04	10016.51	10.20	0.952	0.502	25.2
30.27	11827.39	8.19	0.964	0.513	24.5
30.12	12711.44	10.14	0.971	0.571	25.1
30.21	12374.20	28.98	0.971	0.577	24.1
30.35	10509.01	28.73	0.963	0.539	24.6
30.01	8528.85	29.6	0.952	0.497	25.1
30.39	6906.47	29.19	0.929	0.451	24.9
30.32	6234.30	29.25	0.908	0.418	25.4
10.64	5153.51	28.46	0.966	0.417	24.7
30.43	8959.76	51.15	0.963	0.500	24.8
30.30	11408.7	51.48	0.971	0.592	24.5

Построим на основе одного и того же регрессионного уравнения две различных модели – для данных с числом обусловленности, приведенным к единице, указанным выше способом, и данных с большим числом обусловленности.

Исходное регрессионное уравнение имеет вид

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{13}x_1x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{33}x_3^2, \quad (3)$$

где y – расход жидкости; x_1 – доплеровский сдвиг частоты; x_2 – обводненность жидкости; x_3 – газонасыщенность жидкости; x_4 – абсолютное давление в интервале замера; x_5 – температура в интервале замера.

Изменение числа обусловленности матрицы плана эксперимента осуществляется за счет изменения объема обучающей выборки (числа используемых при обучении экспериментальных точек).

На основе регрессионного уравнения с помощью модели 1 ($\text{cond} = 1$) и модели 2 ($\text{cond} = 55,9$) были восстановлены значения расхода жидкости и проведено сравнение полученных значений с исходными. В табл. 2 приведены погрешности модели 1 и 2. Можно заметить, что погрешность второй модели существенно выше, чем у первой.

Таблица 2
Погрешности модели 1 ($\text{cond} = 1$) и модели 2 ($\text{cond} = 55,9$)

Модель 1, %	Модель 2, %
1	2
2,21	4,29
-0,72	0,01
-4,47	2,83
2,25	-7,59
0,22	1,23

Окончание табл. 2

1	2
-0,22	-4,24
-1,09	-9,7
-1,9	10,75
3,33	-6,55
2,25	-7,59
0,22	1,23
-0,72	0,01
-0,22	-4,24
-0,68	-0,91

Далее будем изменять число обусловленности матрицы исходных данных, по-прежнему приводя для первой модели матрицу к $\text{cond}=1$, а для второй - оставляя без изменения. Проследим, как увеличение числа обусловленности будет способствовать увеличению погрешности. В табл. 3 приведены отношения средних значений ошибок, среднеквадратических отклонений ошибок и максимальных абсолютных значений ошибок для моделей 1 и 2. Как видно из табл. 2 и 3 с увеличением числа обусловленности матрицы плана эксперимента ошибки регрессионной модели с $\text{cond} > 10$ существенно возрастают.

Таблица 3

Зависимость отношений ошибок от числа обусловленности cond

cond	Отношение средних значений ошибок	Отношение среднеквадратических отклонений ошибок	Отношение максимальных абсолютных значений ошибок
7,1	0,9	1,1	1,2
39,8	24,3	4,2	4,1
55,9	44,5	2,8	3,2
63,6	42,4	4,4	3,7
71,3	71,6	5,0	9,7

Таблица 4

Погрешность модели 1 при изменении числа обусловленности

cond	Средняя погрешность $e \cdot 10^3$	Среднеквадратическое отклонение ошибок σ	Максимальная погрешность $\max(e)$
39,8	0,49	0,0196	0,0346
58,0	0,37	0,0225	0,0374
99,6	0,52	0,0220	0,0396
405,8	0,45	0,0205	0,0376

Данные о погрешности модели 1 при изменении числа обусловленности исходных данных, приведенные в табл. 4, свидетельствуют о том, что модель 1 имеет практически

одинаковые погрешности при изменении cond от 39,8 до 405,8. Это указывает на то, что, даже имея исходные данные с большим числом обусловленности, можно добиться построения устойчивой регрессионной модели, если исходные данные подвергнуть обработке предложенным способом.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1) при числе обусловленности $\text{cond} > 10$ модели, основанные на регрессионных уравнениях, дают значительные погрешности;

2) устойчивая модель, в которой матрица плана эксперимента с большим числом обусловленности преобразуется в матрицу с числом обусловленности $\text{cond} = 1$, имеет допустимую погрешность. Эта модель рекомендуется для практического использования при расчетах расхода нефтегазового потока.

Библиографический список

1. **Абрамов, Г.С.** Практическая расходомерия в нефтяной промышленности / Г.С. Абрамов, А.В. Барычев. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2002. – 460 с.
2. ГСОЕИ. ГОСТ Р 8.615-2005. Измерение количества извлекаемой из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. – М.: Стандартинформ, 2005.
3. **Второва, И.А.** Обработка многомерного сигнала на основе метода главных компонент / И.А. Второва, О.Б. Качалов, К.Ю. Плесовских // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2010. №3(82). С. 21–26.
4. Вероятностные методы в инженерных задачах: справочник / А. Н. Лебедев [и др.]. – СПб.: Энергоатомиздат, 2000. – 333 с.
5. **Пригарин, С. М.** Методы численного моделирования случайных процессов и полей / С. М. Пригарин. – Новосибирск: Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2005. – 259 с.
6. **Дикусар, В.В.** Некоторые численные методы решения линейных алгебраических уравнений // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 9. С. 111–120.
7. **Радченко, С.Г.** Устойчивые методы оценивания статистических моделей / С.Г. Радченко. – Киев: ГШ «Санспарель», 2005. – 504 с.
8. **Радченко, С.Г.** Анализ экспериментальных данных на основе использования многофакторных статистических математических моделей // Математические машины и системы. 2005. № 3. С. 102–115.
9. **Сизиков, В. С.** Устойчивые методы обработки результатов измерений : учеб. пособие / В.С. Сизиков. – СПб.: СпецЛит, 1999. – 240 с.
10. **Дюк, В.А.** Компьютерная психодиагностика / В.А. Дюк. – СПб., 1994.
11. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.

Дата поступления
в редакцию 12.07.2011

O.B. Kachalov, K.Y. Plesovskikh, N.P. Yampurin

SYNTHESIS OF SUSTAINABLE MODELS FOR CALCULATION OF FLOW OIL FLOWS BASED ON THE REGRESSION EQUATION

The paper proposes a method to reduce the number of a matrix of data to obtain a stable oil-water flow model of flow.

Key words: multi-thread regression equation, the mathematical model, condition number, stable model.

УДК 004.272

А.А. Новокрещенов, В.П. Хранилов

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ЦИКЛОВ И ГЕНЕРАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ АРХИТЕКТУРЫ CUDA

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Сформулирована задача распараллеливающей трансляции последовательных вложенностей циклов. В рамках поставленной задачи предложены методы: распараллеливания циклов; учета особенностей организации процесса параллельных вычислений; генерации кода, если в качестве целевой архитектуры выступает nVidia CUDA.

Ключевые слова: автоматическое распараллеливание, вложенность циклов, генерация кода, CUDA.

Задача автоматической распараллеливающей трансляции последовательной программы представляет собой последовательность преобразований, которая приводит к построению параллельной формы исходной программы. Параллельная программа – это такая, результаты выполнения которой идентичны результатам выполнения исходной программы, эффективно использующая возможности целевой параллельной архитектуры и записанная на языке входной программы (возможно, с некоторыми языковыми расширениями, характерными для компилятора целевой архитектуры).

Такая постановка задачи трансляции актуальна. Это связано с тем, что поиск параллельности, скрытой в последовательной программе, и ее последующая адаптация для целевой параллельной архитектуры крайне затруднительны вручную. Использование одного языка как на входе, так и на выходе транслятора, избавляет от необходимости написания полноценного компилятора – для получения параллельного исполняемого кода можно воспользоваться уже существующим компилятором конкретной архитектуры. Схема предлагаемой процедуры трансляции представлена на рис. 1.

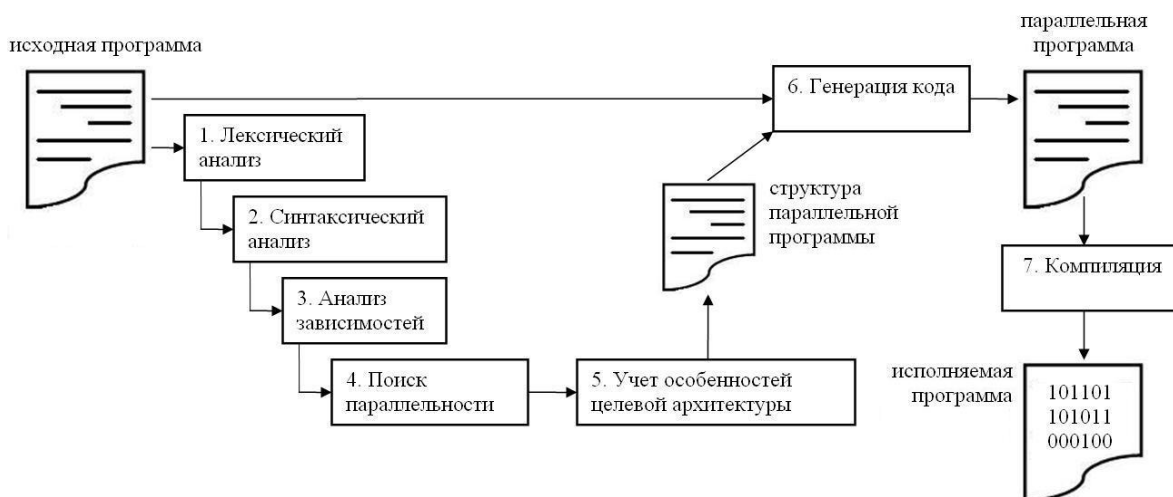


Рис. 1. Процедура получения параллельного кода

Непосредственное распараллеливание исходной программы происходит в рамках четвертой, пятой и шестой фаз трансляции (рис. 1), поэтому именно здесь должна быть учтена организация процесса параллельных вычислений на целевой архитектуре.

Целью данной работы является построение метода, выполняющего функциональность четвертой, пятой и шестой фаз трансляции для параллельной архитектуры CUDA. Другими

словами, разрабатываемый метод должен обеспечивать поиск параллельности, опираясь на информацию о зависимостях в исходной программе (фаза 4), адаптировать результаты фазы 4 для параллельной архитектуры CUDA (фаза 5) и генерировать параллельную программу (фаза 6). Для получения исполняемой программы, результат фазы 6 компилируется с использованием CUDA-компилятора. Следует отметить, что наиболее критичной частью разрабатываемого метода является фаза поиска параллельности, так как именно эта часть в основном определяет структуру параллельной программы.

Учитывая постановку задачи, данная статья содержит три части, каждая из которых, определяет устройство отдельной фазы трансляции.

Каждый алгоритм поиска параллельности предназначен для анализа определенного типа программных конструкций – существуют методы для поиска параллельности на уровне функций, отдельных циклов и т.д. Разрабатываемый в рамках данной работы метод должен осуществлять распараллеливание циклов, поэтому фаза поиска параллельности должна быть основана на алгоритме поиска параллельности в циклах. Особое внимание циклам уделяется по вполне определенным причинам. Циклические конструкции включают в себе большой объем вычислений (особенно в программах, обрабатывающих большие массивы данных) и являются хорошим источником параллелизма. Более того, параллелизм, заключенный в циклах, относительно просто идентифицируется и хорошо масштабируется в пространстве процессоров, по сравнению с параллелизмом, скрытым в других типах программных конструкций [1].

На сегодняшний день существует ряд мощных алгоритмов, предназначенных для автоматического распараллеливания вложенностей циклов [1, 2]. Их можно разделить на две основные группы – алгоритмы поиска временных планов и алгоритмы поиска разбиений пространства процессоров. Алгоритмы первого типа выполняют конвейеризацию циклов, определяя то, какие экземпляры инструкций исходной программы могут быть запущены одновременно. Алгоритмы второго типа позволяют распределить независимые потоки экземпляров инструкций между процессорами.

Параллельная архитектура CUDA относится к классу SIMD-архитектур. Характерной особенностью архитектур этого класса является наличие одного потока инструкций и множества потоков данных. Другими словами, все процессоры, задействованные в вычислениях, в один момент времени выполняют одну и ту же инструкцию, но применительно к разным элементам данных. Чаще всего, это достигается за счет параметризации SIMD-программы номером процессора. Аналогичный подход используется и при написании программ для CUDA. Поэтому в рамках поставленной задачи поиск параллельности предпочтительно выполнять с помощью алгоритмов нахождения разбиений пространства процессоров.

При написании программ для архитектуры CUDA на передний план выходит понятие потока. Поток – это последовательность инструкций, выполняемая на отдельном процессоре. Программа для CUDA в ходе выполнения, представляет собой множество параллельно исполняемых потоков. Каждый поток обладает своим уникальным идентификатором. Понятие потока является основным при разработке CUDA-программ потому, что за привязку потоков к процессорам отвечает среда выполнения CUDA и программист не способен вмешаться в данный процесс. Однако то, какие инструкции будут выполнять различные потоки, полностью зависит от программиста. Поэтому задачу поиска параллельности предлагается сформулировать следующим образом: из множества всех экземпляров инструкций исходной программы необходимо сформировать максимально возможное число независимых потоков. Независимыми потоками считаются такие, в которых зависимости по данным между экземплярами инструкций не выходят за пределы потока. Другими словами, все зависимые по данным экземпляры инструкций исходной программы должны выполняться в рамках одного потока. Зависимость по данным между экземплярами инструкций существует в том случае, если они обращаются к одному и тому же элементу данных, при этом хотя бы одно из обращений является обращением на запись [1].

Архитектура CUDA не допускает существование потоков с отрицательными номерами.

Сформируем список требований к алгоритму поиска параллельности, на котором будет основана четвертая фаза трансляции:

1. Результатом работы алгоритма должен являться набор аффинных функций, отображающих экземпляры инструкций исходной программы в пространство потоков.

2. В качестве входа алгоритм должен принимать информацию о зависимостях по данным, присутствующим в распараллеливаемом участке кода в форме многогранного сокращенного графа зависимостей (МСГЗ) [2].

3. Для каждой инструкции распараллеливаемого участка кода исходной программы должна быть составлена своя функция.

4. Функции должны быть составлены таким образом, чтобы число потоков, в рамках которых будет выполняться распараллеливаемый участок кода, было максимально возможным для конкретной программы.

5. Функции должны быть составлены таким образом, что бы все потоки выполнения были независимы.

6. Каждый отдельный поток должен идентифицироваться целым неотрицательным числом.

Функции разбиения должны быть пригодны для генерации параллельного кода уже существующими методами генерации. МСГЗ используется потому, что является одной из распространенных форм представления зависимостей [2].

Ни один из проанализированных в рамках данной работы алгоритмов поиска аффинных функций разбиения не удовлетворяет требованию 6, характерному для архитектуры CUDA. В данной работе предлагается алгоритм поиска, отвечающий всем шести требованиям.

Для представления алгоритма введем следующие обозначения. Инструкции исходной программы будем обозначать в соответствии с порядком их следования в исходном коде – 1, 2, 3 и т.д.; экземпляр инструкции i – i^* ; \vec{x}_i – вектор индексных переменных циклов, охватывающих инструкцию i , конкретное значение вектора \vec{x}_i , определяющее i^* будем обозначать \vec{x}_i^* ; Π_i – функция отображения инструкции i ; $\Delta_{i,j} = \Pi_j(\vec{x}_j) - \Pi_i(\vec{x}_i)$ – разность функций отображения инструкций i и j , представляющая собой номер потока; D_i – пространство итераций инструкции i ; D_i^\wedge – многогранник независимых экземпляров инструкции i ; $D_{i,j}$ – многогранник зависимостей, определяющий зависимость между инструкциями i и j , при этом инструкция j является зависимой. Следует отметить, что пространство итераций D_i представляет собой параметрический многогранник от \vec{x}_i , вектора структурных параметров циклов и константы. Многогранник зависимостей $D_{i,j}$ представляет собой параметрический многогранник от \vec{x}_i, \vec{x}_j векторов структурных параметров циклов, охватывающих инструкции i, j и константы.

Первый шаг предлагаемого метода распараллеливания заключается в поиске размерности пространства потоков. Размерность пространства потоков прямым образом влияет на размерность искомым функций отображения.

Приведем следующие интуитивно понятные рассуждения. Независимые экземпляры инструкций исходной программы могут выполняться в разных потоках одновременно. Только в этом случае степень параллельности, скрытая в исходной программе, не будет снижена при распараллеливании. Размерность должна быть выбрана таким образом, чтобы все независимые экземпляры инструкций могли быть взаимнооднозначно отображены в пространство потоков.

Для определения размерности пространства, в котором данные потоки будут расположены, для каждой инструкции i входной программы необходимо выполнить следующий алгоритм.

1. Вход: D_i - пространство итераций инструкции i , все многогранники зависимостей, в которых участвует инструкция i - $D_{j,i}$, $D_{k,i}$, и т.д.;

2. К каждому многограннику зависимостей применить алгоритм исключений Фурье-Мощкина для исключения из них всех индексных переменных, входящих в многогранники пространств итераций инструкций, от которых зависит инструкция i . Результатом данного шага являются многогранники $\bar{D}_{j,i}$, $\bar{D}_{k,i}$ и т.д. соответственно. На понятийном уровне данные многогранники представляют собой множества экземпляров инструкций i , зависящих от экземпляров инструкций j , k , и т.д. соответственно;

3. Определить множество независимых экземпляров инструкции i - D_i^{\wedge} как разницу многогранников: $D_i^{\wedge} = D_i - \bar{D}_{i,j} - \bar{D}_{k,j} - \dots$. Как видно, D_i^{\wedge} так же является многогранником, который представляет собой какую-то часть D_i ;

4. Определить, от какого количества индексных переменных зависит D_i^{\wedge} ;

5. Очевидно, наиболее удобно, когда размерность пространства потоков для инструкции i будет совпадать с размерностью пространства, в котором расположен D_i^{\wedge} , т.е. количеством индексных переменных, определенных на предыдущем шаге.

Размерность пространства потоков, в котором будет выполняться параллельная программа, предлагается определять как максимальную размерность многогранника D_i^{\wedge} среди размерностей, полученных в ходе применения означенного алгоритма ко всем инструкциям.

Вторым шагом предлагаемого метода распараллеливания является составление образов аффинных функций отображения для каждой вершины входного МСГЗ (каждой инструкции исходной программы). Данная процедура основана на аффинной форме леммы Фаркаша [3]. Лемма утверждает, что функция $f(\vec{x})$ будет неотрицательна на всем многограннике $D \equiv A * \vec{x} + \vec{b} \geq \vec{0}$ тогда и только тогда, когда она представляет собой положительную аффинную комбинацию вида

$$f(\vec{x}) = \lambda_0 + \vec{\lambda} * (A * \vec{x} + \vec{b}), \lambda_0 \geq 0, \vec{\lambda} \geq \vec{0}. \quad (1)$$

Множители λ_i называют множителями Фаркаша. Учитывая условие 6 списка требований к алгоритму, функция отображения каждой инструкции должна быть неотрицательна на всем пространстве итераций соответствующей инструкции:

$$\Pi_i(\vec{x}_i) = \lambda_0 + \vec{\lambda} * D_i, \lambda_0, \vec{\lambda} \geq \vec{0}. \quad (2)$$

Таким образом, для каждой инструкции i исходной программы должен быть составлен образ функции отображения $\Pi_i(\vec{x}_i)$ в форме (2), размерность которой должна совпадать с D_i^{\wedge} .

Процедура распараллеливания сводится к поиску множителей Фаркаша, которые приводят к построению функций отображения, удовлетворяющих требованиям 4, 5, 6 вышеозначенного списка требований к алгоритму.

Третьим шагом предлагаемого метода является учет зависимостей, а более точно – учет условия 5. Для этого необходимо, чтобы для каждой дуги входного МСГЗ выполнялось следующее условие. Все экземпляры инструкций i, j , принадлежащих многограннику $D_{i,j}$, помечающему дугу МСГЗ, должны выполняться в рамках потока с одним номером:

$$\Delta_{i,j} = \Pi_j(\vec{x}_j^*) - \Pi_i(\vec{x}_i^*) = \vec{0}, \forall \{\vec{x}_j^*, \vec{x}_i^*\} \in D_{i,j}. \quad (3)$$

Учитывая то, что многогранники зависимостей можно сократить, применив к ним метод исключений Фурье-Мощкина, выражение (3) можно сократить, исключив эти же переменные:

$$\bar{\Delta}_{i,j} = \Pi(\vec{x}_j^*) - \Pi(h(\vec{x}_i^*)) = \vec{0}, \forall \vec{x}_j^* \in \bar{D}_{i,j}, \quad (4)$$

где функция h – аффинная функция, определяющая соответствие между зависимыми экзем-

плярами инструкций 1 и 2. Информация соответствия – это ни что иное, как уравнения, содержащиеся в соответствующих многогранниках зависимостей.

Результатом третьего шага является набор систем уравнений относительно искомым множителей Фаркаша, которые содержат в себе все ограничения, вытекающие из зависимостей данных. Способ получения систем уравнений из выражений вида (4) будет детально изложено в примере. Следует отметить, что данные системы всегда представляют собой системы линейных уравнений.

Четвертым шагом предлагаемого метода является учет условия 4. Чтобы количество параллельных потоков выполнения было максимальным, необходимо выполнение каждого независимого экземпляра каждой инструкции в отдельном потоке. Из геометрических соображений очевидно, что последнее будет справедливо, если для каждой инструкции i исходной программы все точки многогранника D_i^{\wedge} будут взаимнооднозначно отображаться в пространство потоков. Учитывая, что пространства итераций и пространство потоков являются целочисленными, то взаимнооднозначное отображение возможно лишь в том случае, если матрица, составленная из коэффициентов $\Pi_i(\bar{x}_i)$ при индексных переменных оставшихся в D_i^{\wedge} , является унимодулярной [4]. В конечном счете, требование об унимодулярности должно быть выражено в виде набора линейных ограничений, которые необходимо будет добавить к соответствующей системе линейных уравнений, полученной на предыдущем шаге.

Всякая элементарная матрица унимодулярна [5]. Основываясь на данном утверждении можно получить линейные уравнения, учитывающие условие 4. Данные уравнения следует добавить к соответствующим системам, полученным на третьем шаге. Также к этим системам добавляются неравенства, требующие положительности множителей Фаркаша.

Пятым шагом предлагаемого метода является отыскание решения на полученных системах уравнений/неравенств. В общем случае это задача целочисленного линейного программирования. В данной работе предлагается находить решение следующим способом. Если с каждым неизвестным множителем Фаркаша связать одномерное пространство, то система превращается в многогранник в Z^d , где d – это количество множителей Фаркаша. Конечное решение предлагается определять как точку лексикографического минимума данного многогранника. Для определения лексикографического минимума на многограннике следует ввести отношение порядка, т.е. упорядочить координатные оси пространства, в котором определен многогранник. Упорядочить их следует таким образом, чтобы коэффициенты при индексных переменных оказались минимальными. Результатом данного шага является вектор искомым множителей Фаркаша.

Следующей фазой трансляции является учет особенностей целевой архитектуры. Функции разбиения практически полностью определяют структуру искомой параллельной программы. Однако они не учитывают особенностей организации процесса параллельных вычислений на целевой архитектуре. Поэтому необходимо определить факторы, наиболее сильно влияющие на производительность. Для дальнейших рассуждений сделаем краткое пояснение организации вычислений на архитектуре CUDA.

Вычислительное устройство CUDA представляет собой массив мультипроцессоров, выполняющих одну задачу в рамках большого числа потоков. Другими словами, данное вычислительное устройство можно отнести к классу SIMD. Код, который должен выполняться на устройстве, необходимо оформить в виде специальной функции – ядра (kernel). Потоки, выполняющие ядро, организованы в виде решетки потоков (grid), структура которой определяется программистом и должна быть известна на этапе компиляции. Программист должен знать заранее, в каком количестве потоков будет выполняться ядро, и организовать эти потоки в решетку с наиболее подходящей структурой.

Решетка состоит из блоков потоков (thread block) фиксированного размера, каждый из которых обладает уникальным идентификатором. Каждый поток «знает» идентификатор блока, к которому он принадлежит, и собственный идентификатор в рамках данного потока.

Как показывает практика, структура решетки потоков сильно влияет на производительность. Таким образом, для получения эффективной параллельной программы мало знать, в каком количестве потоков будет выполняться программа, а также, какие экземпляры инструкций будет выполнять каждый поток (на этот вопрос отвечают функции разбиения), еще необходимо организовать потоки в решетку с такой структурой, которая приведет к высокой эффективности выполнения.

Эксперименты, проводимые в рамках данной работы, показали, что наибольшая эффективность выполнения достигается, когда блок содержит в себе 512 потоков. Это совпадает с данными технической документации. При этом неправильный выбор величины блока может привести к тому, что эффективность выполнения того же самого ядра снизится в разы.

Фаза учета особенностей целевой архитектуры опирается на результаты фазы поиска параллельности (набор функций разбиения), и ее целью является построение структуры решетки потоков, блоки которой содержат 512 потоков.

Если общее количество потоков не кратно 512, то в данной работе предлагается увеличить его до ближайшего кратного 512 сверху. Добавленные потоки представляют собой «фиктивные» потоки, которые не выполняют никаких действий – запускаются и тут же завершаются. Такой подход позволит подобрать подходящую структуру решетки потоков, тем самым увеличив быстродействие. Поскольку добавленные потоки не выполняют действий, они не являются источником накладных расходов.

Последняя фаза трансляции представляет собой процедуру генерации кода. Для генерации кода в данной работе используется метод, предлагаемый в [1]. Данный метод предназначен для генерации SIMD-программ по аффинным функциям отображения, что и требуется. Результатом фазы генерации кода является код, полученный с помощью указанного метода, со следующими тривиальными модификациями. Код, получаемый в результате использования метода из [1], представляет собой код, вложенный в циклы с итерациями в пространстве потоков. Для написания CUDA-программ данные циклы не требуются. Поэтому первая модификация – это устранение внешних циклов с итерациями в пространстве потоков. Чтобы расширение пространства потоков не привело к искажению результатов выполнения, необходимо ввести проверку в виде оператора ветвления в результирующий код, запрещающую фиктивным потокам выполнение каких-либо действий. Составление подобных ветвлений, проверяющих значение идентификатора потока, представляет собой вторую модификацию кода.

Рассмотрим применение предложенного метода трансляции на примере. На рис. 1 представлена последовательная программа, выполняющая перемножение полиномов степени N .

```

for (i = 0; i <= N; i++)
{
    for (k = 0; k <= N; k++)
    {
        if (i == 0 || k == 0)
            C[i - k + N] = A[i] * B[-k + N];          /* 1 */

        if (i != 0 && k != 0)
            C[i - k + N] = C[i - k + N] + A[i] * B[-k + N]; /* 2 */
    }
}

```

Рис. 2. Программа-пример

Как видно, данная программа содержит две инструкции – 1 и 2. Следует отметить, что инструкции «окружены» операторами ветвлений, которые определяют срабатывание отдельной инструкции. Другими словами, данные операторы «вырезают» области пространства итераций, определяемого парой циклов от i и j .

Учитывая границы циклов и соответствующие операторы ветвления, получаем следующие пространства итераций:

$$D_1 \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_1 \\ k_1 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq \bar{0} \end{matrix} \cup \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_1 \\ k_1 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq \bar{0} \end{matrix},$$

$$D_2 \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_2 \\ k_2 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \geq \bar{0}$$

Рис. 3. Пространства итераций инструкций 1 и 2

Пространство итераций первой инструкции представляет собой объединение двух многогранников. Такое объединение возникло из-за оператора «ИЛИ» в первом ветвлении. Результатом фазы анализа зависимостей является МСГЗ, представленный на рис. 4.

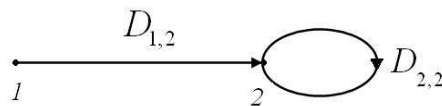


Рис. 4. МСГЗ программы-примера

Данный граф содержит две вершины, соответствующие инструкциям 1 и 2 исходной программы, две дуги, соответствующие двум типам зависимостей. Многогранники зависимостей представлены ниже.

$$D_{1,2} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_1 \\ k_1 \\ i_2 \\ k_2 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq \bar{0} \end{matrix} \cup \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_1 \\ k_1 \\ i_2 \\ k_2 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq \bar{0} \end{matrix}$$

Рис. 5. Многогранник зависимостей $D_{1,2}$

В силу того, что пространство итераций инструкции 1 представляет собой объединение двух многогранников, то многогранник $D_{1,2}$, также представляет собой объединение двух многогранников.

На рис. 6 представлен многогранник зависимостей $D_{2,2}$.

Как видно из представленных МСГЗ, в программе присутствует два типа зависимостей. Экземпляры инструкции 2 зависят от экземпляров инструкции 1, если для индексных переменных выполняется одно из условий:

$$i_1 = i_2 - 1 \wedge j_1 = j_2 - 1 \wedge i_1 = 0 \wedge 0 \leq j_1 \leq N \wedge 0 \leq i_2 \leq N \wedge 0 \leq j_2 \leq N$$

или $i_1 = i_2 - 1 \wedge j_1 = j_2 - 1 \wedge j_1 = 0 \wedge 0 \leq i_1 \leq N \wedge 0 \leq i_2 \leq N \wedge 0 \leq j_2 \leq N$. Экземпляры инструкции 2 зависят от других экземпляров инструкции 2, если для индексных переменных выполняется условие: $i_2 = i_2^l - 1 \wedge j_2 = j_2^l - 1 \wedge 1 \leq i_2 \leq N \wedge 1 \leq j_2 \leq N \wedge 1 \leq i_2^l \leq N \wedge 1 \leq j_2^l \leq N$.

$$D_{2,2^l} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_2 \\ k_2 \\ i_2^l \\ k_2^l \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq \bar{0} \end{matrix}$$

Рис. 6. Многогранник зависимостей $D_{2,2^l}$

В соответствии с предложенным методом поиска функций отображения, первое, что необходимо сделать, это определить размерность пространства потоков. В соответствии с предложенным алгоритмом определения размерности пространства потоков применяем метод исключений Фурье-Моцкина к многогранникам зависимостей. Из $D_{1,2}$ исключаем переменные, входящие в D_1 , а из $D_{2,2^l}$ исключаем переменные, входящие в D_2 , получая $\bar{D}_{1,2}$ и $\bar{D}_{2,2^l}$ соответственно.

Учитывая то, что $D_{1,2}$ представляет собой объединение двух многогранников, то метод исключения Фурье-Моцкина применяем к каждому многограннику в отдельности.

$$\bar{D}_{1,2} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_2 \\ k_2 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq \bar{0} \end{matrix} \cup \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_2 \\ k_2 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq \bar{0} \end{matrix}$$

$$\bar{D}_{2,2^l} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -2 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_2^l \\ k_2^l \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \geq \bar{0}$$

Рис. 7. Многогранники зависимых инструкций

Далее определяем множества независимых инструкций. Глядя на МСГЗ, очевидно, что все экземпляры инструкции 1 независимы, так как в вершину 1 не входит ни одна дуга. Таким образом, многогранник независимых инструкций для инструкции 1 будет совпадать с многогранником пространства итераций данной инструкции. Многогранник независимых инструкций для инструкции 2 будет определяться следующим образом: $D_2^\wedge = D_2 - \bar{D}_{1,2} - \bar{D}_{2,2^l}$.

Данное выражение объясняется тем, что некоторые экземпляры инструкции 2 зависят от экземпляров инструкции 1, при этом множество зависимых экземпляров содержится в $\bar{D}_{1,2}$. С другой стороны, некоторые экземпляры 2 зависят от других экземпляров 2, такие экземпляры содержатся в $\bar{D}_{2,2}$. Формально, многогранники $\bar{D}_{1,2}$ и $\bar{D}_{2,2}$ зависят от разных индексных переменных, однако участвовать в операции нахождения разности они все равно могут, так как они представляют собой различные части одного и того же пространства итераций. Представим многогранники независимых экземпляров инструкций.

$$D_1^{\wedge} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_1 \\ k_1 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq 0 \end{matrix} \cup \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_1 \\ k_1 \\ N \\ 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} = 0 \\ \geq 0 \end{matrix},$$

$$D_2^{\wedge} \equiv \emptyset$$

Рис. 8. Многогранники независимых инструкций

Видно, все экземпляры инструкции 2 являются зависимыми. Учитывая то, что размерность каждого из многогранников, образующих D_1^{\wedge} , равна единице, то размерность пространства потоков также равна единице. Для операций над многогранниками в данной работе используется библиотека Polylib.

Следующим шагом, в соответствии с предложенным методом распараллеливания, является составление прообразов аффинных функций процессорного отображения для каждой инструкции i исходной программы, как аффинной комбинации на многограннике D_i в форме (2). Учитывая одномерность пространства потоков, прообразы будут скалярными функциями. Следует отметить, что многогранник D_1 является частью многогранника пространства итераций, образуемого циклами по i и j , в силу того, что первый оператор ветвления «вырезает» часть последнего многогранника, определяя D_i . Поэтому, при составлении прообраза функции отображения для инструкции 1 можно потребовать положительности данной функции на многограннике, образуемом циклами. Таким образом, прообразы аффинных функций отображения для инструкции 1 и 2 будут соответственно представлять собой

$$\begin{aligned} \Pi_1(\bar{x}_1) &= \lambda_0 + (\lambda_1 - \lambda_2)i_1 + (\lambda_3 - \lambda_4)k_1 + (\lambda_2 + \lambda_4)N, \\ \Pi_2(\bar{x}_2) &= \lambda_5 + (\lambda_6 - \lambda_7)i_1 + (\lambda_8 - \lambda_9)k_1 + (\lambda_7 + \lambda_9)N - \lambda_6 - \lambda_8. \end{aligned} \quad (5)$$

Для гарантии неотрицательности номеров потоков множители Фаркаша должны быть неотрицательны $\lambda_k \geq 0, 0 \leq k \leq 9$.

Следующим шагом, в соответствии с предложенным методом распараллеливания, является учет зависимостей. Для каждой дуги МСГЗ должно выполняться условие (3). Конкретно для рассматриваемого примера:

$$\begin{aligned} \Delta_{1,2} &= \Pi_2(\bar{x}_2^*) - \Pi_1(\bar{x}_1^*) = 0, \forall \bar{x}_2^*, \bar{x}_1^* \in D_{1,2}, \\ \Delta_{2,2'} &= \Pi_2(\bar{x}_2^{*l}) - \Pi_2(\bar{x}_2^*) = 0, \forall \bar{x}_2^{*l}, \bar{x}_2^* \in D_{2,2'} \end{aligned}$$

Учитывая то, что $i_1 = i_2 - 1 \wedge k_1 = k_2 - 1 \wedge i_1 = 0$ или $i_1 = i_2 - 1 \wedge k_1 = k_2 - 1 \wedge k_1 = 0$ для дуги МСГЗ, помеченной $D_{1,2}$, и $i_2 = i_2^l - 1 \wedge k_2 = k_2^l - 1$ для дуги, помеченной $D_{2,2'}$, переходим к форме (4):

$$\begin{aligned}\bar{\Delta}_{1,2} &= (-\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_8 - \lambda_9)j_2 + (-\lambda_2 - \lambda_4 + \lambda_7 + \lambda_9)N \\ -\lambda_0 + \lambda_3 - \lambda_4 + \lambda_5 - \lambda_7 + \lambda_8 &= 0, \forall \{i_2 = 1, k_2 \geq 1\} \in \bar{D}_{1,2},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{\Delta}_{1,2} &= (-\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_6 - \lambda_7)i_2 + (-\lambda_2 - \lambda_4 + \lambda_7 + \lambda_9)N \\ -\lambda_0 + \lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_5 - \lambda_6 + \lambda_9 &= 0, \forall \{i_2 \geq 1, k_2 = 1\} \in \bar{D}_{1,2},\end{aligned}$$

$$\bar{\Delta}_{2,2^1} = \lambda_6 - \lambda_7 + \lambda_8 - \lambda_9 = 0, \forall \{i_2^1, k_2^1\} \in \bar{D}_{2,2^1}$$

Тривиальное решение, когда данное условие будет справедливо, представляет собой следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} -\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_8 - \lambda_9 = 0, \\ -\lambda_2 - \lambda_4 + \lambda_7 + \lambda_9 = 0, \\ -\lambda_0 + \lambda_3 - \lambda_4 + \lambda_5 - \lambda_7 + \lambda_8 = 0, \\ -\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_6 - \lambda_7 = 0, \\ -\lambda_0 + \lambda_1 - \lambda_2 + \lambda_5 - \lambda_6 + \lambda_9 = 0, \\ \lambda_6 - \lambda_7 + \lambda_8 - \lambda_9 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) содержит в себе все ограничения, вытекающие из зависимостей данных. Любые функции (5), удовлетворяющие данным ограничениям, будут приводить к тому, что все пары зависимых экземпляров инструкций исходной программы будут отображаться в потоки с одинаковым номером. Другими словами, система (6) гарантирует независимость потоков параллельной программы.

Следующим шагом, в соответствии с предложенным методом распараллеливания, является составление условий, приводящих к построению функций отображения, максимизирующих количество параллельных потоков. Для этого необходимо, чтобы каждый независимый экземпляр каждой инструкции выполнялся в отдельном потоке. Выше было показано, что формально для этого необходимо, чтобы матрицы, составленные из коэффициентов функций отображения (5) при индексных переменных, не обратившихся в константы в D_1^{\wedge} и в D_2^{\wedge} соответственно, были унимодулярными. Учитывая то, что составленные матрицы состоят из одного элемента, требование их элементарности излишне. Так как в рассматриваемом примере многогранник D_2^{\wedge} представляет собой пустое множество, получаем четыре – условия:

$$\begin{cases} \lambda_1 - \lambda_2 = 1, \\ \lambda_3 - \lambda_4 = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda_1 - \lambda_2 = 1, \\ \lambda_3 - \lambda_4 = -1 \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda_1 - \lambda_2 = -1, \\ \lambda_3 - \lambda_4 = 1 \end{cases} \quad \begin{cases} \lambda_1 - \lambda_2 = -1, \\ \lambda_3 - \lambda_4 = -1 \end{cases} \quad (7)$$

Дополняя систему (6) поочередно одним из условий унимодулярности, а также требованием о неотрицательности множителей Фаркаша, получаем четыре результирующих системы уравнений/неравенств.

В соответствии последним шагом предлагаемого метода, решение определяем как лексикографический минимум многогранника. Для этого вводим отношение порядка – упорядочиваем координатные оси, в которых располагаются многогранники решений:

$$\lambda_5, \lambda_0, \lambda_9, \lambda_8, \lambda_7, \lambda_6, \lambda_4, \lambda_3, \lambda_2, \lambda_1.$$

Оказывается, что лексикографическим минимумом обладают только два результирующих многогранника решений, полученные дополнением системы (6) вторым и третьим условиями (7) соответственно. Для отыскания лексикографического минимума на многограннике в данной работе используется библиотека Piplib.

Представим функции отображения, полученные в результате отыскания лексикографического минимума данных многогранников:

$$\begin{aligned} \Pi_1(\bar{x}_1) &= i_1 - k_1 + N, & \Pi_1(\bar{x}_1) &= -i_1 + k_1 + N, \\ \Pi_2(\bar{x}_2) &= i_2 - k_2 + N & \Pi_2(\bar{x}_2) &= -i_2 + k_2 + N \end{aligned}$$

Для генерации кода можно использовать любое из этих решений. Для простоты будем использовать решение, представленное слева:

$$\begin{aligned} \Pi_1(\bar{x}_1) &= i_1 - k_1 + N, \\ \Pi_2(\bar{x}_2) &= i_2 - k_2 + N. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя в (4) максимальные и минимальные значения индексной переменной i и j , получаем, что пространство потоков представляет собой отрезок от нуля до $2N$. Другими словами, рассматриваемая программа-пример допускает выполнение в рамках $2N+1$ параллельно запущенных потоков.

Метод генерации кода, используемый в данной работе, подробно объясняется в [1]. Здесь же приведем его конечный результат. Назначение данного метода – уплотнение циклов и устранение избыточных проверок в параллельной программе.

```
for (ID = 0; ID <= 2*N; ID++)
  for (i = max(0, ID - N); i <= min(N, ID); i++)
    for (k = max(0, i - ID + N); k <= min(N, i - ID + N); k++)
      {
        if (i == 0 || k == 0)
          C[i - k + N] = A[i] * B[-k + N];          /* 1 */
        if (i != 0 && k != 0)
          C[i - k + N] = C[i - k + N] + A[i] * B[-k + N]; /* 2 */
      }
```

Рис. 9. Код с плотными границами и без избыточных проверок

Данный код представляет собой эффективный SIMD-код, однако он не учитывает особенностей организации процесса вычислений на архитектуре CUDA. Следует напомнить, что для выполнения параллельного кода в рамках CUDA, необходимо сформировать структуру решетки потоков, которая приведет к эффективному использованию ресурсов GPU. Учитывая тесты производительности, приведенные в первой части работы, необходимо сформировать такую решетку потоков, чтобы размер блока составлял 512 потоков.

Пространство потоков для рассматриваемого примера одномерно, соответственно решетка потоков будет одномерной. С другой стороны, программа – пример допускает параллельное выполнение в N потоках. Учитывая данные обстоятельства, количество блоков в решетке будет составлять $\text{ceil}(2N + 1/512)$, где ceil – ближайшее целое сверху. Число фиктивных потоков будет рассчитываться по формуле - $\text{ceil}(2N + 1/512)512 - N$.

Для того, чтобы расширение пространства потоков не привело к искажению результатов выполнения, вводим дополнительную проверку в результирующий код, запрещающую фиктивным потокам выполнение каких-либо действий. Так как пространство потоков расположено в пределах от нуля до $2N$ плюс определенное количество фиктивных потоков, то фиктивные потоки будут представлять собой потоки с номером, большим $2N$. Результат фазы генерации кода представлен на рис. 10.

Для проведения компьютерного эксперимента было реализовано две программы – последовательная (для выполнения перемножения полиномов с использованием CPU), и параллельная (для выполнения аналогичной операции с использованием GPU). Параллельная программа написана на основе кода с рис. 10. Код последовательной программы идентичен коду с рис. 2. Для запуска последовательных программ используется следующая конфигурация оборудования: CPU – Pentium Dual-Core 2,6 GHz, RAM – 2048 Мб. Для запуска параллель-

ных программ использовалось устройство: NVIDIA GeForce 9600 GT (64 скалярных процессора, 512 MHz каждый), 512 Мб встроенной памяти.

```

if (ID <= 2 * N)
{
  for (i = max (0, ID - N); i <= min (N, ID); i++)
    for (k = max (0, i - ID + N); k <= min (N, i - ID + N); k++)
      {
        if (i == 0 || k == 0)
          C[i - k + N] = A[i] * B[-k + N];          /* 1 */
        if (i != 0 && k != 0)
          C[i - k + N] = C[i - k + N] + A[i] * B[-k + N]; /* 2 */
      }
}

```

Рис. 10. Результат фазы генерации кода

Представим результаты эксперимента – время выполнения последовательной и параллельной программ при различных N.

Таблица 1

Время выполнения последовательной и параллельной программ

N	CPU, миллисекунды	GPU, миллисекунды	Фиктивных потоков
1000	17.8	2.4	47
2000	71.3	8.3	95
3000	91.4	18.3	143
5000	278.4	51.2	239
7000	455.6	94.4	335
10000	820	190.2	479

Графическая интерпретация полученных экспериментальных результатов представлена на рис. 11.

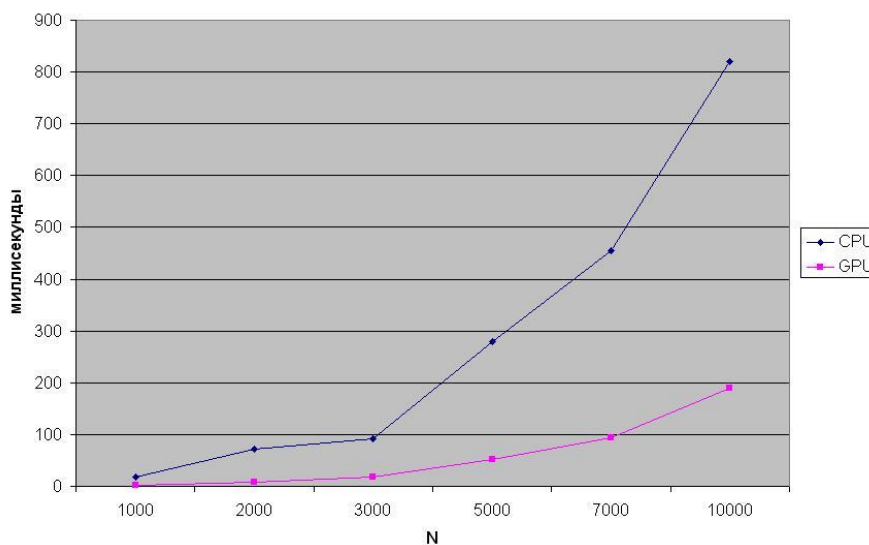


Рис. 11. Результаты эксперимента

Можно видеть, что производительность GPU практически не зависит от количества фиктивных потоков. Следует отметить, что параллельная программа оказалась заметно эф-

фективнее последовательного аналога при всех значениях N . Более того, чем больше N , тем больше разница во времени выполнения последовательной и параллельной программ, что подтверждает полезность предложенного алгоритма распараллеливания.

Библиографический список

1. Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий / А. Ахо [и др.]. – М.: Вильямс, 2008. – 1184 с.
2. **Касьянов, В.Н.**, Реструктурирующие преобразования: алгоритмы распараллеливания циклов / В.Н. Касьянов, И.Л. Мирзуитова // Программные средства и математические основы информатики. – Новосибирск, 2004.
3. **Feautrier, P.** Some efficient solutions to the affine scheduling problem. Part 1: One dimensional time / P. Feautrier, International journal of parallel programming, 1992. V. 21
4. **Lengauer, C.** Loop parallelisation in polytope model / C. Lengauer // 4th International conference of concurrency theory, 1993.
5. **Курош, А.Г.** Курс высшей алгебры / А.Г. Курош. – СПб.: Лань, 2004. – 432 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.07.2011*

A.A. Novokreshchenov, V.P. Hranilov

METHOD OF AUTOMATIC LOOP PARALLELISATION AND GENERATING PARALLEL PROGRAMS FOR THE CUDA ARCHITECTURE

This article defines a problem of sequential loops parallelizing translation. The following methods are studied within the context of the problem: loops parallelizing, parallel computing process structure recording, code generation in case NVIDIA CUDA serves as target architecture.

Key words: automatic parallelization, loop nest, code generating, CUDA.

УДК 681.518.54

Д.В. Ломакин, А.А. Иванова, А.М. Ворон

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработаны диагностическая модель и алгоритмы локализации дефектов в сложных системах на основе информационного критерия.

Ключевые слова: граф, диагностирование, дефект, точки контроля, информационный критерий.

Постановка задачи

В работе рассматривается диагностирование сложных систем произвольной физической природы, в том числе и программных средств, модель которых может быть представлена в виде графа или таблицы функции неисправностей. Вершины графа, в частности, могут изображать блоки системы [1]. Диагностирование системы, т. е. определение ее состояния, когда она неисправна, производится на основании вектора $y \in Y$ результатов тестирования, которые снимаются в специально организованных точках контроля. С целью построения оптимальной стратегии локализации дефектов в работе используется статистическое моделирование отказов блоков на основе их априорных вероятностей. Моделирование неисправных состояний системы позволяет оценить количество информации, которое доставляет результат тестирования, и выбрать оптимальную стратегию в смысле информационного критерия.

Метод определения состояния системы

Пусть $G(V, U)$ – упорядоченный граф с n вершинами, представляющий модель объекта диагностирования [2]. Обозначим V – множество вершин графа, U – множество ребер графа. Вершины графа соответствуют модулям объекта, а ребра графа – связям между модулями. Обозначим через $X = \{x_1, \dots, x_q\}$ ($q \leq n$) множество входов графа $G(V, U)$, а через $W = \{w_1, \dots, w_p\}$ ($1 \leq p$) – множество выходов.

Если в объекте диагностирования в некоторый момент времени одновременно отказало некоторое множество модулей, то совокупность номеров $\{\eta_1, \dots, \eta_k\}$ соответствующих вершин графа G , представляющего модель объекта диагностирования, назовем дефектом кратности k ($1 \leq k \leq n$).

Пусть имеет место дефект $\{\eta_1, \dots, \eta_k\}$. Состоянием объекта диагностирования назовем n -мерный вектор $s = \{s_1, \dots, s_n\}$, в котором:

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{если номер вершины } i \in \{\eta_1, \dots, \eta_k\}; \\ 0 & \text{– в противном случае} \end{cases}$$

Всего будет 2^n состояний объекта. Всё множество состояний S можно рассматривать как пространство элементарных событий $s \in S$, каждое из которых может наступить после эксплуатации системы в течение заданного времени с вероятностью

$$p(s) = \prod_{j \in I} p_j \prod_{j \in J} (1 - p_j),$$

где p_j – вероятность появления дефекта в j -м модуле; J – множество номеров исправных мо-

дулей; I – множество номеров неисправных модулей. При этом предполагается, что дефект в одном из модулей не влияет на вероятность появления дефектов в других модулях.

Будем полагать, что вершины x и r в графе $G(V, U)$ образуют контрольную пару (x, r) , если в соответствующей системе сигнал, подаваемый на вход элемента x , может быть снят на выходе элемента r . Очевидно, для того чтобы пара (x, r) была контрольной, необходима достижимость вершины r графа $G(V, U)$ из вершины x . В дальнейшем контрольную пару будем называть точкой контроля, а множество точек контроля обозначим Z .

Вектором проверки точки контроля (x, r) назовем n -мерный вектор $b(x, z) = \{b_1, \dots, b_n\}$, компонента b_i которого равна 1, если существует хотя бы один путь от x к r , содержащий вершину i , и равна 0 в противном случае.

Пусть для упорядоченного графа $G(V, U)$ на n вершинах задано некоторое исходное множество Z точек контроля. Тогда матрицей проверок $B_z = \|b_{ij}\|$ ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$) на множестве Z точек контроля назовем матрицу, в которой:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если вершина } j \text{ входит в проверку } i\text{-й контрольной пары;} \\ 0 & \text{– в противном случае} \end{cases}$$

Проверка сигнала в каждой точке контроля позволяет судить о работоспособности всех модулей соответствующего подмножества, которое определяется совокупностью единиц в соответствующей строке матрицы проверок.

Результатом диагностирования системы, содержащей m точек контроля, будет являться m -мерный вектор $y = \{y_1, \dots, y_m\}$, для которого выполняется соотношение $y = Bs$. Матрица B является математической моделью канала связи между множеством векторов состояний объекта S и множеством векторов результатов диагностирования Y . Компоненты вектора y равны 1, если значение измеряемого параметра в соответствующей точке контроля вышло из допуска, и равны 0 в противном случае. Таким образом, при выходе из строя одного из модулей вектор y совпадает с соответствующим столбцом матрицы проверок. В случае выхода из строя нескольких модулей с номерами η_1, \dots, η_k вектор y равен логической поэлементной сумме соответствующих столбцов матрицы: $y_l = b_{l\eta_1} \vee b_{l\eta_2} \vee \dots \vee b_{l\eta_k}$ ($l = \overline{1, m}$).

Таким образом, диагностический эксперимент доставляет некоторый вектор $y_i \in Y$, который характеризует состояние системы с точностью до некоторого подмножества, причём вероятность $p(y_i)$ определяется как сумма вероятностей всех состояний, входящих в соответствующее подмножество.

Глубина локализации дефекта

В данной работе рассматривается задача диагностирования, поэтому не учитывается работоспособное состояние системы, поэтому задача решается на подмножестве неисправных состояний системы \hat{S} . Под глубиной локализации дефекта будем понимать среднее количество состояний, с точностью до которых может быть локализован дефект на основании количества информации $I(\hat{S}, Y)$, которое доставляет диагностический эксперимент:

$$I(\hat{S}, Y) = H(Y) - H(Y/\hat{S}),$$

где $H(Y) = -\sum_{y_i \in Y} p(y_i) \log p(y_i)$ – неопределенность исхода диагностического эксперимента.

Условная неопределенность исхода диагностического эксперимента $H(Y/\hat{S}) = 0$, поскольку неопределённость появления y_i при заданном состоянии системы $s \in \hat{S}$ равна нулю. Отсюда $I(\hat{S}, Y) = H(Y)$.

Задача максимизации глубины локализации дефекта сводится к выбору из допустимо-

го множества точек контроля такого подмножества заданного размера, при котором диагностический эксперимент доставляет максимальное количество информации о системе.

Когда нельзя получить какие-либо сведения о состоянии системы, $I(\hat{S}, Y) = 0$. Для точного определения состояния системы необходимо, чтобы количество информации, которое в среднем доставляет диагностический эксперимент, определялось как

$$I(\hat{S}, Y) = H(\hat{S}),$$

где $H(\hat{S}) = -\sum_{k=1}^{2^n-1} \hat{p}(s) \log \hat{p}(s)$ - неопределённость состояния системы, равная количеству информации, которое необходимо получить, чтобы определить, в каком из состояний находится система ($\hat{p}(s) = \frac{p(s)}{1 - p(\vec{0})}$ - условная вероятность наступления состояния s при условии, что система неисправна; $p(\vec{0})$ - вероятность безотказной работы системы).

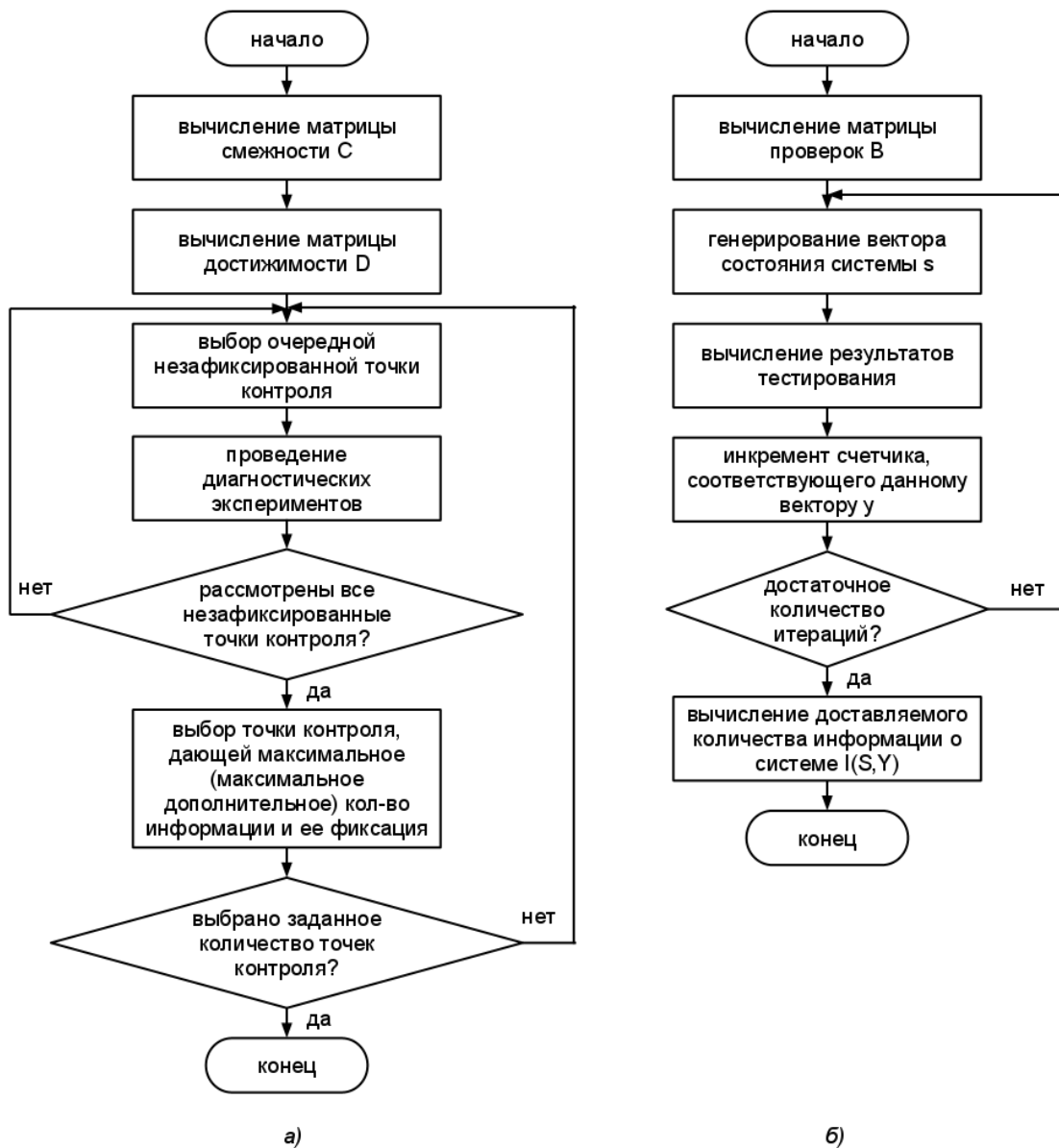


Рис. 1. Блок-схемы алгоритмов:

а - безусловный алгоритм; б - проведение диагностических экспериментов



Рис. 2. Блок-схемы алгоритмов:

а - условный алгоритм; б - проведение диагностических экспериментов

Условный и безусловный алгоритмы локализации дефекта

Разработаны два алгоритма локализации дефектов: безусловный алгоритм, когда тестирование осуществляется на априорно выбранном множестве точек контроля, и условный алгоритм, когда выбор очередной точки контроля зависит от результата тестирования на основе предыдущей точки контроля.

Предлагается следующий безусловный алгоритм последовательного выбора точек контроля (рис. 1, *a*):

1. Выбирается точка контроля, которая доставляет максимальное количество информации о системе. Для этого оцениваются значения вероятностей $p(y_i)$ методом статистического моделирования (рис. 1, *б*) и вычисляется условная энтропия при условии, что система вышла из строя $H(Y)$. С этой целью случайным образом генерируется состояние системы. В качестве априорных сведений о системе используются вероятности $p_1 \dots p_n$ появления дефектов в модулях. С увеличением числа диагностических экспериментов увеличивается точность оценки $p(y_i)$ и $H(Y)$.

2. На каждом из последующих шагов выбирается та точка контроля, которая доставляет максимальное дополнительное количество информации.

3. Процедура выбора точек контроля заканчивается после того, как будет выбрано заданное количество точек контроля или достигнута заданная глубина локализации дефекта.

Предлагается следующий условный алгоритм выбора точек контроля (рис. 2, *a*):

1. Выбирается точка контроля, которая доставляет максимальное количество информации о системе. Для этого оцениваются значения вероятностей $p(y)$ методом статистического моделирования (рис. 2, *б*).

2. На основе выбранной точки контроля производится тестирование системы. В результате тестирования выделяется подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефектов. Если результат тестирования $y_i = 1$, то неисправный блок принадлежит подмножеству блоков, которым соответствует 1 в матрице проверок B и соответствует 0 в противном случае.

3. На каждом очередном шаге осуществляется оптимальный выбор следующей точки контроля, результат тестирования в которой позволяет выделить подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефектов, из ранее полученного подмножества.

4. Процедура выбора точек контроля заканчивается после того, как подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефектов, будет содержать 1 блок.

5. Данный блок проверяется на работоспособность. Если блок неисправен, тогда он подлежит коррекции и следующая итерация алгоритма производит поиск очередного дефекта, в противном случае система не содержит дефектов и находится в работоспособном состоянии.

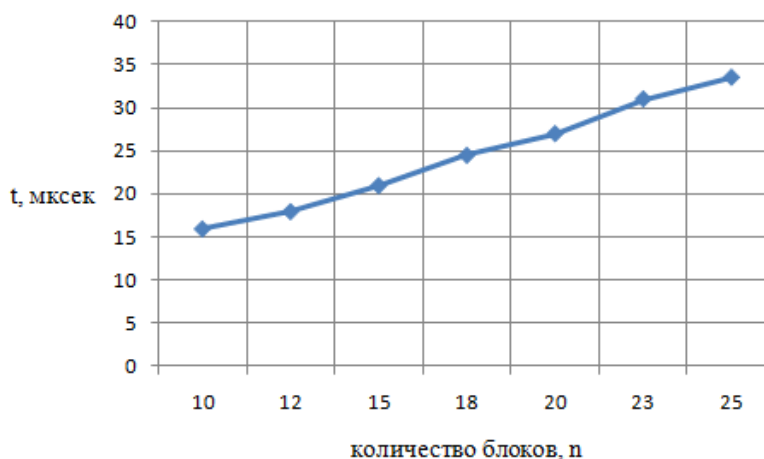


Рис. 3. Зависимость времени выполнения безусловного алгоритма (в микросекундах) от размера системы (в блоках)

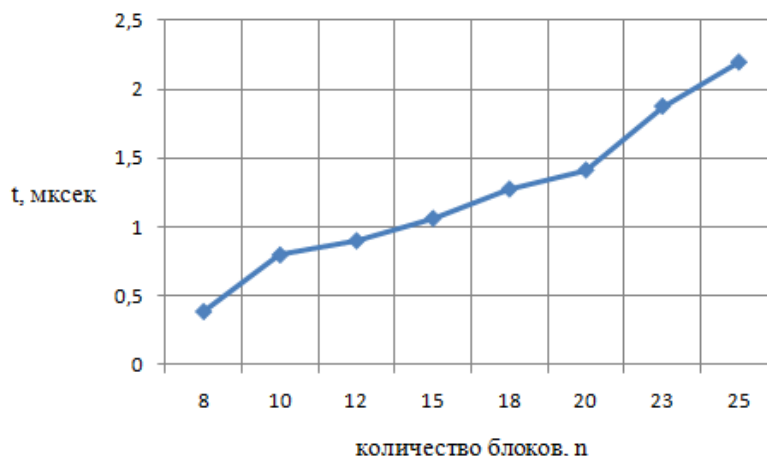


Рис. 4. Зависимость времени выполнения условного алгоритма (в микросекундах) от размера системы (в блоках)

Условный алгоритм позволяет локализовать дефект с точностью до блока или до подмножества блоков, подозреваемых на наличие дефекта. Глубина локализации зависит от исходного множества точек контроля. Этот алгоритм можно использовать в действующей системе при возможности исправлять одиночные дефекты. Каждая итерация данного алгоритма будет сокращать подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефекта. В результате последовательного устранения одиночных дефектов, достигается полное восстановление работоспособности системы.

Была проведена оценка сложности условного и безусловного алгоритмов. Зависимость процессорного времени, требуемого для выполнения безусловного и условного алгоритмов, от количества блоков в системе близка к линейной.

Вывод

На основании информационного критерия разработаны два алгоритма диагностирования сложных систем: безусловный алгоритм, когда тестирование осуществляется на априорно выбранном множестве точек контроля, и условный алгоритм, когда выбор очередной точки контроля зависит от результата тестирования на основе предыдущей точки контроля.

Предложенные алгоритмы позволяют определить оптимальную последовательность точек контроля для обеспечения максимальной глубины локализации дефекта.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили более высокую эффективность разработанных алгоритмов диагностирования сложных систем с произвольной кратностью дефекта и с учетом априорных сведений о вероятностях отказов блоков по сравнению с известными алгоритмами.

Библиографический список

1. **Пархоменко, П.П.** Основы технической диагностики / П.П. Пархоменко, В.В. Карибский, Е.С. Согомоян. – М.: Энергия, 1976. – 56 с.
2. **Сагунов, В.И.** Контролепригодность структурно связанных систем / В.И. Сагунов, Л.С. Ломакина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 11 с.

Дата поступления
в редакцию 12.07.2011

D.V. Lomakin, A.A. Ivanova, A.M. Voron

DIAGNOSIS OF COMPLEX HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEMS

Developed a diagnostic model and algorithms for diagnosis of complex systems based on the information criterion.

Key words: graph, diagnosis, defect, checkpoints, information criterion.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

620.178.3:620.194.8

В.В. Галкин, Е.Г. Терещенко, А.А. Дербенев, Е.А. Горбачёв

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЛАВА ЭИ 878 В ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛИСТОВЫХ ГОФРИРОВАННЫХ ПАНЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дана оценка влияния температурно-скоростных условий и схемы штамповки на распределение деформированного состояния и изменение механических характеристик листового материала из сплава ЭИ 878 гофрированной панели в зоне рифта при штамповке на гидравлическом прессе на жестком форм-блоке полиуретаном, размещенным в контейнере, и на листоштамповочном молоте в свинцово-цинковом штампе.

Ключевые слова: листовая гофрированная панель, распределение деформированного состояния металла, конструктивный рельеф - зиг.

Листовые гофрированные панели являются силовой жесткостью в конструкциях изделий машиностроения: электрических щитах, автомобилях, судах, а также в ответственных узлах летательных аппаратов.

Основным конструктивным элементом гофрированной панели является конструктивный рельеф в виде рифтов и впадин (зигов). В поперечном сечении он может иметь различный профиль: треугольный, трапецидальный, прямоугольный, синусоидальный и другой, в зависимости от назначения и требований, предъявляемых к изделию. Жесткость и надежность работы панели зависят от формы и параметра рельефа, механических характеристик применяемого материала, а также факторов, определяемых технологическим процессом штамповки: неравномерностью утонения металла по сечению рифта и повышением прочностных характеристик материала за счет упрочнения (наклепа). Последние два фактора определяются температурно-скоростными условиями и схемой деформации, которые в свою очередь зависят от вида применяемого оборудования.

Наиболее приемлемыми материалами для изготовления гофрированных листовых панелей летательных аппаратов с точки зрения эксплуатационных характеристик являются высокопрочные конструкционные коррозионно-стойкие нержавеющие сплавы типа ВНС2 и СНЗ, имеющие предел прочности в поставке более 1000 МПа. Однако их применение зачастую сдерживается малой пластичностью. В связи с изложенным актуален анализ других имеющихся материалов, в частности, сплава ЭИ 878 (12Х17Г9АН4), который по сравнению с указанными сплавами имеет меньшие прочностные характеристики, но более высокие показатели пластичности. Его химический состав приведен в табл. 1, а механические характеристики в табл. 2.

Таблица 1

Материал	Основные компоненты, %							
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>N</i>
ЭИ 878	≤0,12	8,0-10,5	16-18	3,5-4,5	≤0,8	0,02	0,035	0,15-0,25

Таблица 2

Материал	σ_B , МПа	σ_T , МПа	ψ , %	δ , %
ЭИ 878	800	515	54	42

Основной операцией получения местных углублений и выпуклостей в виде зигов в листовых заготовках является формовка. Формообразование осуществляется за счет утонения материала, и схема напряженного состояния близка к схеме двухосного растяжения.

Технологический опыт отечественного и зарубежного изготовления листовых гофрированных панелей позволяет выделить определенные виды технологических процессов при изготовлении высокопрочных нержавеющей сплавов. К ним относятся штамповка на листоштамповочных молотах в металлических свинцово-цинковых штампах и гидравлических специализированных прессах эластичной полиуретановой средой в контейнере на жесткой матрице (форм-блоке).

При штамповке на листоштамповочном молоте элементы жесткости получают постепенно за несколько переходов, при этом верхний инструмент своими гребнями концентрированно воздействует на заготовку, лежащую на нижнем инструменте (рис. 1). С целью предотвращения возникновения складок в формируемой заготовке на нижнем инструменте по его периметру выполняются технологические пороги, на которые стопкой укладываются технологические прокладки. Это обеспечивает уже на первом переходе защемление заготовки по ее периметру, при этом на каждом последующем переходе убирается очередная прокладка

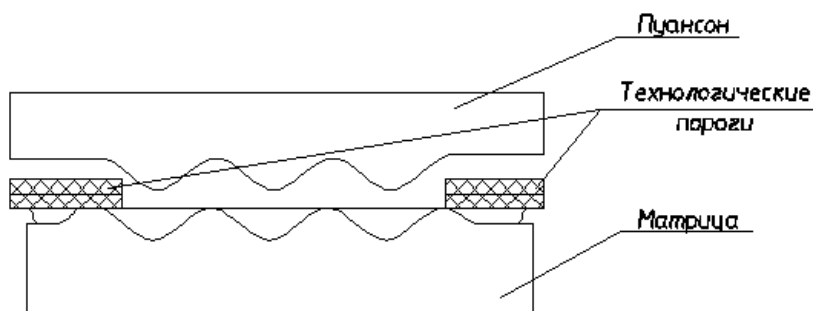


Рис. 1. Схема штамповки гофрированных панелей на листоштамповочном молоте в металлическом штампе

При штамповке на гидравлическом прессе (рис. 2) по ходу процесса первоначально происходит защемление заготовки эластичной средой как по гребням матрицы, так и по ее периметру. При этом процесс штамповки на прессе имеет техническую возможность постепенного увеличения давления эластичной среды в контейнере. Это в свою очередь позволяет вести формовку в начале процесса без жесткого защемления фланца и с подтяжкой заготовки в зону формовки.



Рис. 2. Схема штамповки гофрированных панелей на жестком форм-блоке эластичной средой на гидравлическом прессе

При анализе научно-технической литературы можно отметить, что, несмотря на то, что исследованию деформированного состояния листового материала в зоне рифта, посвящено достаточно много работ, отсутствуют данные по его сравнению в зависимости от вида технологического процесса, в частности, при штамповке на гидравлическом прессе в жесткой матрице эластичной средой, размещенной в контейнере, и на листоштамповочном молоте в свинцово-цинковом штампе. В силу того, что повышение деформированного состояния материала в процессе как холодной так и горячей операции, влияет на изменение его структурно-механических свойств, очевидна актуальность определения эффекта технологической обработки.

Целью работы:

- исследование деформированного состояния листового материала из сплава ЭИ 878 в зоне элемента жесткости (рифта) гофрированной панели, полученного штамповкой на специализированном гидравлическом прессе на жестком форм-блоке эластичной средой, размещенной в контейнере, в холодном состоянии и на листоштамповочном молоте в свинцово-цинковом штампе с нагревом;
- определение эффекта технологической обработки на изменение механических характеристик сплава ЭИ 878 в зависимости от вида обработки.

В качестве исследуемой детали была взята гофрированная панель из сплава ЭИ 878 толщиной 1 мм, размерами 500 × 320 мм в плане, с плоской стенкой и параллельными рифтами (рис. 3), имеющими поперечную синусоидальную форму (рис. 4).

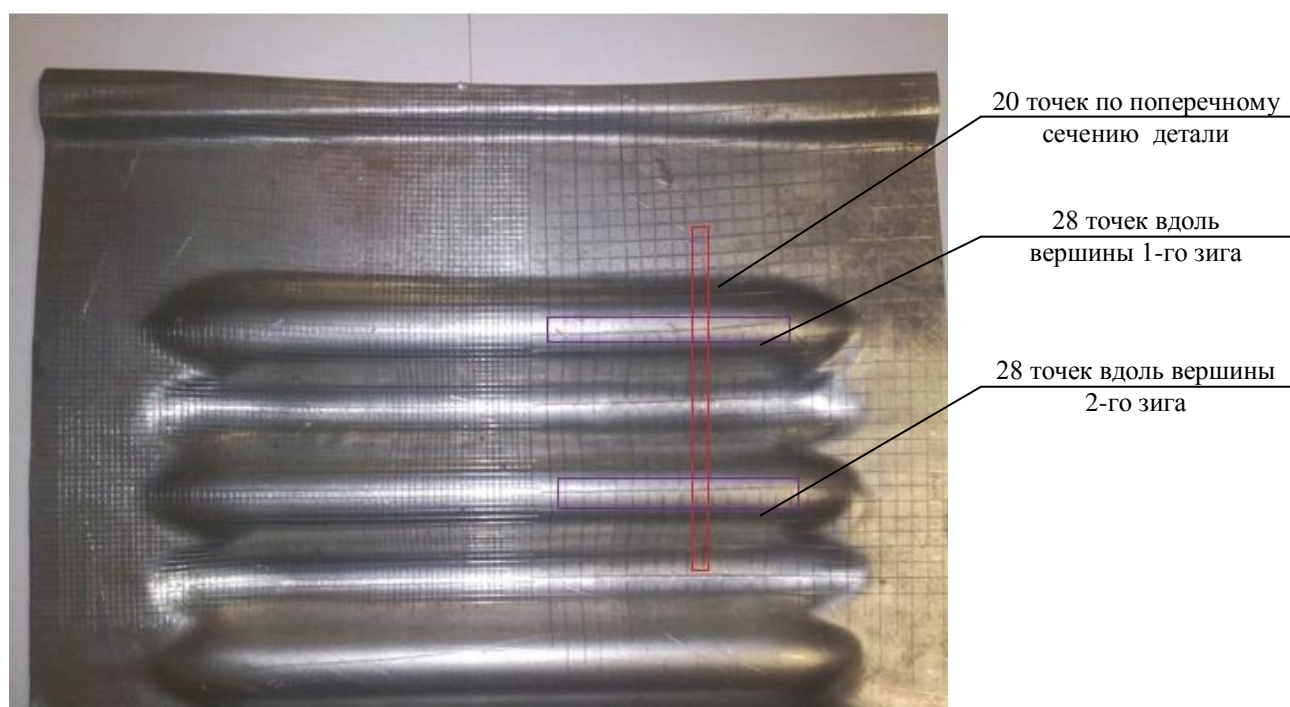


Рис. 3. Сетка на зигах гофрированной панели после штамповки

Для определения деформированного состояния в зиге отформованной листовой гофрированной панели была применена методика Г.А. Смирнова – Аляева [1]. На поверхность исходной заготовки была нанесена сетка с квадратными ячейками размером 5 × 5 мм. После штамповки проводились замеры измененной ее геометрии, на основании которых по приведенным выражениям были рассчитаны основные показатели деформированного состояния: значения главных компонент ε_x , ε_y и интенсивности итоговой деформации ε_i .

$$\varepsilon_x = \ln \frac{a}{a_0} \text{ и } \varepsilon_y = \ln \frac{b}{b_0}, \quad (1)$$

где a, b – размеры сетки (длина и ширина ячейки) до и после формовки,

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \frac{1}{3}(\varepsilon_x + 2\varepsilon_y)^2} . \quad (2)$$

Замеры размеров сетки на поверхности отформованного рифта производились через замеры отпечатков на тонкой промежуточной ленте (типа скотча), которая на нее наклеивалась, а далее разворачивалась при замере на микроскопе МИМ-7. Предварительно для получения отпечатка на поверхность зига наносилась графитовая смазка.

Для исследования деформированного состояния в зигах панели было взято 20 точек по поперечному сечению, 28 точек вдоль вершины 1-го зига и 28 точек вдоль вершины 2-го зига. В соответствии с выбранными точками замерялась толщина заготовки после деформации.

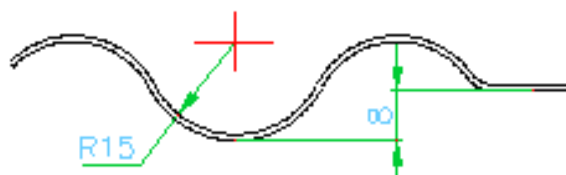
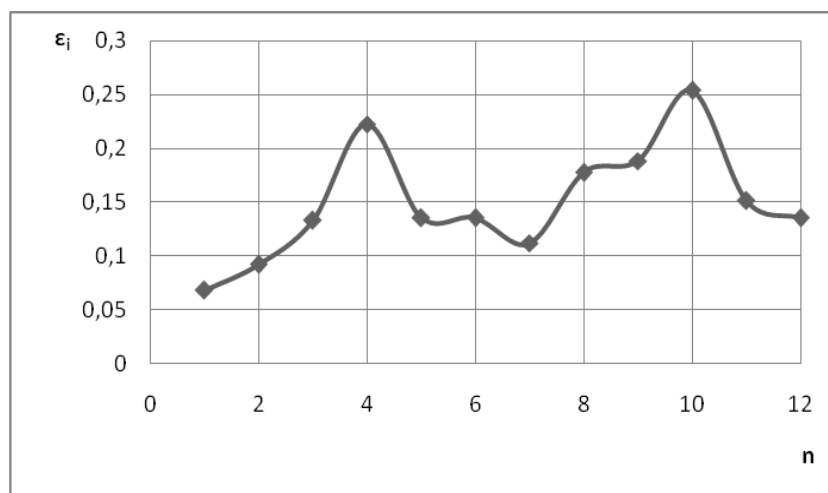
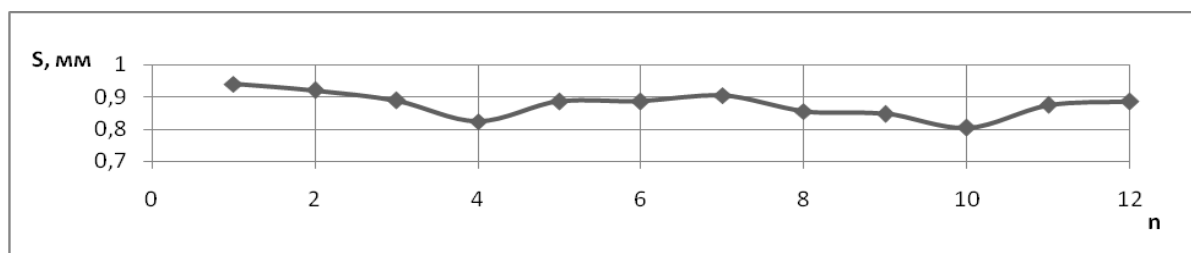


Рис. 4. Форма и геометрические параметры поперечного синусоидального сечения зига

На основании полученных данных построены графики изменения интенсивности итоговой деформации и толщины заготовки по поперечному сечению при штамповке на гидравлическом прессе (рис. 5) и листоштамповочном молоте (рис. б).

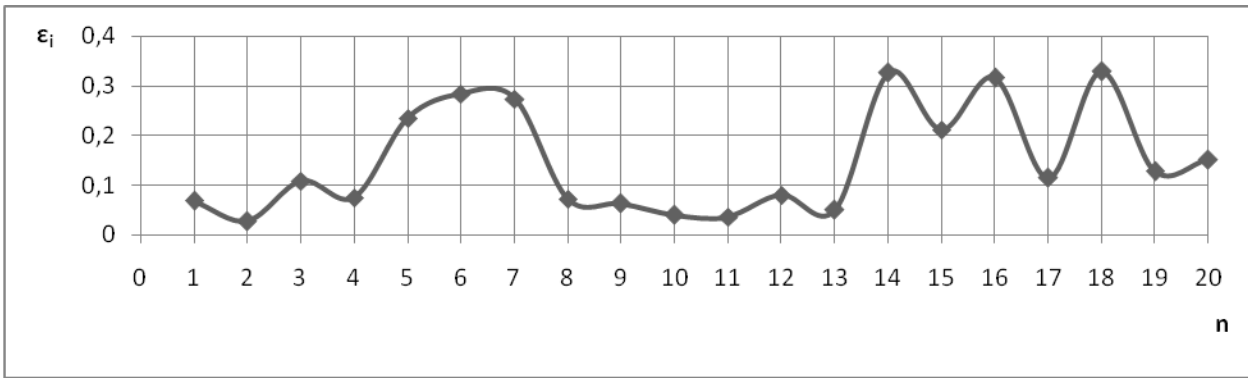


а)

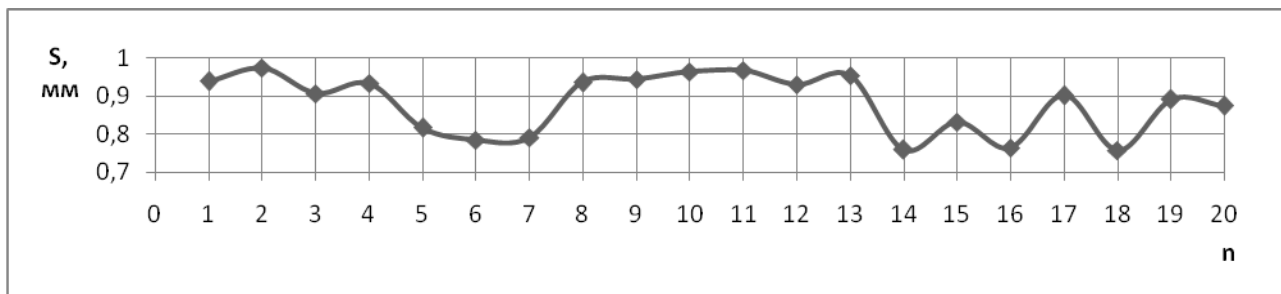


б)

Рис. 5. Графики изменения интенсивности итоговой деформации (а) и изменения толщины заготовки (б) по поперечному сечению гофрированной панели при штамповке на гидравлическом прессе



а)



б)

Рис. 6. Графики изменения интенсивности итоговой деформации (а) и изменения толщины заготовки (б) по поперечному сечению гофрированной панели при штамповке на листоштамповочном молоте

Механические испытания включили испытания на статическую прочность (ГОСТ 1497-61) на универсальной разрывной машине Amsles силой 100 КН при комнатной температуре. Плоские образцы вырезались из зоны зига: по наклонной поверхности, по впадине и по вершине (рис. 7). Их расположение и индексация приведено в табл. 3.

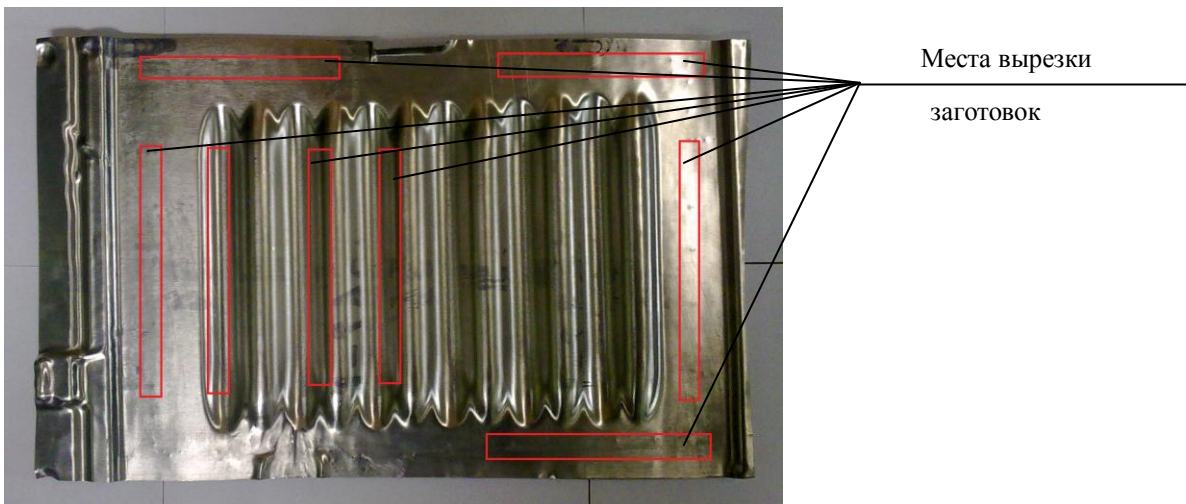


Рис. 7. Места вырезки заготовок в штампованных гофрированных панелях для образцов структурно-механических испытаний

По результатам статических испытаний были рассчитаны механические характеристики, значения которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Расположение зон вырезки образцов структурно-механических испытаний

Зона вырезки образца	Гидравлический пресс	Листоштамповочный молот
Боковая поверхность рифта	1a1, 1a2, 1a3	161, 162, 163
Впадина рифта	2a1, 2a2, 2a3	261, 262, 263
Вершина рифта	3a1, 3a2, 3a3	361, 362, 363

По результатам статических испытаний были рассчитаны механические характеристики, значения которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Механические характеристики образцов

Параметры Образцы	№ образца	Толщина, мм	Ширина, мм	Площадь, мм ²	Нагрузка, кгс	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Длина после разрыва, мм	Предел текучести, МПа
Образцы после деформации на гидравлическом прессе	1a1	0,78	10,6	8,26	640	775	53	46	470
	1a2	0,78	10,5	8,19	630	770	50	45	480
	1a3	0,78	10,5	8,19	640	780	53	46	500
	2a1	0,67	12,5	8,37	810	970	27	38	880
	2a2	0,69	12,5	8,62	795	920	33	40	820
	2a3	0,70	12,0	8,40	750	890	33	40	800
	3a1	0,71	12,7	9,01	730	810	40	49	680
	3a2	0,70	12,7	8,89	800	900	31	46	710
	3a3	0,72	12,6	0,07	776	855	40	49	720
Образцы после деформации на молоте	161	0,78	10,5	8,19	560	805	37	41	560
	162	0,78	10,6	8,26	640	775	40	42	540
	163	0,78	10,5	8,19	650	790	27	38	550
	261	0,75	12,8	9,60	660	-	-	-	-
	262	0,73	12,7	9,27	765	825	30	455	650
	263	0,71	12,3	8,73	745	850	43	500	680
	361	0,75	12,3	9,22	755	820	43	50	600
	362	0,71	12,3	8,73	745	850	43	50	660
	363	0,75	12,2	9,15	750	820	50	52,5	600

Полученные результаты исследования деформированного состояния листового материала в зоне элемента жесткости (рифта) гофрированной панели свидетельствуют о неравномерности распределения деформации по толщине заготовки в поперечном сечении рифта при штамповке по обоим технологиям на прессе и на молоте. При этом имеет место следующее отличие: при штамповке на прессе материал, расположенный по вершинам рифта, имеет меньшее утонение, а на наклонной плоскости большее по сравнению со штамповкой на молоте. Кроме того, при штамповке на прессе имеет место более равномерное утонение металла

по всему поперечному сечению рифта. Причиной этого является принципиальное отличие схем штамповки, приведенных на рис. 1 и рис. 2. Во-первых, при штамповке на прессе отсутствует жесткое защемление заготовки по ее периметру, во-вторых, имеет место равномерность прилагаемых сил по поверхности заготовки с постепенным их увеличением, в отличие от резких концентрированных контактных нагрузок молотовой штамповки, а также меньшая скорость деформирования материала.

Результаты механических испытаний дают четкую картину распределения механических свойств в исследуемых зонах детали. При штамповке на прессе получаем упрочнение до требуемого значения $\sigma_{\text{в}} \approx 900$ МПа. При этом наибольшее значение 970 МПа соответствует зоне впадины рифта. При штамповке на молоте предел прочности повышается только до 850 МПа и также соответствует зоне впадины рифта. Очевидно, что причиной полученных результатов является упрочнение металла при холодной штамповке на прессе и неполное – при штамповке на молоте с нагревом.

Выводы

1. Деформированного состояния листового материала в зоне элемента жесткости (рифта) гофрированной панели характеризуется неравномерностью распределения деформации по толщине заготовки в поперечном сечении при штамповке по обеим технологиям на прессе и на молоте, при этом при штамповке на прессе имеет место меньшее и более равномерное утонение материала;

Прочностные характеристики листового материала из сплава ЭИ 878 в зоне элемента жесткости (рифта) гофрированной панели при штамповке на гидравлическом прессе на форм-блоке в полуретановом контейнере за счет упрочнения достигают требуемой величины $\sigma_{\text{в}} \approx 900$ МПа .

-
1. **Смирнов-Аляев, Г.А.** Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 .

*Дата поступления
в редакцию 14.07.2011*

V.V. Galkin, E.G. Tereshchenko, A.A. Derbenyov, E.A. Gorbachyov

USE OF ALLOY ЭИ 878 IN MANUFACTURING OF THE SHEET GOFFERED PANELS

The estimation of influence of temperaturno-speed conditions and the punching scheme on distribution of the deformed condition and change of mechanical characteristics of a sheet material from alloy ЭИ 878 goffered panels in a zone рифта is given at punching on a hydraulic press on rigid forms – the block by a polyurethane placed in the container, and on листоштамповочном a hammer in a svintsovo-zinc stamp.

Key words: the sheet goffered panel, distribution of the deformed condition of metal, a constructive relief - zig.

УДК 623.4.01

В.П. Кожемякин¹, Н.И. Бондаренко,¹ В.И. Котельников²

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Нижегородский военный институт инженерных войск¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Проведено сравнение качества обработки поверхностей валов круглым шлифованием и термодинамическим методом при ремонте изношенных деталей военно-инженерной техники. Предложена методика проведения экспериментов. Исследовано влияние режимов шлифования и термодинамической обработки на качество поверхностного слоя (параметры шероховатости поверхности) обработанной детали.

Ключевые слова: стали, механическая обработка резанием, поверхностно-пластическое деформирование, нагрев детали.

Введение

Одной из основных задач ремонта военной техники в чрезвычайных условиях является ускорение технологического процесса восстановления изношенных поверхностей деталей. Традиционная механическая обработка металла резанием добивается заданных параметров качества поверхностей преимущественно на финишных операциях технологического процесса шлифованием. В частности, шейки валов под кольца подшипников качения подвергаются операциям круглого шлифования. Данный процесс трудоемок, связан с использованием специального оборудования. Абразивные инструменты для круглого шлифования изготавливаются в виде кругов, дисков, сегментов и брусков различной формы. Типы шлифовальных кругов регламентированы ГОСТ 2424-83. К наиболее широко применяемым типам относятся: прямой профиль (условное обозначение - 1), чашечный цилиндрический (6), чашечный конический (11) и тарельчатые (14).

Абразивный инструмент в процессе работы подвержен износу. Величина и скорость износа влияет на качество обработки поверхностей детали. Износ круга вызывает нарушение правильной геометрической формы его рабочей поверхности: при этом возможно появление огранки, овальности, криволинейности образующей, неплоскостности, волнистости. Эти отклонения снижают точность обработки и ухудшают эксплуатационные показатели качества обработанной поверхности. Изнашивание абразивного инструмента заключается в постепенном отделении частиц рабочего слоя, приводящее к уменьшению его массы и размеров при абразивной обработке. Скорость изнашивания абразивного инструмента определяется отношением потери массы абразива к времени, в течение которого износ произошёл. Снижение качества поверхности шлифуемой детали происходит также в результате затупления либо засаливания инструмента.

Затупление абразивного инструмента – образование площадок на поверхности абразивных зерен, приводящее к изменению профиля рабочей поверхности и уменьшению режущей способности абразивного круга при абразивной обработке металла. Абразивные круги в процессе работы могут засаливаться. **Засаливание** – перенос на рабочую поверхность круга частиц шлама при абразивной обработке. Шлам включает частицы обрабатываемого материала, инструмента, СОЖ и др. С целью ликвидации затупления и засаливания круги периодически подвергают правке. В зависимости от требований к точности и шероховатости обрабатываемой поверхности выделяют алмазную и безалмазную правку. На правку расходуется от 40 до 80% рабочего слоя абразивных кругов. Затраты времени на правку могут достигать 40% штучного времени обработки и более.

Данное исследование проводилось на деталях типа вал. При ремонте ВИТ валы могут иметь следующие дефекты:

- износ и задиры посадочных шеек;
- износ и смятие рабочих поверхностей шпоночных канавок, шлицев, резьбы;
- погнутость и скручивание вала;
- трещины и изломы.

Перед началом ремонта вала проверяется состояние центровых отверстий и при необходимости их восстанавливают повторным засверливанием либо шлифованием (допускается вручную шабером). Скрученность вала более $0,23^\circ$ на 1 м длины считается недопустимой, и вал выбраковывается. Валы и оси с дефектами в виде выкрашиваний и больших задиров могут быть наплавлены электрической либо газовой сваркой. Прогиб вала или оси диаметром до 80 мм устраняют правкой в холодном состоянии, а свыше 80 мм с нагревом.

Посадочные шейки валов могут быть также восстановлены до номинальных размеров путем наращивания металлизацией, электрическим покрытием, полимерами, способами пластической деформации, напрессовыванием втулок с последующей механической обработкой резанием. Допускается восстанавливать посадки сопряжений обработкой поверхностей на ремонтные размеры. Наиболее широко используется наплавка изношенной поверхности с последующим точением. Трещины и сколы заваривают с последующим обтачиванием. Наплавка может выполняться наложением продольных либо винтовых сварочных валиков. После наплавки вал при необходимости правят, шейки обтачивают и шлифуют на номинальные размеры. Посадочные шейки под обоймы подшипников качения с износом по диаметры до 0,1–0,2 мм восстанавливают пластическим деформированием поверхностного слоя. При восстановлении шейки вала напрессовкой стальной втулки необходимо предварительно обточить вал, чтобы толщина стенок втулки была не менее 3 мм.

Шлицевые поверхности валов могут иметь износ, смятие и выкрашивание рабочих поверхностей. Шлицевую часть вала диаметром более 80 мм наплавляют ручной или автоматической наплавкой продольными валиками. Шлицевые поверхности с шириной шлицев до 5 мм чаще заваривают сплошь. При незначительном износе по ширине шлиц (0,1 – 0,2 мм) валы восстанавливают раздачей шлиц или электроискровым исправлением боковых поверхностей с последующей их шлифовкой. В отдельных случаях сильно изношенный шлицевой конец отрезается. На место среза приваривается заготовка с большим диаметром. Затем приваренную заготовку на конце вала обтачивают и нарезают новые шлицы на шлицефрезерном станке методом обката. Шлицы шлифуют и закаливают.

Шпоночные пазы могут иметь такие же неисправности, как и шлицы. Шпоночный паз при износе менее 15% его ширины расширяют под ремонтный размер фрезерованием.

Если увеличением ширины паза не восстанавливается его геометрическая форма, то фрезеруют новый паз, смещенный на 90 или 120° к поврежденному, а старый заваривают. На валах крупных размеров паз наплавляют с одной стороны, а затем фрезеруют.

При незначительных смятиях и наличии заусенцев резьбы исправляют прогонкой плашкой на токарном станке или слесарной обработкой вручную. При значительном износе профиля и при срыве ниток резьбовую часть наплавляют с последующей обточкой шейки и нарезанием резьбы требуемого размера. Иногда старую резьбу срезают и на ее месте нарезают новую уменьшенного размера.

Из перечисленного перечня видов восстановления поверхностей была выбрана наплавка изношенной поверхности с последующей механической обработкой резанием и термодинамическим методом.

Материалы и методика экспериментов

Наплавка производилась сварочными электродами либо сварочной проволокой той же марки стали, что и у ремонтируемой детали. Обработка наплавленных шеек вала холодным резанием проводилась точением на токарном станке 16К20 с последующей шлифовкой на

круглошлифовальном станке. Термодинамическая обработка проводилась на токарном станке с использованием для нагрева пламени ацетиленокислородной горелки. Поверхностно-пластическое деформирование (ППД) проводилось охлаждаемым водой роликом с регулируемой величиной давления на обрабатываемую поверхность. Степень нагрева поверхности перед ППД изменялась в широких пределах изменением времени нагрева и расстояния высокотемпературного ядра пламени горелки над нагреваемой поверхностью. Установка для исследования процесса резания с нагревом и ППД представляла собой токарный станок с навесным оборудованием. Экспериментальная установка схематически показана на рис. 1.

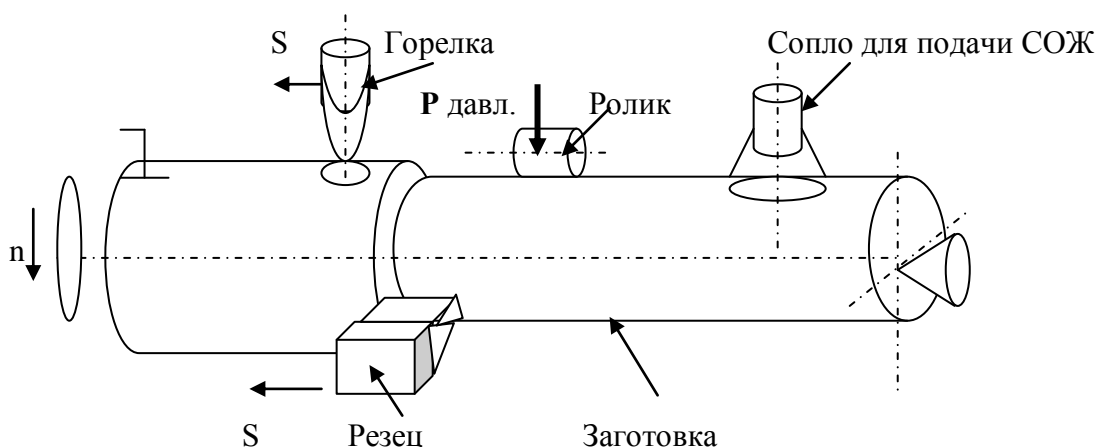


Рис. 1. Схема термодинамической обработки нагретой поверхности детали

Заготовка зажималась на станке в трехкулачковом патроне с поджимом центром задней бабки. Стандартная ацетилен-кислородная горелка снабжена редуктором, расход газа в котором автоматически регулируется. Она смонтирована на продольном суппорте токарного станка перед режущим инструментом с противоположной от детали стороны. Роликовый накатник размещался на том же продольном суппорте станка за режущим инструментом. Настройка накатника на нужный режим давления производилась по встроенному динамометру винтовой парой. Сопло для подачи СОЖ на поверхность детали располагалось за накатником с противоположной от резца стороны.

Параметры шероховатости, полученные в результате обработки сравниваемыми методами, исследовались под двойным микроскопом Линника либо сравнивались со стандартными образцами шероховатости. Точность получаемых размеров замерялась микрометром. Величины допустимых отклонений определялись математическими вычислениями разницы замеров диаметров шеек в различных плоскостях сечения.

Полученные результаты исследования

Шероховатость поверхности формируется в процессе механической обработки резанием и зависит от физико-механических свойств материала заготовки и режущего инструмента, режимов резания, геометрии режущей грани инструмента, величины вибрации (частоты и амплитуды) при холодном резании, образующегося на резце нароста, температуры резания и ряда других факторов.

Затупление режущей кромки инструмента вызывает увеличение радиуса округления при вершине, что повышает степень пластической деформации металла поверхностного слоя и приводит к росту шероховатости поверхности. Резание резцом сопровождается смятием материала, который частично упруго восстанавливается, и увеличением трения по задней поверхности резца. Разница степени упругого восстановления металла выступов и впадин неровностей обычно увеличивает высоту шероховатости.

При холодном резании образуется нарост, который может отрываться с вершины рез-

ца и внедряться в деталь, вызывая резкое его колебание вправо-влево и, как следствие, изменение высотных параметров шероховатости.

В связи с тем, что величина подачи отражаются только на поперечной шероховатости, то её размеры обычно в 2–3 раза превышают продольную шероховатость (ГОСТ 24 773-81). Поэтому оценку обычно производят по величине поперечной шероховатости. Возникновение вибраций при холодном точении металла сопровождается ростом продольной шероховатости, которая может резко возрасти и превысить поперечную шероховатость. Значительно меньшая шероховатость получается при точении нагретого до температуры разупрочнения поверхностного слоя детали.

Как показали многократно повторенные эксперименты, при резании с нагревом отсутствует вибрация системы СПИД. Поэтому процесс резания нагретого до температур разупрочнения металла позволяет получить меньшие параметры шероховатости.

По результатам исследования резания с нагревом и холодного точения металла построены графики зависимости $R_a = f(V)$ параметров шероховатости от температуры и скорости обработки при $S = \text{const}$ (рис. 2).

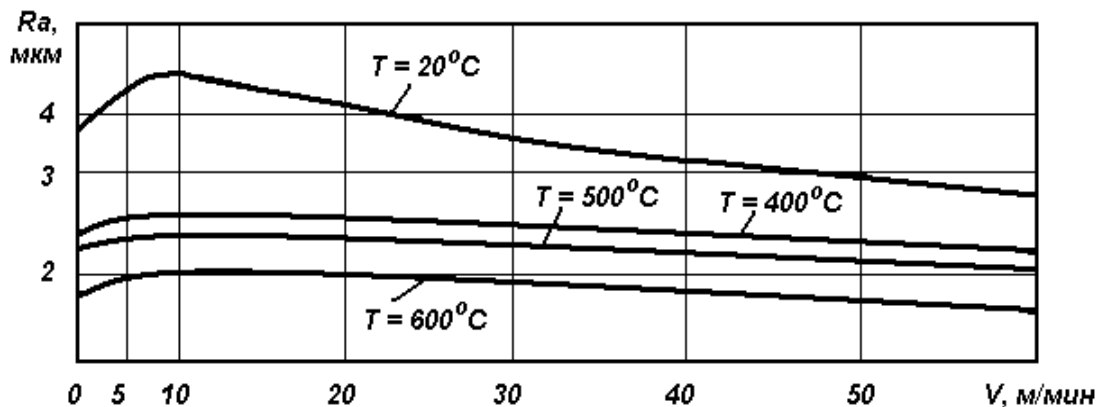


Рис. 2. Зависимость параметров шероховатости стали от скорости обработки при $S = \text{const}$ при холодном резании и обработки с нагревом

Процесс накатывания нагретой до температуры разупрочнения поверхности детали широким охлаждаемым водой роликовым накатником показан на рис. 3.



Рис. 3. Обработки нагретой поверхности детали охлаждаемым водой роликовым накатником с шириной кольца роликового подшипника 11 мм

Смазочно-охлаждающая частично касается нагретой поверхности за накатником, но она не оказывает существенного влияния на охлаждение обрабатываемой поверхности во время ППД. Процесс круглого шлифования шеек наплавленного металла показан на рис. 4.



Рис. 4. Шлифование наплавленного металла на шейку вала абразивом при $V=25$ м/с

Накатывание осуществляли на длине 50 мм, затем менялась величина давления на ролик. Накатывание проводили с продольной подачей. В экспериментах использовали ролик, жестко связанный с закрепленным в резцедержателе режущим инструментом. В этом случае процесс резания с нагревом совмещался с процессом ППД нагретой поверхности детали. С целью изменения величины давления был сконструирован прижимный механизм «винт – гайка». Создаваемое давление замерялось силовым динамометром с пружиной сжатия, градуированным на разбег давлений от 100 до 500 Н.

Круглое шлифование проводили абразивным кругом диаметром 350 мм шириной 45 мм с электрокорундовым зерном. Скорость круга изменяли от 35 до 25 м/с. Шлифование проводили методом врезания с поперечной подачей камня. Перед шлифованием центровые отверстия вала подшлифовывали. Результаты обработки нагретой поверхности детали из ст. 45 резанием с нагревом при различных режимах обработки показаны в табл. 1.

Таблица 1

№ п/п	Режимы резания с нагревом					Режимы накатывания нагретой до 450°C поверхности			Шероховатость
	S , мм/об	t , мм	n , об/мин	T , °C	R_a , мкм	S , мм/об	n , об/мин	P , Н	R_a , мкм
1	0,15	2,0	350	500	1,22	0,15	350	200	0,7
			500		1,8				0,7
			800		1,25				0,6
			1200		1,20				0,6
			1600		1,15				0,5
2	0,28	4,0	350	600	1,30	0,28	350	400	0,5
			500		1,31				0,5
			800		1,29				0,4
			1200		1,28				0,4
			1600		1,26				0,3

Результаты обработки нагретых поверхностей детали из ст. 40Х, обработанных резанием с нагревом при тех же режимах резания и накатывания, приведены в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Режимы резания с нагревом					Режимы накатывания нагретой до 450°C поверхности			Шероховатость
	S, мм/об	t, мм	n, об/мин	T, °C	Ra, мкм	S, мм/об	n, об/мин	P, Н	Ra, мкм
1	0,15	2,0	500	500	1,20	0,15	500	200	0,60
			800		1,20				0,50
			1200		1,15				0,50
			1600		1,15				0,40
2	0,28	4,0	500	600	1,20	0,28	500	400	0,40
			800		1,15				0,35
			1200		1,15				0,30
			1600		1,10				0,25

Как видно из результатов ППД с нагревом, на двух марках металла ст.45 и ст.40Х прослеживаются близкие параметры шероховатости. Причем изменение давления ролика на нагретую поверхность приводит к снижению параметров шероховатости. Как показали эксперименты, увеличение давления выше 1,5 кН приводит к росту шероховатости накатываемой нагретой поверхности. Данное явление можно объяснить налипанием металла на ролик и вырывом частиц металла с поверхности детали при накатывании.

Результаты замеров шероховатости у поверхностей, обработанных резанием с нагревом (исходная шероховатость), накатыванием роликовым накатником по нагретой поверхности пламенем горелки до 450°C, спаренным с режущим инструментом широким охлаждаемым водой роликом, и результатами накатывания холодной поверхности приведены в табл. 3. Как показали эксперименты, в результате накатывания холодной поверхности шероховатость оказалась выше шероховатости накатанной тем же роликом нагретой поверхности.

Таблица 3

Исходная шероховатость поверхности детали Ra, мкм			Шероховатость после обкатки нагретой до 450°C поверхности Ra, мкм			Шероховатость после обкатки холодной поверхности Ra, мкм			
Замеры			Замеры			Замеры			
1	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2,8	2,8	2,8	2,8	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8	0,8
2,8	3,0	3,0	3,0	0,5	0,5	0,6	0,8	0,9	0,8
2,8	2,8	2,7	2,7	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
2,6	2,5	2,4	2,4	0,4	0,3	0,3	0,7	0,7	0,8

Таблица 4

Режимы резания с нагревом проходным упорным резцом					Режимы накатывания поверхности				Шероховатость
S, мм/об	t, мм	n, об/мин	T, °C	Ra, мкм	S, мм/об	n, об/мин	T, °C	Rпр, мм	Ra, мкм
0,15	2,0	800	450	1,25	0,15	800	600	12,5	0,4
		1200	450	1,25		1200	600		0,3
		1600	450	1,25		1600	600		0,2
0,28	4,0	800	500	1,3	0,1	800	700	12,5	0,3
		1200	500	1,28		1200	700		0,2
		1600	500	1,28		1600	700		0,1

Шероховатость поверхности детали из ст. 40Х после ППД охлаждаемым роликом по нагретой до высокой температуры поверхности детали при давлении ролика 500 Н приведена в табл. 4.

Результаты обработки поверхностей холодным резанием (чистовым этапом токарной обработки) и предварительным шлифованием приведены в табл. 5.

Таблица 5

№ п/п	Режимы холодного резания					Режимы холодного шлифования поверхности			Шероховатость, Ra, мкм
	S, мм/об	t, мм	n, об/мин	T, °C	Ra, мкм	S, мм/об	n, об/мин	t, мкм	
1	0,15	0,4	800	20	3,20	0,15	1000	20	0,85
			1200		3,40		1600		0,80
			1600		3,20		2000		0,75
2	0,28	0,2	800	20	3,30	0,08	1000	10	0,60
			1200		3,25		1500		0,55
			1600		3,10		2000		0,55

Из сравнения табл. 4 и 5 видно, что увеличение температуры нагрева поверхности при накатывании приводит к снижению параметров шероховатости. При нагреве поверхности газовой горелкой в интервале 600–700°C величины параметров шероховатости при обработке нагретого металла снижаются почти в два раза по сравнению с холодным накатыванием и ППД нагретой до 450–550 °C поверхности и достигают параметров, получаемых при суперфинишной обработке металла резанием.

*Дата поступления
в редакцию 14.07.2011*

V.P. Kozhemyakin, N.I. Bondarenko, V.I. Kotelnikov

METAL PROCESSING THERMODYNAMIC METHOD

Made comparison of quality surface finishing roll grinding and thermodynamic method for repairing parts of the military-engineering technics. The technology of experiment o is given . The effect of grinding regimes and thermodynamic treatment on the quality of the surface layer (surface roughness) of treated parts is explore.

Key words: steel, mechanical machining, surface-plate mechanical deformation, heating parts.

УДК 373.167.1:57

Ю.Г. Кабалдин

КВАНТОВЫЙ ПОДХОД К ЭВОЛЮЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

(Нижегородская сельскохозяйственная академия)

Предложены квантовые модели возникновения жизни и эволюции эмбрионального развития живого организма. Утверждается, что первые элементы живого (в частности, аминокислоты и т.д.) адсорбировались на космической пыли, выполняющей роль катализатора, и подвергались поляризованному излучению света. Далее змёрзшая пыль опускалась на землю, формируя мембрану протоклетки в водной среде, где в ней реализовывался биогенез других органических веществ. Обоснована квантовая модель мейоза и морфогенеза эмбриона от зиготы до новообразований путём телепортации ДНК её квантового состояния.

Ключевые слова: возникновение жизни, морфогенез, телепортация квантового состояния ДНК

Начало жизни – возникновение, прежде всего, биополимера ДНК из случайного, на первый взгляд, но детерминированного законами физики и набора биологически важных молекул, уже возникших на предбиологическом этапе эволюции материи [1–4]. Структура ДНК и ее функции – воплощение информационной доминанты в возникновении и эволюции жизни. Жизнь есть способ сохранения и эволюционного накопления информации о структуре Вселенной.

Некоторые особенности живой материи стимулировали поиск механизмов их возникновения в процессе перехода от неживого к живому. В частности, тот факт, что структуры ДНК и РНК правохиральны, а ферменты (белки) состоят из левохиральных аминокислот, инициировало работы, стремящиеся выяснить, каким образом в процессе эволюции биологические вещества стали монохиральными и на какой стадии – химической или предбиологических эпох. До настоящего времени этот вопрос не решён.

Мы являемся сторонниками гипотезы абиогенеза, предполагающей происхождение жизни путём усложнения продуктов неорганической природы и возникновения биополимеров, которые приобретают основные свойства (информацию) живого и способность к обмену веществ (метаболизма), как главному условию их существования. *Однако это произошло не в результате постепенной эволюции неорганического вещества в органическое (нуклеиновые кислоты, белки и др.), как допускают некоторые гипотезы. Нам хотелось бы высказать свою гипотезу редукции квантового состояния материи в ранней Вселенной, т.е. квантового скачка (объективной редукции), определившего переход от неживой природы к живой, а дальнейшая эволюция материи определила в условиях Земли усложнение органических молекул, приведших к появлению ДНК, РНК, белков и т.д.*

Необходимо отметить резко проявляющееся в полимерных биомолекулах диалектическое единство асимметричного и симметричного, иррегулярного и регулярного строений. В белках естественного происхождения это проявляется, например, в асимметричности и нерегулярности их первичного строения (из-за уникальной линейной последовательности различных L и реже D аминокислот), в симметричности и регулярности их вторичного строения (часто из-за винтового закручивания всей или части полипептидной цепи), в резкой асимметричности и нерегулярности их третичного строения (из-за сложения полипептидной цепи – поодиночке или в соединении с другими цепями в причудливые извитые трёхмерные структуры, которые мы знаем как белковые молекулы), в столь же резкой симметричности и регулярности их четвертичного строения (из-за укладки идентичных белковых молекул в кристаллические и квазикристаллические структуры). Аналогично обстоит дело и с нуклеиновыми кислотами, в частности, первичная структура «молекулы жизни» - ДНК асимметрична и нерегулярна из-за уникальной последовательности нуклеотидов, в то время как её

вторичная структура явно симметрична и регулярна из-за винтовой закрученности двух её цепей [9], а также слабых водородных связей между нуклеотидами.

Таким образом, в окружающем нас растительном и животном мире фундаментальные симметрии нарушены. Например, большинство раковин закручено преимущественно в одну сторону. Л. Пастер усмотрел в диссимметрии, т.е. в нарушении симметрии, характерную особенность жизни. Как указывалось, молекула самой важной нуклеиновой кислоты - ДНК имеет форму винтовой линии, закрученной вправо. Как возникает такая диссимметрия?

Нарушение симметрии живой материи связано с её фундаментальными свойствами (строением). Следовательно, изменения симметрии, например ДНК, связано с ростом ее массы (размеров) в процессе её эволюции. Нарушение симметрии следует рассматривать как редукцию её квантового состояния. В работе [9] показано, что ассиметрия молекул жизни осуществлялась ещё в космосе в результате мощного излучения звёзд, которое следует рассматривать как редукцию их квантового состояния.

Подтверждением сказанного служит то обстоятельство, что в лабораторных условиях D- и L-изомеры (например, белки) создать нельзя. Это свойство только живой материи, отличительным признаком которой является наличие у неё памяти (информации). Поэтому D- и L- формы ДНК и белков уже формировались на стадии предбиологической жизни как результат эволюции молодой Вселенной.

Нами обоснована гипотеза [8] возникновения живого, согласно которой его первые элементы (в частности, аминокислоты), адсорбировались на космическую пыль, выполняющую роль катализатора, и подвергались поляризованному излучению света [9], например звёзд. Далее замёрзшая пыль опускалась на землю (в водную среду), формируя мембрану протоклетки, стимулируя в ней биогенез других органических веществ. Подтверждением возможности реализации такого механизма возникновения жизни является то, что к подобной модели пришли и итальянские учёные [7]. Однако в нашей модели [8], опубликованной ранее, мы существенно развили её в настоящее время с учётом работы [9].

Современные ферменты, участвующие в репликации ДНК это тысячи аминокислот. Начиналось же все, по-видимому, со случайного склеивания каких-нибудь 5-10 аминокислот. Однако цепочки аминокислот не могли себя воспроизводить, не могли размножаться. Два важнейших свойства, необходимых для эволюции, - способность к упорядочению и способность к воспроизведению - оказались разделены между двумя классами органических структур. Но в конце концов произошло «чудо». Аминокислоты стали воспроизводиться опосредованно - через нуклеотидные структуры. Так, по мнению Галимова [2], началась эволюция жизни, и появился генетический код.

На рис.1 приведена схема, которая, на наш взгляд, может иллюстрировать эволюцию метаболических процессов, положивших начало зарождения жизни в протоклетке.

За её основу взяты сопряжённые процессы, которые, согласно [2], обеспечили начало эволюции жизни. На первом этапе (рис. 1) аминокислота взаимодействует с АТФ, излучающей $h\nu$ -квант энергии, образуя промежуточное соединение аминокиладенилат. АТФ распадается при этом с образованием пирофосфата, гидролиз которого делает этот этап необратимым. Однако, эти процессы ещё не могут обеспечивать явление репликации, т.е. самовоспроизведения белков.

Центральным и трудным для ответа является вопрос о происхождении ядра клетки. Предполагается, что оно могло образоваться из симбионта-прокариота. В этой связи, существует инвагинационная гипотеза, объясняющая появление ядра, митохондрий и других органелл.

Синтез жирных кислот, составляющих основу мембраны, протекал абиогенно. На такую возможность указывали ещё опыты Миллера и Ури. Молекулы сложных жирных кислот (липидов) синтезируются из молекул жирных кислот и глицерина. Жирнофильное соединение только одной своей стороной (концом) соединяется с водой, другая часть не связана с ней. Через мембрану клетка общается с внешней средой, для этой цели у неё имеется система

каналов. Мембрана имеет, как правило, круглую форму – сферу. Это неудивительно, поскольку поверхностное натяжение и вязкость позволяют создать именно такую форму.

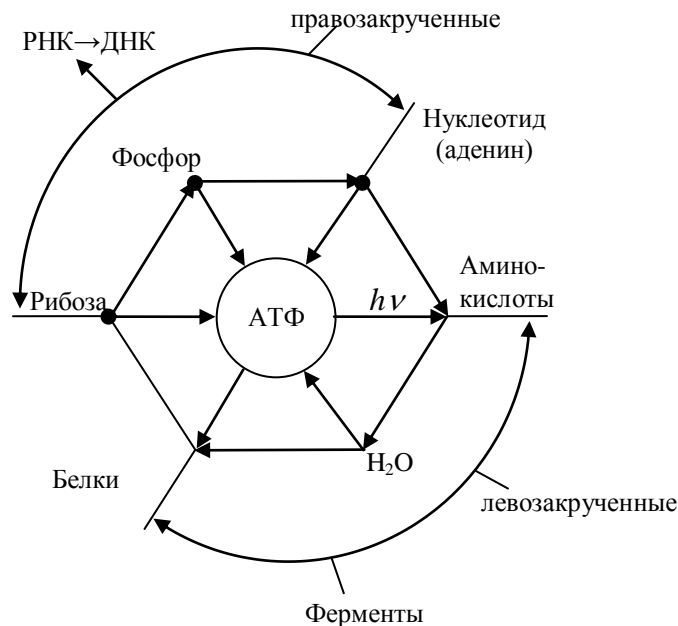


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая эволюцию метаболических процессов в протоклетке

Далее мы полагаем [8], что молекула АТФ, определяющая протекание метаболических процессов, являющаяся нуклеотидом (рис.1) и содержащая фосфор, сахар и азотистое основание (аденин), могла стать матрицей для формирования небольших первичных структур (молекул) типа РНК.

Конкретная проблема, на которой мы далее сосредоточимся, – это управление эмбриональным развитием живого, эволюция которого представляет собой последовательность событий, ведущих от отдельной клетки – оплодотворённого яйца – к целому организму, посредством передачи генетической информации от ДНК.

Генетическая информация – это одна из самых сложных информационных взаимодействий, в результате которого возникает направленное временное и пространственное перемещение. Поэтому информационное взаимодействие в биологии, например, при формировании цыплёнка из яйцеклетки, когда в процессе взаимодействия информация координирует в строгой последовательности сотни химических реакций, проследить чрезвычайно трудно. Но результат получаем тот же – каждая вновь созданная клетка занимает в организме строго своё пространственное положение. И это положение определяется той памятью – генетической памятью, которая возникла в процессе эволюции. *Информация, которую несёт эта память, формирует управляющую информацию в самом процессе информационного взаимодействия при реализации, заложенной программы.* Эволюция живой природы обусловлено, в том числе новым видом информационного взаимодействия – управляемым информационным взаимодействием. И управляющую роль во всех этих процессах играет вторичная информация. Химические реакции в присутствии катализатора или биологические реакции в присутствии ферментов – это тоже пример информационного взаимодействия.

По-видимому, вторичную информацию несет не только электромагнитное поле, но и другие поля. Информационный дуализм универсален для информационного взаимодействия любого поля с веществом, проявляющегося в управлении направленностью движения.

Естественно спросить: «А какой главный критерий отбора создаваемых природой сложных форм в живой материи?» Критерий один – это длительность существования, устой-

чивость созданных свойств форм во времени, создание длительно функционирующей информации.

В этой связи нельзя не сказать о таком достижении в эволюции, каким является самовоспроизведение любой созданной формы жизни. Увеличение количества созданных форм во времени, или размножение, – это одно из главных свойств живой материи. И происходит это на базе созданной генетической информации в процессе эволюции.

Репликация – процесс самовоспроизведения макромолекул нуклеиновых кислот, обеспечивающих точное копирование генетической информации и передачу её от поколения к поколению. *Это «изобретение» Природы, развитие информационного взаимодействия, найдено ею на самых ранних этапах появления жизни, как и развитие механизма фотосинтеза, исправно функционирует миллионы лет, обеспечивая воспроизводство жизни.*

Можно только восхищаться, как на базе генетической информации, хранящейся в геноме всего одной клетки, создаются сложнейшие организмы, в том числе и человеческий. При этом, как показывает морфология, в морфогенезе, формообразование живой материи, используются различные виды информационных взаимодействий. Решающее значение в клеточном взаимодействии имеет контактное и дистанционное взаимодействие клеток, которые обуславливают морфогенетические корреляции со стороны всего клеточного окружения. Информационное взаимодействие, по нашему мнению, обеспечивает характерное для морфогенеза сочетание точности с высокими способностями к регуляции, основанное на законах квантовой механики, в частности, квантовой телепортации.

Явление телепортации квантовых состояний основывается на том, что фотоны, электроны и даже атомы могут быть в «запутанном» состоянии. Это означает, что несколько фотонов находятся в состоянии, что если мы меняем квантовое состояние одного из фотонов, мы меняем его у всех других. Причём эти фотоны могут находиться друг от друга насколько угодно больших расстояниях. Изложенное позволяет, во-первых, по новому поставить вопрос о механизме передачи информации, прежде всего, в ее скорости и согласованной координатности наряду с существующим (сигнальным) механизмом как в клетке, так и в целом в живом организме, а во-вторых, представить квантовую модель запутанных состояний в яйцеклетке (рис.2), – телепортацию в ней информации и управление в ней метаболическими процессами и морфогенезом.

В этой связи, высказана гипотеза, что квантовое состояние развития целостного организма передается зиготой новообразованиям при делении клеток путем телепортации, и она является как бы управляющей программой эмбрионального развития организма.

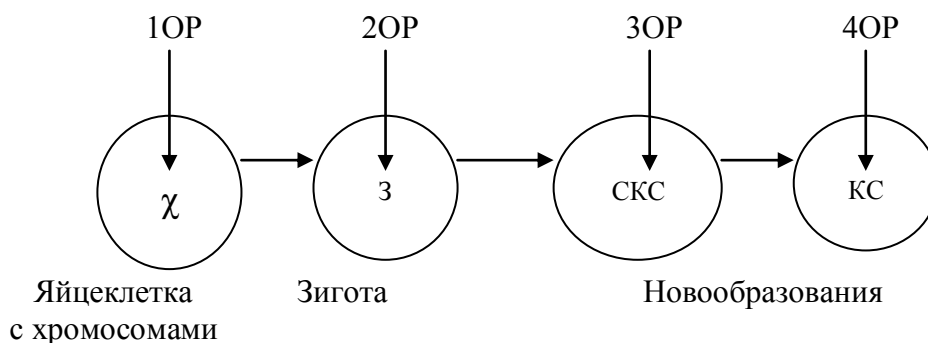


Рис. 2. Схема телепортации квантового состояния ДНК от зиготы к новообразованиям путем ряда последовательных объективных редукций

Основная идея заключается в том, что в квантовой теории существует дуализм элементарных частиц, т.е. это корпускулы и волны, что позволяет трактовать передачу генетической информации как химическим путём взаимодействующих частиц (нуклеотидов, аминокислот и т.д.), так и по волновому механизму. В этой связи в яйцеклетке, содержащиеся в

ней в сцепленном состоянии хромосомы (генетический материал) подвергаются объективной редукции (ОР) с формированием суперпозиции квантовых состояний (СКС). Дальнейшая ОР приводит к образованию зиготы (З) и её делению на новые клетки (КС), сопровождающихся, таким образом, новообразованием (ростом массы).

Таким образом, можно полагать, что в Природе постоянно происходит изменение квантового состояния систем различного происхождения, вследствие ОР. Причём ОР квантового состояния приводит к определённости в системе, в частности, информации.

Как видно на рис. 2, в яйцеклетке хромосомы (χ) сцеплены (запутаны), и при делении первичной (зиготы) они разрываются, т.е. создаётся суперпозиция квантовых состояний (СКС). Интересно отметить, что деление клеток идёт, во-первых, без их увеличения, т.е., имеется конечное число начальных делений клеток, и заканчивается этот процесс созданием восьми клеток. Запутанные состояния обуславливают процесс самоподобного деления клеток и их согласованные действия, а следовательно, и дальнейшее развитие организма, находясь в квантовом единстве.

В работе [3] указывается, что гены ДНК согласованно влияют на активность друг друга в ключевые моменты. По-видимому, такая согласованность генов объясняется тем, что они находятся в едином квантовом состоянии (в единстве), тогда как в зиготе они были запутаны.

Таким образом, живые системы обладают всеми признаками и характеристиками квантовой физической структуры, включая первичное квантование как характеристики живого вещества — клеточных циклов, т.е. периодичностью.

Как указывалось выше, мы связываем морфогенез с процессом телепортации информации о квантовом состоянии сцепленных (запутанных частиц – хромосом) в результате объективной редукции с образованием суперпозиции квантовых состояний (рис. 2). **На наш взгляд, квантовая телепортация новообразований – это передача ценной информации локализованными электромагнитными волнами в виде биосолитонов о квантовом состоянии зиготы новым клеткам, находящимся в запутанном состоянии, т.е. в коллективном взаимодействии (единстве) с зиготой, о целостном развитии организма.** В частности, с использованием тождественных частиц – электронов как фермионов и электронных пар как бозонов (куперовских пар). В этой связи можно даже предполагать, что, например, кровь обладает квантовым свойством – сверхтекучести и свёртыванием (при низких температурах), основанным на образовании из тождественных частиц – электронов, куперовских пар.

В частности, лауреат Нобелевской премии С. Дьерди считал, что в энергетике живой клетки главными действующими элементами являются элементарные частицы электроны и окружающие ядра атомов – электронные облака. В клетке, в котором расположены различные субстраты, обмен информацией за счет электронного обмена может протекать также в цитоплазме.

Объективная редукция суперпозиции квантового состояния (рис.2) зиготы, кроме определённости информации в клетках и телепортации квантового состояния целостного организма, устанавливает нелокальную связь между вновь образовавшимися клетками. Это обеспечивает дальнейшее самоподобное согласованное упорядоченное новообразование, т.е. деление клеток и самоподобное (фрактальное) развитие эмбриона, а также дальнейший рост организма, информацию о его полном развитии, которое осуществляется, как мы уже указывали, по механизму квантовой телепортации.

Сильным аргументом согласованного и самоподобного развития новообразований является наличие ДНК во всех тканях и органах живых организмов.

Возмущение цепочек и излучение акустических сигналов ДНК может быть связано с её расплетением и вращением при репликации. Роль поляризации на вращение линейного поляризованного света как свойство живой материи, указывалась ещё Л. Пастером.

В этой связи мы ещё раз кратко изложим нашу модель передачи генетической инфор-

мации, определяющей морфогенезические процессы целостного организма. Во-первых, согласованная координация новообразований при делении клеток обеспечивается нелокальной связью между ними. Излучение, прежде всего, электромагнитных световых волн как результат ОР квантового состояния ДНК, а еще раньше сцепленных хромосом, обеспечивает как телепортацию квантового состояния ДНК при передаче информации как волновым, так и химическим путем. Квантовое состояние (рис. 2) зиготы при ОР изменяется и передается новым клеткам. Это явление следует рассматривать как самоподобный процесс. Начальный энергетический толчок связан с рекомбинацией после разрыва хромосом после 10P и с расширением зиготы (рис. 2).

Мы считаем, что квантовое состояние любого микрообъекта неотделимо от пространства формы и массы. Таким образом, новообразование – это, прежде всего изменение формы в пространстве и рост массы. Поэтому, подобно сферическому расширению пространства в ранней Вселенной, при телепортации, после ОР оплодотворенной яйцеклетки, передается информационный образ в пространственной форме, приводящий в начале к расширению зиготы, которая, являясь неустойчивой, начинает затем делиться самоподобно на отдельные клетки, в которых клонируется квантовое состояние эмбриона в соответствии с генетической информацией пространственной формы. Наиболее наглядно этот процесс демонстрируется телами Платона [8].

Согласно нашей гипотезе, неустойчивость и излучение ДНК реализуется уже на стадии кроссинговера (рекомбинации) при разрыве сцепленных хромосом, а затем происходит возбуждение ДНК при делении клеток. Нелинейная динамика ДНК в значительной степени определяется при ее расплетении и вращении. Этот процесс можно рассматривать как ОР. В результате осуществляется телепортация информации о квантовом состоянии зиготы новообразованию, т.е. новым клеткам, о чем упоминалось выше. На наш взгляд, сильными аргументами в пользу самоподобного и согласованного действий при новообразовании является наличие ДНК в тканях и органах живых существ.

Таким образом, телепортация квантового состояния включает совокупность процессов, реализующихся при передаче информации о целостном организме при мейозе и в целом морфогенезе. Следует отметить, что рассмотренная модель телепортации ДНК квантового состояния опубликованная нами в 2009 году [9] недавно поддержана Нобелевским лауреатом Л. Монтанье [10], что вызвало оживление в научных кругах.

Завершая настоящую статью, вновь зададимся вопросом, принадлежащим Э. Шрёдингеру [3]: «Основана ли жизнь на законах физики?». Изложенное аргументировано свидетельствует в пользу положительного ответа на этот вопрос. Однако «живая» специфика вносит большое число уточнений в безусловно исполняющиеся в функционировании живых систем физические законы. Эти уточнения обусловлены сложностью биосистем, их термодинамической открытостью, неравновесной устойчивостью, самоорганизацией, нелинейностью и др., тем не менее, ничто нам не препятствует рассматривать живые системы как подчиняющиеся законам квантовой физики [3].

Библиографический список

1. **Островский, В.Е.** О возникновении жизни / В.Е. Островский, Е.А. Кодашевич // Успехи физических наук, 177. 2007. № 183. С. 52–68.
2. **Галимов, Э.** Куда спешат колесики эволюции // Знание сила. 2008. №9. С. 78-89.
3. **Шрёдингер, Э.** Что такое жизнь? С точки зрения физика / Э. Шрёдингер. – М.: Атомиздат, 1972. –156 с.
4. **Блюменфельд, Л.А.** Решаемые и нерешаемые проблемы биологической физики / Л.А. Блюменфельд. – М.: Эдиториал, УРСС. 2002.
5. **Вибе, Д.** Космические молекулы // Знание сила. 2006. №9. С. 86–91.
6. **Пригожин, И.** Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени: [пер. с англ.] / И. Пригожин, И. Стингерс; под ред. В.А. Аршиновой. – М.: КомКнига, 2005. – 232 с.
7. Кто создал жизнь// Знание-сила. 2009. № 10. С. 15.

8. Информация. Наноструктурные процессы во Вселенной и биологии / Ю.Г. Кабалдин [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре, КНАГТУ, 2009. – 336 с.
9. Левосторонняя жизнь и космос // Химия и жизнь. 2011. №3. С. 7.
10. Призрак ДНК бродит по Европе // Nev Scientist. 2011. №3. С. 8–9.

*Дата поступления
в редакцию 21.07.2011*

J.G. Kabaldin

QUANTUM ASPECTS OF THE EVOLUTION OF COMPLEX SYSTEMS

Proposed quantum model of the origin of life and evolution of embryonic development of living organisms. Argued that the first elements of life (in particular, amino acids, etc.) adsorbed on cosmic dust, and acted as a catalyst to pull the polarized emission of light. Next, the frozen dust fell to the ground, forming a membrane protocells in the aquatic environment, where it was implemented biogenesis of other organic substances. Substantiates the quantum model of meiosis and morphogenesis of the embryo from the zygote to tumors by DNA teleportation of quantum states.

Key words: quantum model of the origin of life, morphogenesis, the embryo from the zygote to tumors, DNA teleportation of quantum states.

УДК 53.088.23

С.Е. Пилипосян

УЧЕТ КОРРЕЛЯЦИИ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ T И РАССТОЯНИЯ a ЦЕНТРА МАСС ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА ОТ ОСИ ВРАЩЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Выявление и учет корреляций измеряемых на эксперименте физических величин важны для правильной оценки характера и значений погрешностей проведенных измерений. Надежность оценки погрешностей измерений повышает ценность экспериментальных данных. На примере одной работы показано, что если не учитывать корреляцию периода колебаний T и расстояния a центра масс физического маятника от оси вращения, то это приведет к неправильной оценке погрешностей измерения центрального момента инерции твердого тела.

Приведена зависимость погрешности измерения координат точки центра масс неоднородного твердого тела от его радиуса инерции, условий эксперимента (параметр λ), а также от точности измерения времени и расстояния.

Ключевые слова: коэффициент корреляции случайных величин, погрешности измерения коррелированных величин, оценка физического фона и корреляция величин.

Введение

Механизм развития фундаментальной науки таков, что результаты опыта выступают в роли судьи в процессе оценки справедливости тех или иных теоретических моделей действительности. Критерием справедливости конкретной теоретической модели (из множества существующих) является степень согласия ее предсказаний с результатами эксперимента, где измеряются различные физические величины во всем диапазоне их значений. Поэтому уровень точности измерения физических величин оказывается очень важным. В истории физики известно много случаев, когда доступная в данный момент точность проведенного измерения оказалась недостаточной для обнаружения малого эффекта, связанного с неизвестным явлением, открытие которого происходило, как правило, значительно позже. Созданию самосогласованной, непротиворечивой физической теории предшествует длительный период накопления надежных, заслуживающих доверия опытных данных. Феноменологический анализ экспериментальных данных позволяет отобрать из множества возникающих гипотез и теоретических моделей те, которые более точно отражают реальность.

Именно надежность опытных данных поляризационных экспериментов, проведенных со световыми волнами на монокристаллах позволили Т. Юнгу и О. Френелю утверждать, что световые волны, которые в то время считались колебаниями Эфира, являются поперечными волнами. Предполагаемые механические свойства Эфира с нулевым модулем упругости сдвига (среда, не препятствующая движению тел) никак не согласовывались с возможностью его поперечных колебаний, тем более с частотой видимого света $\nu \approx 5 \cdot 10^{14}$ Гц. Поэтому Ф.Д. Араго, будучи научным руководителем О. Френеля, свою подпись под эту работу не поставил, и, как показали дальнейшие события, напрасно.

Именно надежность имеющихся экспериментальных данных по тепловому равновесному излучению абсолютно черного тела и их противоречие с предсказаниями теории излучения электромагнитных волн в классической электродинамике дали основание Максиму Планку в 1899 году сделать смелое предположение о том, что электромагнитные волны могут излучаться порциями (квантами), обладающими определенной частотой, энергией и длиной волны. Это устранило противоречия, состыковало (зашнуровало) опытные данные по излучению волн в области высоких и низких частот и стало началом новой - квантовой - физики.

Именно огромная и надежная экспериментальная база, на которую в начале двадцато-

го века опирались и классическая механика и уже установившаяся теория электромагнитного поля (благодаря трудам Дж.К. Максвелла, Г.Р. Герца, О. Хевисайда, Х Лоренца, Дж.Г. Пойнтинга, П.Н. Лебедева), не удовлетворяющая принципу относительности Галилея, дали основание Анри Пуанкаре, Х. Лоренцу, М. Гроссману и А. Эйнштейну уверенно искать и, в конечном итоге, создать единую физическую теорию на основе трех всеобщих принципов - принципа относительности, принципа эквивалентности и принципа причинности (близкодействия). Таким образом, были созданы сначала частная теория относительности (1905 г.), а затем и общая теория относительности (1916 г.), после чего отпала необходимость в гипотетическом Эфире. Конечно же, в этом процессе очень важную роль сыграли точные измерения в знаменитом эксперименте Альберта Абрахама Майкельсона и Морли.

Все сообщество исследователей в мире делится на две большие группы – экспериментаторов и теоретиков. Экспериментаторам лучше других удастся провести точные измерения в удачно выбранных экспериментах и таким образом способствовать установлению истины. Теоретикам же лучше удастся установить истину аналитическим путем, как говорится, на кончике своего пера. Иногда теоретическое открытие является не только обобщающим результатом теории и эксперимента, но и метафизическим угадыванием истины, способным предсказывать новые, неожиданные явления, как, например, это имело место в случае общей теории относительности [1].

Поэтому важно как можно точнее оценить характер и величину погрешностей проведенных измерений, обусловленных различными источниками. Зачастую проведение основного измерения оказывается более легкой задачей, чем точная оценка систематических и статистических погрешностей проведенных измерений. Более того, приведенные значения погрешностей должны содержать информацию о доверительной вероятности этих погрешностей [2, 3].

Измеренные (экспериментальные) средние значения физической величины без представления значений допущенных при этом погрешностей, не представляют особой ценности. Эти данные не могут сыграть роль судьбы и не могут быть включены в теоретический анализ экспериментальных данных [4, 5]. Такие экспериментальные данные вызывают недоверие у научной общественности и у теоретиков, в частности.

В крупных научных центрах мира полученные экспериментальные данные обычно сначала анализируются теоретиками этого же центра, а планируемые в будущем важные эксперименты особо не рекламируются. Это позволяет крупным научным коллективам соблюдать свой корпоративный интерес.

Корреляции случайных величин

Величины, подчиняющиеся статистическим законам, называются случайными величинами. Законы эти очень точные и строгие, хотя они описывают поведение той или иной случайной величины. Например, закон радиоактивного распада, излучение кванта электромагнитного поля возбужденным атомом, столкновение частиц и так далее

Произведение, или, совмещение двух событий A и B записывается в виде $A \cdot B$. Под этим понимается такое событие, когда совместно наступают оба события (как A , так и B). Если эти события статистически независимы, т. е. вероятность наступления одного не зависит от того, осуществилось или не осуществилось другое, то $P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B)$. То есть вероятность произведения двух независимых событий равна произведению их вероятностей.

Для независимых случайных величин x и y с непрерывным спектром значений (например, для времени T и расстояния a) имеет место равенство

$$P(x, y) = P(x) \cdot P(y).$$

Ввиду этого соотношения и согласно определению средних значений случайных величин, очевидно, что для независимых случайных величин x и y

$$\overline{(x \cdot y)} = \bar{x} \cdot \bar{y}.$$

Следовательно, для независимых случайных величин x и y :

$$\overline{(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y}-\bar{\mathbf{y}})} = \overline{\mathbf{x}\cdot\mathbf{y}} - \overline{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{x}}\cdot\overline{\mathbf{y}} + \bar{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}} = \overline{\mathbf{x}\cdot\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}} + \bar{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}} = \overline{\mathbf{x}\cdot\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}} = 0.$$

Таким образом, величина (значение) математического ожидания произведения $\Delta\mathbf{x}\cdot\Delta\mathbf{y}$, показывает, насколько сильно (жестко) зависят друг от друга \mathbf{x} и \mathbf{y} .

$$\overline{\Delta\mathbf{x}\cdot\Delta\mathbf{y}} = \overline{(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y}-\bar{\mathbf{y}})} = \overline{\mathbf{x}\cdot\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}} = ?$$

Если величины \mathbf{x} и \mathbf{y} рассматривать как отображающие порознь некоторые подсистемы заданной общей физической системы, описываемой всей совокупностью величин \mathbf{x} и \mathbf{y} , то вероятность общей системы определяется вероятностями подсистем \mathbf{x} и \mathbf{y} , при условии, что эти подсистемы независимы. То есть между подсистемами не существует физических взаимодействий. При наличии взаимодействий, обуславливающих статистическую зависимость подсистем, по вероятностям подсистем в общем случае нельзя определить вероятность для всей общей системы. Поэтому для статистически зависимых случайных величин справедливо условие $\overline{\Delta\mathbf{x}\cdot\Delta\mathbf{y}} = \overline{(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y}-\bar{\mathbf{y}})} = \overline{\mathbf{x}\cdot\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}} \neq 0$.

Величину центрального момента второго порядка $\overline{(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y}-\bar{\mathbf{y}})}$ принято называть «корреляцией» случайных величин \mathbf{x} и \mathbf{y} , поскольку она характеризует взаимосвязь или корреляцию между случайными величинами \mathbf{x} и \mathbf{y} .

Наиболее удобной мерой корреляции двух случайных величин \mathbf{x} и \mathbf{y} считается «коэффициент корреляции» [4]

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\overline{(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y}-\bar{\mathbf{y}})}}{\sqrt{\overline{(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})^2}}\sqrt{\overline{(\mathbf{y}-\bar{\mathbf{y}})^2}}} = \frac{\overline{(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y}-\bar{\mathbf{y}})}}{\sqrt{D(\mathbf{x})D(\mathbf{y})}} = \frac{\overline{(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y}-\bar{\mathbf{y}})}}{\sigma(\mathbf{x})\sigma(\mathbf{y})} = \frac{\overline{\mathbf{x}\cdot\mathbf{y}} - \bar{\mathbf{x}}\cdot\bar{\mathbf{y}}}{\sigma(\mathbf{x})\sigma(\mathbf{y})}. \quad (1)$$

Коэффициент корреляции – безразмерная величина, обладающая свойствами:

- 1) если \mathbf{x} и \mathbf{y} независимы, то коэффициент корреляции $R(\mathbf{x}, \mathbf{y})=0$;
- 2) если связь между \mathbf{x} и \mathbf{y} – линейная, так что совместные независимые испытания этих величин дают в результате такие пары этих случайных величин x и y , которые удовлетворяют линейному соотношению $x=\alpha y$, с фиксированным значением $\alpha \neq 0$, то коэффициент корреляции будет $R(\mathbf{x}, \mathbf{y})=\pm 1$, где для положительных значений α берется знак плюс, а для отрицательных значений α знак минус.
- 3) если $0 < R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) < 1$, то корреляция называется положительной, тогда как в случае $0 > R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) > -1$ корреляция между \mathbf{x} и \mathbf{y} – называется отрицательной.

Положительная корреляция означает, что совместные независимые испытания случайных величин \mathbf{x} и \mathbf{y} чаще приводят к таким парам x и y , когда обе величины отклоняются в одну и ту же сторону от своих средних значений (обе оказываются меньше своего среднего значения или больше). В случае отрицательной корреляции совместное испытание \mathbf{x} и \mathbf{y} приводит к результату, когда их значения чаще отклоняются в противоположные стороны от своих ожидаемых значений.

Следует подчеркнуть, что выполнение условия $R(\mathbf{x}, \mathbf{y})=0$ не является достаточным для независимости \mathbf{x} и \mathbf{y} , тогда как независимость \mathbf{x} и \mathbf{y} является достаточным для выполнения условия $R(\mathbf{x}, \mathbf{y})=0$. Действительно, рассмотрим двумерное распределение вероятностей, удовлетворяющее условию

$$p(\pm x, \pm y) = p(|x|, |y|).$$

Согласно этому равенству, вероятность проявления значения (x или y) случайной величины (\mathbf{x} или \mathbf{y}) зависит только от модуля этого значения и одинакова как для отрицательных, так и для положительных значений. Функции распределения плотности вероятностей и для \mathbf{x} и для \mathbf{y} идентичны для обеих полуосей этих величин. Функция распределения плотности ве-

роятности $p(|x|, |y|)$ для двумерной случайной величины $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{x} \cdot \mathbf{y}$ будет симметричной относительно начала координат плоскости XOY . Поэтому для средних значений случайных величин $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{x} \cdot \mathbf{y}$, \mathbf{x} , \mathbf{y} получим

$$\langle \mathbf{x}\mathbf{y} \rangle \equiv \overline{\mathbf{x}\mathbf{y}} = 0, \quad \langle \mathbf{x} \rangle \equiv \bar{\mathbf{x}} = -\langle \mathbf{x} \rangle + \langle \mathbf{x} \rangle = 0, \quad \langle \mathbf{y} \rangle \equiv \bar{\mathbf{y}} = -\langle \mathbf{y} \rangle + \langle \mathbf{y} \rangle = 0.$$

Следовательно, коэффициент корреляции в этом случае будет

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} - \bar{\mathbf{x}} \cdot \bar{\mathbf{y}}}{\sigma(\mathbf{x})\sigma(\mathbf{y})} = \frac{0 - 0 \cdot 0}{\sigma(\mathbf{x})\sigma(\mathbf{y})} = 0.$$

Окончательный вывод зависит от выполнения или невыполнения условия $p(|x|, |y|) = p_1(|x|)p_2(|y|)$ в действительности. Если это условие не выполняется, то случайные величины \mathbf{x} и \mathbf{y} коррелированы и не являются независимыми.

Если коэффициент корреляции $R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \pm 1$, то существует прямая нестатистическая связь между случайными величинами \mathbf{x} и \mathbf{y} . Но прямая нестатистическая связь между двумя случайными величинами может быть и при

$$0 < |R(\mathbf{x}, \mathbf{y})| < 1.$$

Если в результате совместных испытаний между парами x и y достоверно проявится связь $y = f(x)$, где явный вид функции $f(x)$ можно получить путем подгонки экспериментального распределения точек испытаний (x_i, y_i) на плоскости XOY , то коэффициент корреляции, определяемый выражением

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})}{\sqrt{(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^2} \sqrt{(\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^2}} = \frac{\overline{\mathbf{x} \cdot f(\mathbf{x})} - \bar{\mathbf{x}} \cdot \bar{f(\mathbf{x})}}{\sigma(\mathbf{x})\sigma(f(\mathbf{x}))} \neq \pm 1,$$

в общем случае по модулю не равен единице. Более того, как видно из полученного выражения, если функция $f(x)$ окажется четной функцией $f(-x) = f(x)$, то $R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0$. Таким образом, коэффициент корреляции может равняться нулю даже в том случае, когда существует сильная (жесткая) связь между \mathbf{x} и \mathbf{y} .

Более тонкие эффекты статистической зависимости (корреляции) случайных величин могут быть учтены корреляционными моментами более высоких порядков: $(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^n (\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}})^m$.

При измерении момента инерции твердого тела J_c возникает ситуация, напоминающая изопроцессы в идеальных газах, когда один из параметров состояния газа P, V, T , связанных уравнением Клапейрона-Менделеева $\frac{PV}{T} = \frac{m}{\mu} R = \text{const}$, в ходе изменения состояния газа остается постоянным. В таких изопроцессах независимым является только один параметр.

Если ни один из трех параметров не фиксирован, то имеется возможность любую двойку из трех параметров выбрать в качестве независимых переменных (аргументов), а третий параметр найти как функцию от этих аргументов, исходя из требования справедливости уравнения Клапейрона-Менделеева. Например, если в качестве независимых переменных выбрать давление и объем газа (P и V), то температура T окажется функцией от них:

$$T = \frac{PV}{\nu R} = \frac{PV}{C} \quad \text{и} \quad \frac{\partial T}{\partial P} = \frac{V}{C}, \quad \frac{\partial T}{\partial V} = \frac{P}{C}.$$

Если независимыми переменными выбрать P и T , то V окажется функцией от них:

$$V = \frac{\nu RT}{P} = \frac{CT}{P} \quad \text{и} \quad \frac{\partial V}{\partial P} = -\frac{CT}{P^2}, \quad \frac{\partial V}{\partial T} = \frac{C}{P}.$$

Если же в качестве независимых выбрать V и T , то P окажется функцией от них:

$$P = \frac{\nu RT}{V} = \frac{CT}{V} \quad \text{и} \quad \frac{\partial P}{\partial V} = -\frac{CT}{V^2}, \quad \frac{\partial P}{\partial T} = \frac{C}{V}.$$

С учетом этих выражений для частных производных получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} &= \frac{C}{V} \cdot \frac{P}{C} \cdot \left(-\frac{CT}{P^2}\right) = -\frac{CT}{PV} = -1, \\ \frac{\partial P}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial P} &= \left(-\frac{CT}{V^2}\right) \cdot \frac{C}{P} \cdot \frac{V}{C} = -\frac{CT}{PV} = -1. \end{aligned} \quad (2)$$

Умножение обычных производных привело бы к результату, равному $+1$.

Полученный несколько неожиданный результат, являющийся важным в теории термодинамических потенциалов, указывает на необходимость учета условий, при которых определяются частные производные заданной функции.

Погрешность измерения момента инерции твердого тела

Определим зависимость относительной погрешности измерения J_c от погрешности измерения a , без учета корреляции между случайными величинами a и T , то есть, считая их независимыми, следуя работе [6]. При этом сохраним обозначения нашей работы.

Пусть при эксперименте имело место равенство: $a = \lambda R_c$ и величина a определяется с абсолютной погрешностью, составляющей некоторую долю величины R_c . То есть $\Delta a = \alpha R_c$, или $\alpha = \Delta a / R_c$, где α некоторое число, обычно много меньше единицы $\alpha \ll 1$.

Погрешность измерения будет приемлемой, когда $\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{a} = \frac{\alpha}{\lambda} \ll 1$, то есть при выполнении условия $\alpha \ll \lambda$. Приращение J_c , согласно формуле

$$J_c = maT^2 g l (4\pi^2) - ma^2 = ma(T^2 g l (4\pi^2) - a) = mR_c^2, \quad (3)$$

где T период малых гармонических колебаний тела вокруг оси вращения, по мнению авторов работы [6], будет

$$J_c((a + \Delta a), T) = m(a + \Delta a) \left(\frac{gT^2}{4\pi^2} - (a + \Delta a) \right), \quad (4)$$

где период колебаний определяется выражением

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} L_{\text{тп}} = \frac{4\pi^2}{g} (a + R_c^2 / a) = \frac{4\pi^2}{g} R_c (\lambda + \lambda^{-1}). \quad (5)$$

Очевидно, T зависит от a . Следовательно, приращение Δa приведет к соответствующему изменению ΔT периода T , которым авторы работы [6] в формуле (4) безосновательно пренебрегают. Полученные в [6] результаты содержат последствия этой ошибки и отличаются от правильных результатов тем больше, чем больше значение приращения $\Delta a = \alpha R_c$. Действительно, если считать, что T не зависит от a , то для приращения $J_c + \Delta J_c$ получим

$$\begin{aligned} J_c + \Delta J_c &= J_c((a + \Delta a), T) = m(a + \Delta a) \left(\frac{gT^2}{4\pi^2} - (a + \Delta a) \right) = \\ &= m(a + \Delta a) (R_c (\lambda + \lambda^{-1}) - (a + \Delta a)) = m(\lambda R_c + \alpha R_c) (R_c (\lambda + \lambda^{-1}) - (\lambda R_c + \alpha R_c)) = \\ &= mR_c^2 (\lambda + \alpha) (\lambda^{-1} - \alpha) = J_c (1 - \alpha(\alpha + \lambda - \lambda^{-1})) = J_c - J_c \alpha (\alpha + \lambda - \lambda^{-1}). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\Delta J_c = -J_c \alpha (\alpha + \lambda - \lambda^{-1}). \quad (6)$$

Поскольку $J_c > 0$, то ΔJ_c и $\alpha(\alpha + \lambda - \lambda^{-1})$ имеют противоположные знаки.

Таким образом, при неизменной точности измерения a (при $\alpha = \text{const.}$) относительная погрешность измерения момента инерции физического маятника по отношению к центральной оси определяется выражением

$$\frac{\Delta J_c}{J_c} = -\alpha(\alpha + \lambda - \lambda^{-1}) \quad \text{или} \quad \varepsilon_{J_c} = \frac{|\Delta J_c|}{J_c} = \alpha(\alpha + \lambda - \lambda^{-1}) \quad (7)$$

и принимает нулевое значение при $\alpha + \lambda - \lambda^{-1} = 0$.

Равноправное квадратное уравнение $\lambda^2 + \alpha\lambda - 1 = 0$ имеет только одно физическое решение: $\lambda_0 = \sqrt{1 + (\alpha/2)^2} - \alpha/2$. При приемлемой точности определения расстояния центральной оси тела от оси вращения выполняется условие $\alpha = \Delta a / a \ll 1$. Тогда из полученного решения следует, что $\lambda_0 = a_0 / R_c \approx 1$. То есть достаточно хорошо выполняется условие $a_0 \approx R_c$.

По мнению авторов работы [6] это условие определяет оптимальное расстояние центральной оси физического маятника от оси вращения, для того чтобы абсолютно точно определить значение J_c .

Утверждение о том, что погрешность измерения момента инерции для некоторого расстояния a (для некоторого значения параметра λ) может равняться нулю независимо от погрешности измерения расстояния Δa является противоречивым, поскольку предполагает, что значение a известно точно. Авторы работы [6] не учли изменение периода колебаний T с изменением расстояния a и что время измеряется с некоторой погрешностью ΔT . В действительности, только в одной точке при $\lambda = 1$ погрешность измерения расстояния Δa дает пренебрежимо малый вклад в погрешность измерения J_c , если вызванное этим значением Δa изменение среднего значения периода колебаний $\Delta \bar{T}$ пренебрежимо мало по сравнению с погрешностью измерения периода колебаний ΔT . Следовательно, более важной является зависимость $(dT/da) \equiv (dT/d\lambda) / R_c$ в широкой области определения λ .

Погрешность измерения момента инерции может равняться нулю только в том случае, если и расстояние a , и масса тела, и период колебаний измеряются абсолютно точно. Кроме того, в ходе измерения периода колебаний необходимо абсолютно точное соблюдение параллельности оси вращения и выбранного направления AA_1 . То есть должно выполняться условие $R_c = \text{const.}$ Необходимо также правильно оценить и учесть систематическую погрешность, обусловленную зависимостью периода колебаний от их амплитуды. Авторы монографии [7], ссылаясь на работу [6], не указали на некорректность оценки погрешности.

Предположим, что опытный образец по отношению к центральной оси, параллельной к заданному направлению AA_1 , обладает радиусом инерции $R_c = 5$ см и в то же время значение a измеряется с точностью $\Delta a = \alpha R_c = 1$ мм, тогда $\alpha = \Delta a / R_c = 0,02 = 2\%$.

В табл. 1 приведены значения $\Delta J_c / J_c$ (%) в зависимости от $\lambda = a / R_c$, согласно формуле (7), при $R_c = 5$ см, $\Delta a = 1$ мм.

Таблица 1

. Зависимость $\Delta J_c / J_c$ от λ при $R_c = 5$ см, $\Delta a = 1$ мм

λ	0,1	0,5	0,8	0,95	0,98	λ_0	1,0	1,02	1,05	1,2	1,5	2,0	3,0
$\Delta J_c / J_c$	19,7	2,96	0,86	0,17	0,04	0,00	0,04	0,12	0,24	0,77	1,63	3,04	5,34

На рис. 1 приведена относительная погрешность измерения $\Delta J_c / J_c$ в зависимости от λ согласно формуле (7). Эта зависимость представляет собой гиперболу с двумя асимптотами:

1) когда $\lambda \rightarrow 0$, то $\Delta J_c / J_c \rightarrow -\infty$;

2) когда $\lambda \rightarrow \infty$, то $\Delta J_c / J_c \rightarrow +\infty$, бесконечно приближаясь к прямой $\Delta J_c / J_c = \alpha\lambda + \alpha^2$, являющейся её асимптотой.

Очевидно, для интервала значений $0,95R_c \leq a \leq 1,05R_c$ при $\alpha = 0,02$, величина J_c определяется с относительной погрешностью $\Delta J_c / J_c = 0,2\%$.

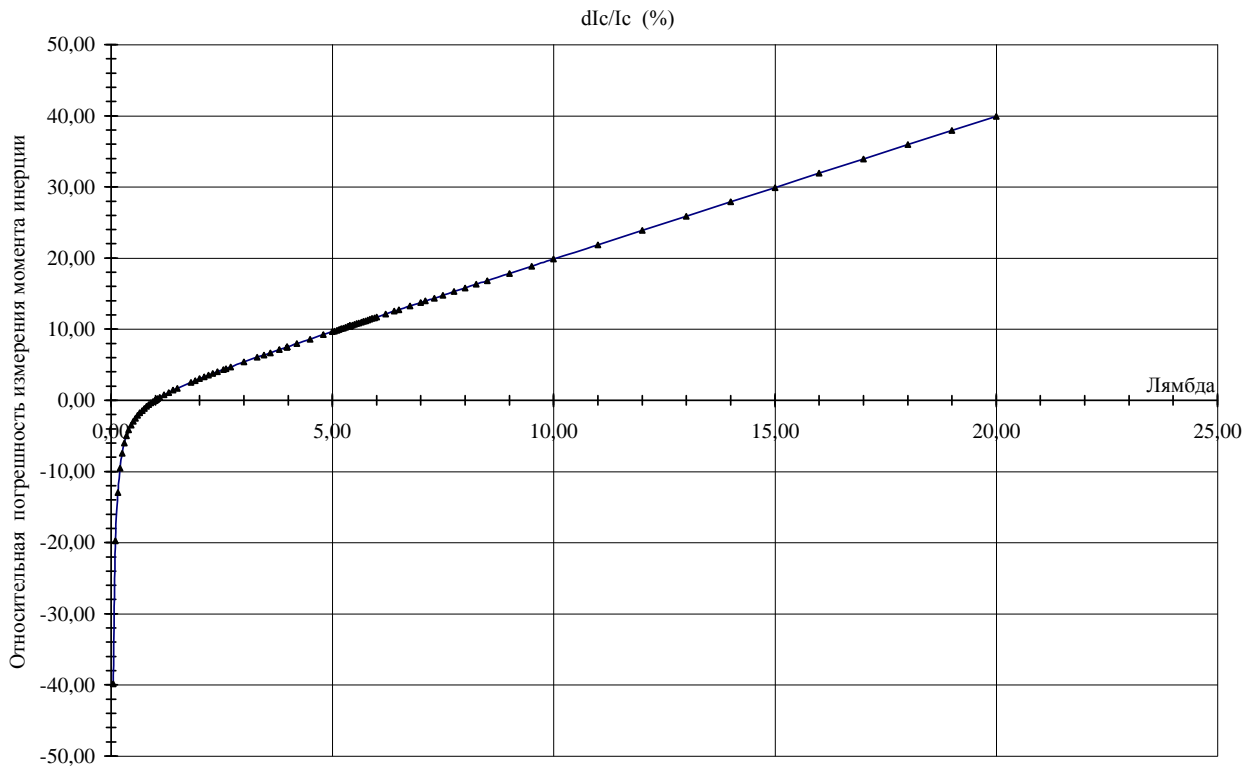


Рис. 1. Зависимость $\Delta J_c / J_c$ от λ при $R_c = 5$ см, $\Delta a = 1$ мм

В табл. 2 приведены значения величины $\Delta J_c / J_c$, (%) в зависимости от λ в случае, когда $R_c = 5,0$ см, $\Delta a = \alpha R_c = 2,5$ мм и $\alpha = 0,05$.

Таблица 2

Зависимость $\Delta J_c / J_c$ от λ при $R_c = 5$ см, $\Delta a = 2,5$ мм

λ	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	0,9753	1,00
$\Delta J_c / J_c$	-49,	-23,8	-14,9	-10,3	-7,25	-5,08	-3,40	-2,0	-0,81	0,0	0,25
λ	1,05	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	3,00	4,00	5,00	10,00	20,0
$\Delta J_c / J_c$	0,74	2,42	3,68	4,92	6,5	7,75	13,6	19,0	24,3	49,3	100

Очевидно, погрешности определения J_c стали больше, чем при $\alpha = 0,02$.

Таким образом, если не учитывать корреляцию между величинами a и T , то получается ошибочный результат для погрешности измерения J_c .

Погрешность измерения расстояния центра масс твердого тела от оси вращения

Отметим, что корреляции измеряемых на эксперименте физических величин в определенных случаях позволяют (помогают) выделить события исследуемого слабого эффекта, например, маловероятных двухчастичных процессов рождения или распада элементарных частиц в присутствии более интенсивных многочастичных фоновых событий, имитирующих

события изучаемого процесса. Это происходит потому, что фоновые события от многочастичных реакций, как правило, распределены в пространстве и во времени практически изотропно и равномерно [8]. Поэтому всегда имеется возможность так "нарушить кинематику" регистрации коррелированных физических величин исследуемой двухчастичной реакции, чтобы исключить ее регистрацию и при этом не изменить вероятность регистрации фоновых событий. Такие измерения фона в экспериментальной физике высоких энергий (физике элементарных частиц), принято называть измерениями фона при "нарушенной кинематике" [8].

В заключение найдем важную для данной работы погрешность измерения величины d , которая представляется выражением

$$d = \frac{(T_{01} - T_{02})}{k} = \frac{(T_{01} - T_{02})}{2(dT/da)} = \frac{\sqrt{gR_c(\lambda + \lambda^3)}}{2\pi(\lambda - \lambda^{-1})} (T_{01} - T_{02}). \quad (8)$$

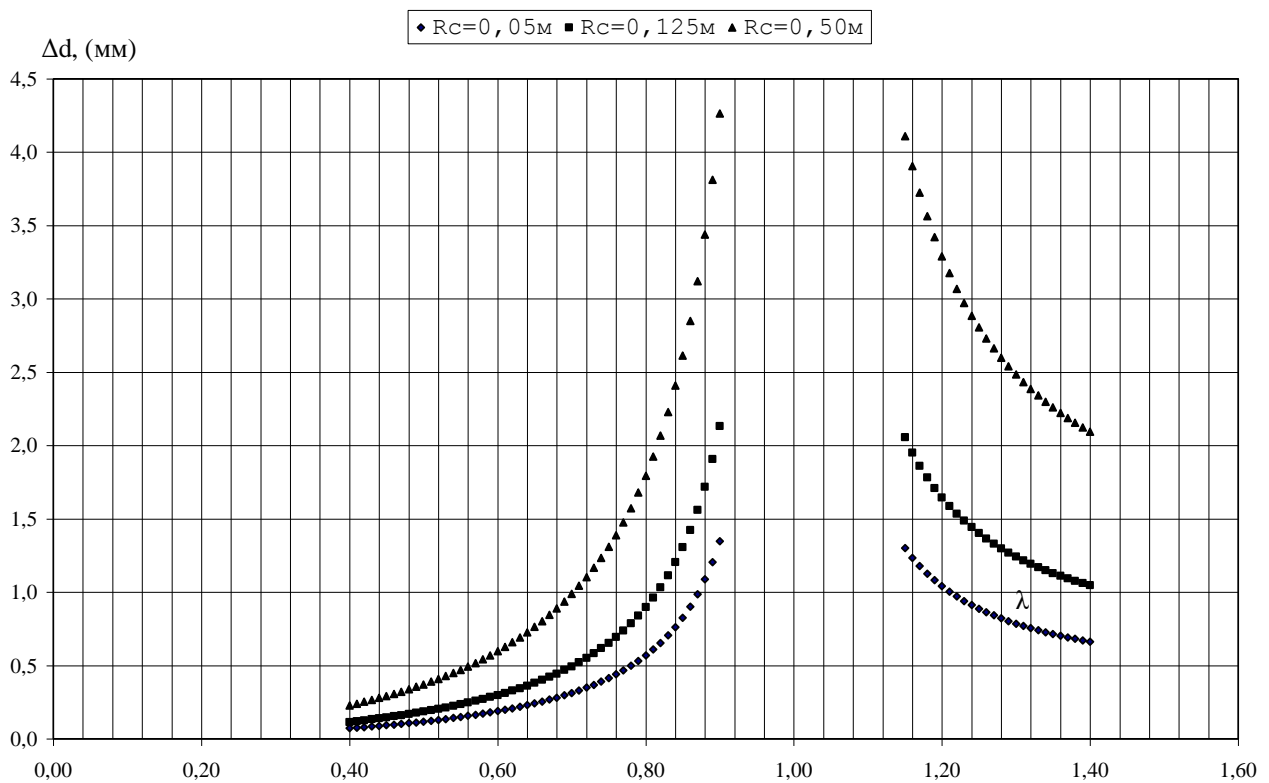


Рис. 2. Абсолютная погрешность измерения величины d

Абсолютная погрешность измерения расстояния d для фиксированных значений R_c и при условии измерения времени с погрешностью $\Delta T = 0,001$ сек, будет

$$\Delta d = \frac{\sqrt{gR_c(\lambda + \lambda^3)}}{2\pi(\lambda - \lambda^{-1})} (\Delta T_{01} + \Delta T_{02}) = \frac{\sqrt{gR_c(\lambda + \lambda^3)}}{\pi(\lambda - \lambda^{-1})} \Delta T = \frac{\sqrt{gR_c(\lambda + \lambda^3)}}{\pi(\lambda - \lambda^{-1})} 0,001 \text{ сек}. \quad (9)$$

Поскольку a_0 измеряется с погрешностью $\Delta a_0 = 0,5$ мм, то при такой же погрешности измерения d расстояние $a = a_0 + d$ центра масс твердого тела от оси вращения можно измерить с погрешностью не ниже $\Delta a = 1,0$ мм.

На рис. 2 приведен график функции (9) для трех значений радиуса инерции испытуемого тела $R_c = 0,05$ м; $R_c = 0,125$ м; $R_c = 0,50$ м. Как видно на рис. 2, погрешность измерения

$\Delta d < 0,5$ мм, если измерение проводится при $\lambda < 0,8$; $\lambda < 0,7$; $\lambda < 0,55$ соответственно. Там же видно, что точность измерения d выше для малых значений λ .

Следовательно, в этих условиях положение точки центра масс неоднородного твердого тела можно определить с точностью не ниже 1 мм.

Библиографический список

1. **Захаров, В.Д.** Тяготение. От Аристотеля до Эйнштейна / В.Д. Захаров. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 278с.
2. **Гусак, А.А.** Высшая математика: в 2 т. /А.А. Гусак. – Минск: ТетраСистемс, 2004. Т. 2. – 448 с.
3. **Худсон, Д.** Статистика для физиков: [пер. с англ.] / Д. Худсон; под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1970. – 292 с.
4. **Яноши, Л.** Теория и практика обработки результатов измерений: [пер. с англ.] / Л. Яноши; под ред. Н.П. Клепикова. – М.: Мир, 1968. – 462 с.
5. **Гнеденко, Б.В.** Курс теории вероятностей / Б.В. Гнеденко. – М.: Наука, 1969. - 400 с.
6. **Каневский, М. М.** К вопросу об определении моментов инерции твёрдых тел по методу качений / М.М. Каневский, Ю.А. Гопп // Вестник инженеров и техников. 1934. №2.
7. **Гернет, М.М.** Определение моментов инерции / М.М. Гернет, В.Ф. Ратобыльский. – М.: Машиностроение, 1969. - 315 с.
8. **Пилипосян, С.Е.** Методы измерения физического фона и обработка экспериментальной информации в реакции $\gamma + p \rightarrow \eta^0 + p$ / С.Е. Пилипосян. – Ереван. 1979. – 29 с. (Препринт / ЕФИ-345(3) 79). ЯФ. Т. 32. Вып. 6(12). 1980. С. 1553–1559.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2011*

S.E. Piliposian

RECORDING OF CORRELATION OF VIBRATION PERIOD T AND DISTANCE a OF PHYSICAL PENDULUM CENTER OF MASS FROM AXIS OF ROTATION

Detection and recording of correlations between physical quantities that are measured during an experiment are essential for the correct estimation of the character and values of measurement errors. Reliability of measurement error estimations enhances the importance of experimental data. In another research effort, it was proved that miscalculation in estimation of measurement error of solid body central moment of inertia comes forth when the correlation of vibration period T and the distance a of physical pendulum center of mass from rotation axis is not taken into account.

The article contains the dependence of error of measurement of coordinates of heterogeneous solid body mass center point on the radius of its inertia, experiment conditions (parameter λ), as well as on time and distance measurement accuracy.

Key words: Correlation coefficient of random quantities, measurement error of correlated quantities, estimation of physical background and correlation of quantities.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.533; 621.81-25.001.4

С.М. Дмитриев¹, И.В. Друмов²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА МОДЕЛИ РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕАКТОРОМ С ГАЗОВОЙ ТУРБИНОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»²

Изложены преимущества и особенности высокотемпературных реакторов с газовой турбиной, в частности, система электромагнитного подвеса ротора турбомашин. Описана программа и некоторые результаты исследований.

Ключевые слова: электромагнитный подвес, ротор, турбомашин, атомная станция, высокотемпературный реактор, газовая турбина.

Введение

В настоящее время во всем мире ведутся работы по поиску альтернативных видов топлива, которые со временем придут на смену нефти и газу [1]. Одной из наиболее перспективных альтернатив может стать водородное топливо, дающее в качестве выхлопа обычный водяной пар. Водород по своей "калорийности" почти в четыре раза превосходит бензин. Производство водорода в промышленных масштабах может осуществляться с использованием тепловой энергии ядерных высокотемпературных реакторов. Современные проекты таких реакторов обещают понизить себестоимость водородного топлива до уровня цены бензина, возможно, и ниже.

В ОКБМ работы по высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам (ВТГР) ведутся с 1974 г. ВТГР является принципиально новым экологически чистым универсальным атомным энергоисточником. Его уникальные свойства – способность вырабатывать тепло с температурой до 1000°C и высокий уровень безопасности – определяют широкие возможности по использованию этого типа реактора для снабжения теплом технологических производств в различных энергоемких отраслях промышленности, для производства электроэнергии с высоким КПД и экономичного производства водородного топлива.

На рис. 1 представлена общая схема ядерной энергетической установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором в системе электроснабжения [2, 3, 4]. В реакторе происходит управляемая ядерная реакция, сопровождаемая нагревом теплоносителя. Управление этой реакцией, а также управление другими процессами на АЭС осуществляется автоматизированной системой управления технологическими процессами. Нагретый теплоноситель из реактора поступает в блок преобразования энергии, где он производит работу, связанную с вращением ротора турбомашин. Теплоноситель при этом охлаждается и возвращается в реактор. Генератор, являющийся частью турбомашин, преобразует энергию вращения в электрическую. Поскольку частота вращения ротора турбомашин и требования к

частоте напряжения, выдаваемого в электрическую сеть, в общем случае могут отличаться, то в составе оборудования предусматривается мощный преобразователь частоты.

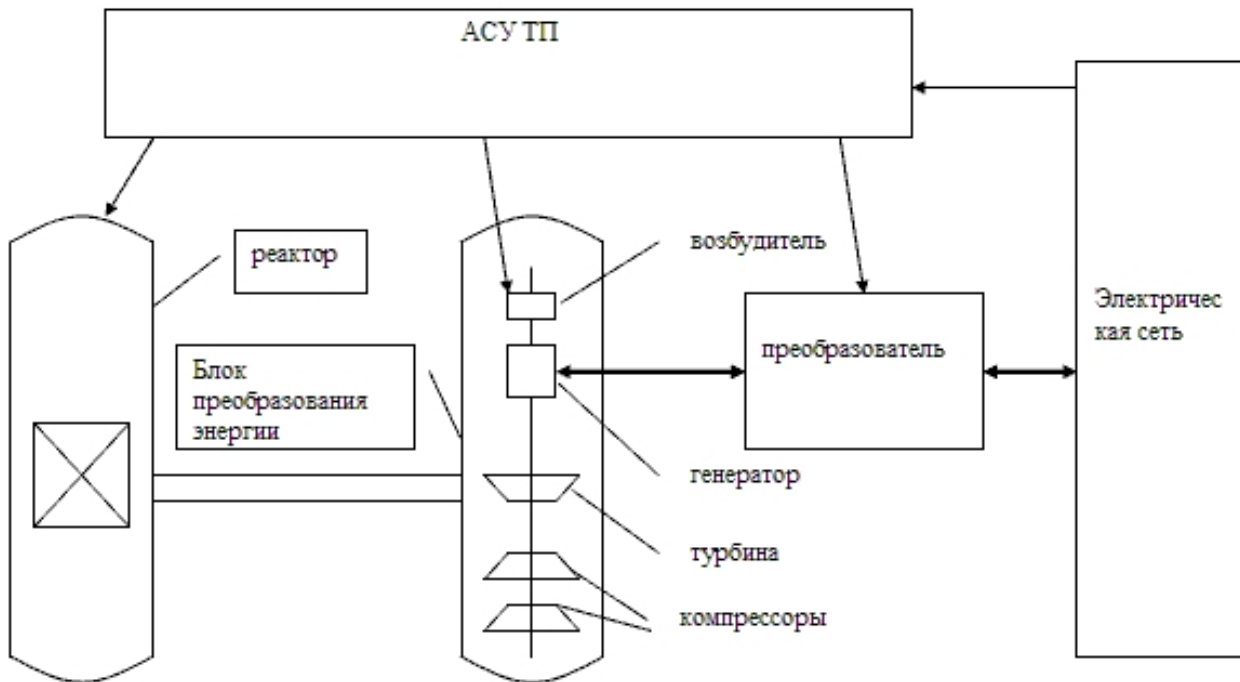


Рис. 1. Общая схема ядерной энергетической установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором в системе электроснабжения

1. Использование электромагнитного подвеса ротора турбомашины АС с ВТГР

Одной из ключевых задач создания высокотемпературной ядерной установки с гелиевым теплоносителем является использование в качестве опор ротора турбомашины электромагнитного подвеса. Электромагнитный подвес позволяет повысить экологическую безопасность, КПД и ресурс энергоустановки за счет: бесконтактной работы, отсутствия системы масляной смазки, надежности и относительно невысокой стоимости обслуживания. Поэтому в составе блока преобразования энергии атомной станции с высокотемпературным газовым реактором проектом предусмотрено использование турбомашины с ротором на электромагнитных подшипниках [5]. На рис. 2 представлено схематичное изображение турбомашины – турбокомпрессор, генератор, турбина, муфта, а также радиальные и осевые электромагнитные подшипники.

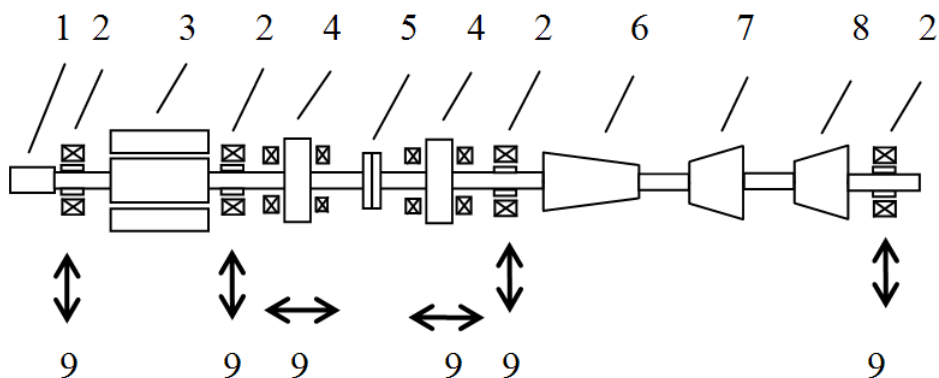


Рис. 2. Схематичное изображение турбомашины:

1 – возбудитель (верхняя часть ротора); 2 – радиальный электромагнитный подшипник; 3 – генератор; 4 – осевой электромагнитный подшипник; 5 – муфта; 6 – турбина;

7 – компрессор высокого давления; 8 – компрессор низкого давления; 9 – направления, в которых производится стабилизация ротора в центральном положении

Активные подшипники могут выпускаться в виде радиальных с цилиндрическим зазором, упорных с плоским зазором и радиально-упорных подшипников с коническим зазором. Полный электромагнитный подвес ротора состоит, как правило, из двух радиальных и одного упорного подшипников. Стрелками обозначены направления, в которых активные электромагнитные подшипники стабилизируют роторы генератора и турбокомпрессора.

2. Система электромагнитного подвеса ротора

В систему электромагнитного подвеса входят электромагнитные подшипники, датчики положения ротора, аппаратура и программное обеспечение системы управления, а также страховочные подшипники.

На рис. 3 представлена принципиальная схема радиального активного магнитного подшипника. Четыре электромагнита и четыре датчика положения расположены равномерно по окружности диаметрально противоположно. Роторная часть подшипника или ротор, выполненный из ферромагнитного материала «плавает» в магнитном поле, созданном четырьмя электромагнитами. Под воздействием электромагнитных сил ротор находится в состоянии равновесия. Положение ротора в рабочем зазоре опоры определяется с помощью датчиков, которые непрерывно фиксируют все возможные перемещения.

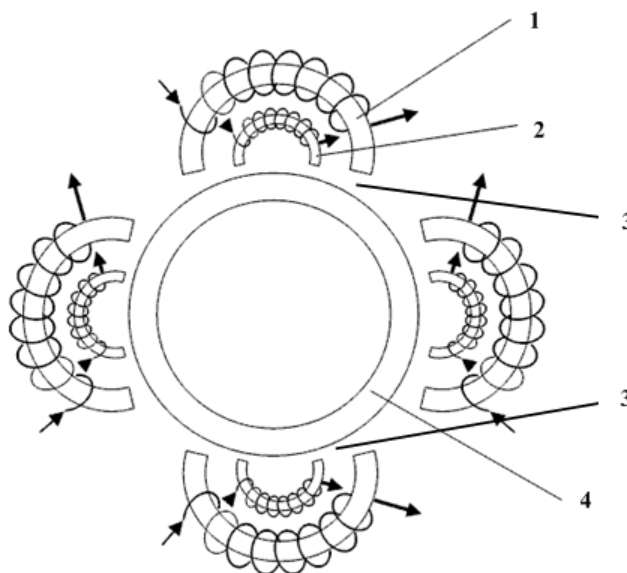


Рис. 3. Принципиальная схема радиального активного магнитного подшипника:

1 – статор электромагнита; 2 – датчик положения; 3 – воздушный зазор; одинаков с противоположных сторон ротора; 4 – ротор

Управление работой системы электромагнитных подшипников производится системой управления [6, 7]. На рис. 4 представлена функциональная схема реализации управления положением ротора по одному каналу. Данная схема обеспечивает управление положением ротора в ЭМП по одной координате и входит в состав одного канала управления. Количество таких каналов определяется количеством координат: осевой ЭМП обеспечивает управление положением ротора по одной координате (Z), каждый из четырех радиальных ЭМП обеспечивает управление положением ротора по двум координатам (X и Y) относительно вертикальной оси РЭМП. Учитывая рассматриваемую структуру многоопорной системы, количество каналов управления положением ротора в ЭМП составляет девять (без учета резервирования).

Пунктиром на схеме выделены блоки, функции которых реализуются при помощи

средств вычислительной техники и программного обеспечения. Для реализации управления положением ротора контроллеры должны обеспечивать выполнение следующих функций:

Аналого-цифровое преобразование представляет собой преобразование аналогового сигнала датчика (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от минус 5 до 5 В) в n -разрядное двоичное число.

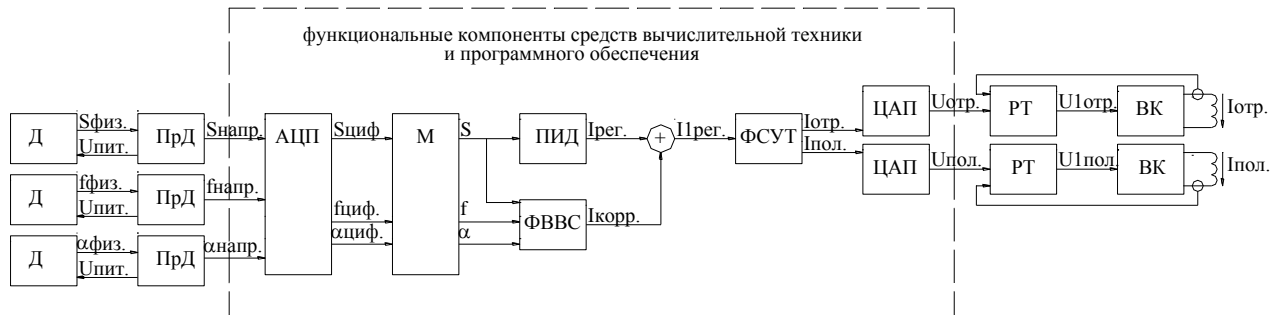


Рис. 4. Функциональная схема реализации управления положением ротора по одному каналу:

Д – датчик; ПрД – преобразователь датчика; АЦП – аналого – цифровой преобразователь; М – блок масштабирования; ПИД – регулятор положения ротора; ФВВС – блок формирования вектора виртуальных сил; ФСУТ – блок формирования сигналов управления током; ЦАП – цифро – аналоговый преобразователь; РТ – регулятор тока; ВК – выходной каскад; Sфиз, Sнапр, Sциф, S – смещение ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и в цифровой форме масштабированное соответственно; fфиз, fнапр, fциф, f – частота вращения ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой форме и цифровой форме, масштабированная соответственно; αфиз, αнапр, αциф, α – угловое положение ротора в форме физической величины, в форме напряжения, в цифровой и в цифровой форме масштабированное соответственно; Iрег – ток регулятора; Iкорр – ток коррекции; Iрег – ток регулятора с учетом тока коррекции; Iотр и Iпол – заданные токи обмоток, расположенных в направлении отрицательных и положительных значений смещения соответственно; Uпит – напряжение питания; Uотр и Uпол – напряжения, задающие регулятору тока требуемую величину тока «отрицательной» и «положительной» обмоток; U1отр и U1пол – напряжения, управляющие выходным каскадом «отрицательной» и «положительной» обмоток

Масштабирование принятых значений сигналов представляет собой пересчет полученных значений входных сигналов в форме n -разрядных двоичных чисел в значения переменных, имеющих размерность и масштаб измеряемых физических величин в соответствии с измерительными характеристиками измерительных каналов "датчик – преобразователь датчика".

ПИД- регулятор положения ротора, вычисляющий ток регулирования по формуле

$$I_{reg}(t) = K_p S(t) + K_d \frac{S(t) - S(t - \Delta t)}{\Delta t} + K_i S(t) \Delta t + K_i \Delta t \sum_{i=1}^n S(t - i \Delta t), \quad (1)$$

где t – время, с; K_p – коэффициент пропорциональности регулятора, А/мм; $S(t)$ – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени t , мм; K_d – коэффициент дифференцирования регулятора, А·мм/с; Δt – время цикла работы управляющего контроллера, с; $S(t - \Delta t)$ – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени $t - \Delta t$, мм; K_i – коэффициент интегрирования регулятора, А/(мм·с); n – количество циклов работы контроллера с момента включения регулятора; i – номер цикла контроллера.

Формирование вектора виртуальных сил представляет собой вычисление значения тока коррекции I_c по формуле

$$I_c = I_a \sin(\alpha + \varphi), \quad (2)$$

где I_a – величина вектора виртуальных сил, А; α - угловое положение ротора, рад; φ - угловое направление вектора виртуальных сил по оси I, рад;

При этом формирование вектора производится не постоянно, а только при определенных значениях частоты вращения ротора f (когда это значение находится в пределах одного из диапазонов резонансных частот ротора ТМ).

Формирование сигналов управления токами в обмотках электромагнитов ЭМП представляет собой вычисление значений выходных напряжений контроллера для управления двумя противоположными обмотками электромагнитов по управляемой координате.

Цифроаналоговое преобразование представляет собой преобразование n -разрядного двоичного числа в аналоговый сигнал (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от 0 до 5 В).

3. Постановка задачи экспериментальных исследований

Опорные системы электромагнитных подшипников уже более 20 лет эксплуатируются в различных типах машин. Однако вертикальный ротор весом в несколько десятков тонн, вывешенный в электромагнитных подшипниках с зазором в десятые доли миллиметра относительно статора и имеющий четыре критические частоты, две из которых изгибные, делает конструкцию турбомшины уникальной. Для подтверждения работоспособности такой конструкции требуется не только расчетное обоснование, но и экспериментальное подтверждение.

Одними из важнейших направлений экспериментальных исследований являются:

- отработка методики физической балансировки ротора на электромагнитных подшипниках;
- определение законов управления положением ротора, обеспечивающих его удержание в заданных границах в условиях полного электромагнитного подвеса при вращении, в том числе на резонансных частотах, в условиях воздействия внешних сил;
- применение системы управления электромагнитными подшипниками для компенсации дисбаланса.

Для проведения этих исследований в ОКБМ созданы несколько исследовательских стендов, которые позволят подтвердить принципиальную возможность применения электромагнитного подвеса в установке подобной конструкции, получить реальные данные, позволяющие верифицировать методики расчетов и расчетные коды.

В настоящей работе описаны некоторые результаты экспериментальных исследований.

4. Отработка методов физической балансировки

На рис. 5 представлены формы колебаний вращающегося ротора одной из экспериментальных установок [8, 9] на полном электромагнитном подвесе. Эти формы соответствуют четырем критическим частотам ротора, причем третья и четвертая соответствуют изгибным частотам. Задача балансировки ротора в ЭМП [10, 11] сводится к идентификации форм колебаний ротора, определению углового направления и величины остаточного дисбаланса по каждой форме и расчету величин грузов, компенсирующих таким образом дисбаланс. Балансировка ротора проведена на каждой критической частоте, определенной по результатам снятия амплитудно-частотной характеристики. При проведении балансировки ротора были вычислены корректирующие грузы для варианта балансировки ротора по четырем формам колебаний. После установки системы балансировочных грузов на ротор было зафиксировано заметное снижение амплитуды колебаний ротора в районе ЭМП в диапазоне частот враще-

ния до 6000 об/мин. Таким образом, была частично верифицирована методика балансировки гибкого вертикального ротора в электромагнитном подвесе.

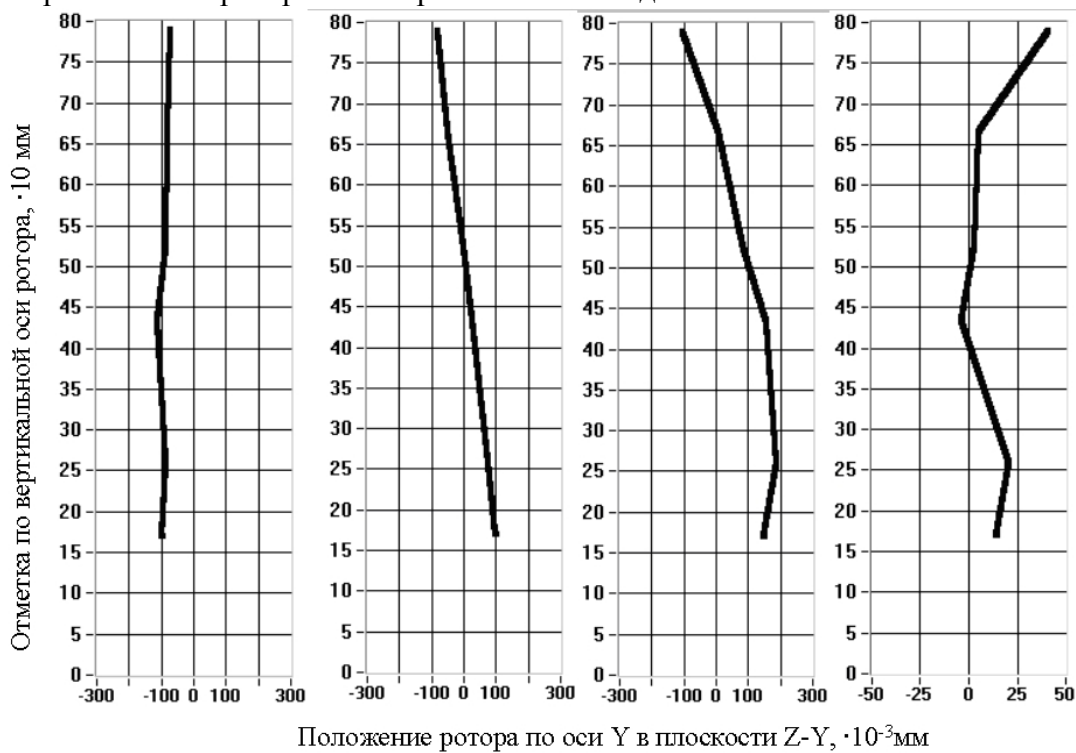
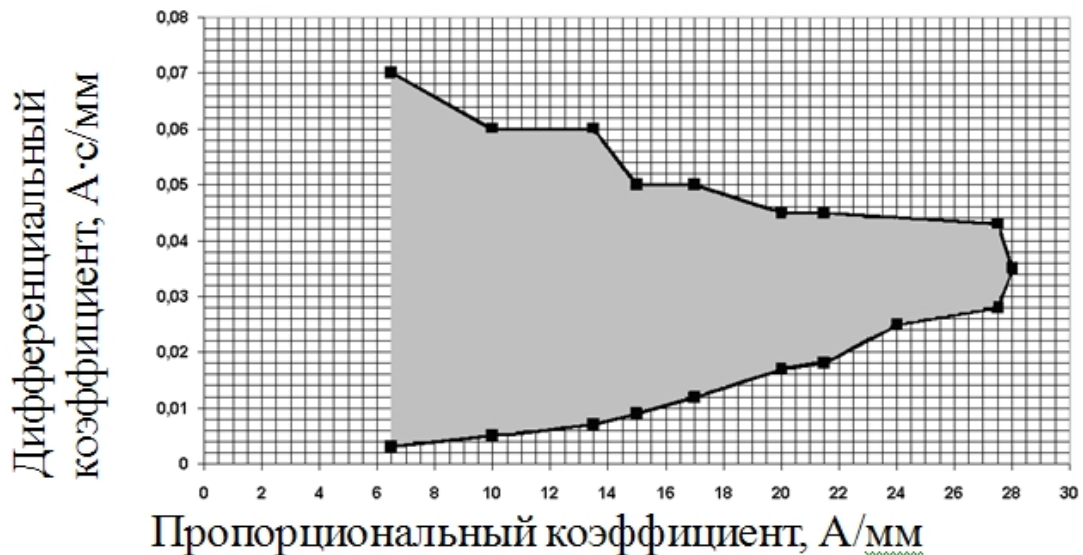


Рис. 5. Формы колебаний вращающегося ротора на полном электромагнитном подвесе

5. Определение законов управления положением ротора, обеспечивающих его удержание в заданных границах в условиях полного электромагнитного подвеса

При проведении расчетных исследований динамики ротора для ПД-регулятора рассчитывается область устойчивости в координатах настроечных коэффициентов регулятора. В последствие указанная область подтверждается экспериментально снятой кривой, характеризующей её границу. На рис. 6 показаны экспериментально определенные границы области устойчивости ПД-регулятора радиального электромагнитного подшипника. Если значения пропорционального дифференциального коэффициентов выбраны из этой области, то ротор ведет себя устойчиво во всем диапазоне частот вращения.



**Рис. 6. Экспериментально определенные границы области устойчивости
ПД-регулятора радиального электромагнитного подшипника**

По результатам исследований выбранного закона управления при различных частотах вращения ротора, а также других законов [8, 9] обоснован электромагнитный подвес описанной конструкции [9].

**6. Применение системы управления электромагнитными подшипниками
для компенсации дисбаланса**

Для обеспечения автоматического поддержания устойчивого вращения ротора при пуске и остановке при прохождении резонансных частот используется специальный закон управления, формирующий вектор «виртуальной» силы в электромагнитном подшипнике, что обеспечивает величину амплитуды колебаний ротора в заданной области относительно оси подшипников. На рис. 7 показана амплитуда колебаний ротора при вращении с включенным законом и с выключенным. Как видно из графиков, включение закона позволяет существенно уменьшить амплитуду колебаний ротора на резонансной частоте 65 Гц.



Рис. 7. Амплитуда колебаний ротора при вращении с включенным и выключенным законом

Результаты проведенных испытаний учитываются при верификации программного обеспечения расчетов динамики ротора в электромагнитном подвесе, статических и динамических характеристик электромагнитных подшипников, в проекте блока преобразования энергии атомной станции с высокотемпературным газовым реактором.

Библиографический список

1. Официальный сайт ОАО «ОКБМ Африкантов» г. Нижний Новгород – 2011 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.okbm.nnov.ru/russian/hydrogen> (дата обращения: 17.07.2011).
2. **Маргулова, Т.Х.** Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова. – М.: Высш. шк., 1978. – 289 с.
3. **Shenoy, A.** US History of Direct Cycle Gas-Turbine HTGRs / A. Shenoy // Technical Committee Meeting on Gas Turbine Power Conversion Systems Meeting. November 15, 2000.

4. **Пономарев-Степной, Н.Н.** Возможности использования модульного гелиевого реактора ГТ-МГР для диспозиции оружейного плутония./ Н.Н. Пономарев-Степной [и др.] // ISSN 0869-6772. Конверсия в машиностроении 1999. №3–4.
5. **Kodochigov, N.** Electromagnetic suspension of vertical turbomachine for GT-MHR nuclear power plant / N. Kodochigov [at al.] // Proceedings of the 5. Workshop Magnetlagertechnik. – Zittau-Kassel, 2001. P. 107–114.
6. **Kodochigov, N.G.** Control system of electromagnetic bearing / N.G. Kodochigov [at al.] // 5. Workshop Magnetlagertechnik. Tagungsband. September 2001. Zittau-Kassel. 2001. P. 59–68.
7. **Kodochigov, N.G.** Calculation and substantiation of the structure and composition of microprocessor controllers in the digital control system of electromagnetic suspension multisupport system / N.G. Kodochigov [at al.] // 6. Workshop Magnetlagertechnik. Tagungsband. September 2003. – Zittau-Kassel. 2003. P. 161–169.
8. **Кодочигов, Н.Г.** Исследование методов стабилизации ротора с полным электромагнитным подвесом./ Н.Г. Кодочигов [и др.] // Материалы 6-й конференции по системам мехатроники, сентябрь 2003. – Кассель, ФРГ. 2003. С. 153–160.
9. **Mitenkov, F.M.** Electromagnetic Suspension of Vertical Turbomachine For Nuclear Power Plant./ F.M.Mitenkov [at al.] // Proceedings of conference "PHYSICON2003" Sanct -Peterburg, 2003. P. 146–151.
10. **Митенков, Ф.М.** Алгоритм определения дисбаланса ротора на электромагнитных опорах / Ф.М. Митенков [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 4. С. 9-14
11. **Митенков, Ф.М.** Влияние дисбаланса на нелинейную динамику вертикального ротора на электромагнитных подшипниках / Ф.М. Митенков [и др.] // Вестник ННГУ. Механика. 2009. №4. С. 110–114.

*Дата поступления
в редакцию 05.07.2011*

S.M. Dmitriev, I.V. Drumov

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ELECTROMAGNETIC SUSPENSION SYSTEM FOR THE TURBO MACHINE ROTOR MODEL OF NUCLEAR POWER PLANT WITH HIGH-TEMPERATURE REACTOR AND GAS TURBINE

Advantages and features of high-temperature reactors with gas turbine are described in this paper, in particular, the electromagnetic suspension system for turbomachine rotor. Research schedule and some results are described.

Key words: electromagnetic suspension, rotor, turbomachine, nuclear plant, high-temperature reactor, gas turbine.

УДК 523.5

М.В. Турченко¹, В.В. Андреев², А.В. Дунцев²**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ
ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ
С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**ОАО «ОКБМ им. И.А. Африкантова»¹,
Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева²

Предлагается метод определения коэффициента гидравлического трения: с помощью экспериментальных данных обучается нейронная сеть. В процессе обучения на входы сети подаются значения параметров, определяющих режим течения теплоносителя (в частности, мощность нагрева), а также данные, получаемые в результате эксперимента (температуры), на выходе же мы должны получить прогнозируемые значения коэффициента гидравлического трения. После того как ИНС будет обучена, можно прогнозировать изменение коэффициента гидравлического трения еще на ранних стадиях процесса, что позволит своевременно принять необходимые действия по управлению процессом развития ЕЦ.

Ключевые слова: естественная циркуляция, теплоноситель, гидравлическое сопротивление, искусственная нейронная сеть.

Введение

Развитие энергетики, повышение уровня безопасности (самозащитенности) энергетических установок предполагает все более широкое использование систем, основанных на естественной циркуляции рабочего тела в каналах. Указанный режим работы интересен и как штатный режим функционирования установки, и как способ обеспечения расхолаживания в случае отказа циркуляционных насосов. Сложность процессов теплоотвода, нестационарный характер этих процессов при естественной циркуляции требует проведения более точных гидравлических расчетов. Существующие расчетные модели не всегда удовлетворяют предъявляемым высоким требованиям в силу различного рода упрощений, заложенных в них при разработке. Исправление подобного рода недостатков расчетных моделей возможно на основе альтернативных способов обработки и обобщения экспериментальных результатов, основанных, в частности, на использовании искусственных нейронных сетей.

Постановка задачи

На сегодняшний день считается, что определение гидравлического сопротивления возможно лишь в установившемся движении. Для неустановившегося движения не существует способов его определения, и поэтому в гидравлике принято результаты исследований сопротивлений установившегося движения переносить на неустановившееся движение [1].

Определение потерь энергии является одним из важнейших вопросов почти любого гидравлического расчета. В гидравлических расчетах приходится иметь дело с двумя видами потерь: с потерями энергии по длине трубопровода и с потерями в местных сопротивлениях.

К потерям энергии по длине трубопровода относятся потери энергии на прямолинейных участках трубопровода. При этом за нормальную конфигурацию потока принимается конфигурация потока на прямолинейном участке трубопровода на расстояниях, достаточно удаленных от входа, что связано с постоянством течения на этом участке.

Потери энергии, вызванные изменениями геометрии трубопровода, называются местными. Причиной этих потерь является прохождение теплоносителя через всевозможные вентили, закругления, сужения и расширения трубопроводов [2].

Проблемы определения гидравлического сопротивления в ламинарном неизотермическом потоке

Кроме непостоянства потока из-за геометрических характеристик трассы, существует также проблема, связанная с неизотермичностью потока. В неизотермическом потоке температура может изменяться и по живому сечению потока, и по длине. Существенной величиной, влияющей на распределение скоростей и давлений в ламинарном потоке, является коэффициент вязкости жидкости. Непостоянство коэффициента вязкости жидкости в неизотермическом потоке выступает причиной нарушения законов распределения скоростей и давлений, свойственных изотермическому потоку.

Если, например, в изотермическом потоке в круглой трубе скорости распределяются по параболическому закону, то в потоке неизотермическом, например, в теплообменном аппарате, распределение скоростей будет подчиняться другому закону (рис. 1). Важной особенностью неизотермического потока является и то, что вследствие неодинаковой температуры жидкости в потоке возникают конвекционные течения, как правило, также изменяющие распределение скоростей, соответствующее изотермическому потоку. Это особенно проявляется в трубопроводах, расположенных вертикально. В общем случае конвекционные течения могут являться причиной нарушения равномерности движения потока и даже его ламинарности.

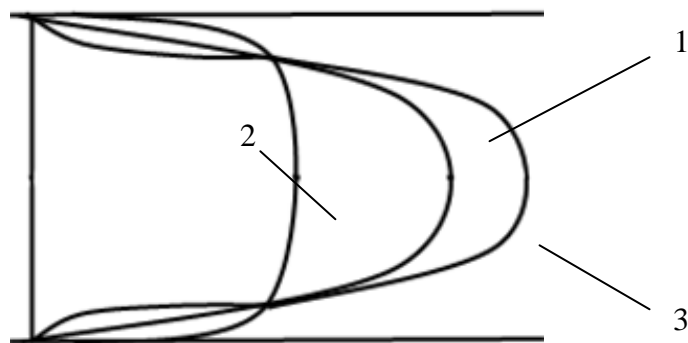


Рис. 1. Схема распределения скоростей в изотермическом и неизотермических ламинарных потоках

1 – изотермический поток; 2 – неизотермический поток (нагревание);
3 – неизотермический поток (охлаждение)

Неизотермический ламинарный поток изучен недостаточно из-за отсутствия средств измерения, не изменяющих структуру потока. Далее рассмотрим случай приближенного решения лишь одного частного случая, а именно определения потерь энергии в потоке неизотермическом только по длине. Так как полная потеря энергии по всей длине равна сумме потерь на элементарных участках, ее можно приближенно определить, рассматривая движение на каждом элементарном участке трубопровода как изотермическое, по формуле

$$h_A = \frac{G^2}{2g\omega^2 d} \int_0^l \frac{\lambda}{\gamma^2} dl \quad (1)$$

Для такого решения вопроса нужно знать закон распределения температуры вдоль трубопровода. Это позволит приближенно определить для каждого участка трубопровода коэффициент вязкости жидкости, объемный вес, число Рейнольдса и коэффициент λ .

Интеграл $\int_0^l \frac{\lambda}{\gamma^2} dl$ можно также вычислить, если изобразить зависимость $\frac{\lambda}{\gamma^2}$ от l графически. В этом случае он будет равен площади под функцией $f(\frac{\lambda}{\gamma^2})$. При этом следует обратить внимание, что при нахождении λ по диаграмме Никурадзе мы сталкиваемся с изменением вида диаграммы в зависимости от температуры потока (рис. 2) [3].

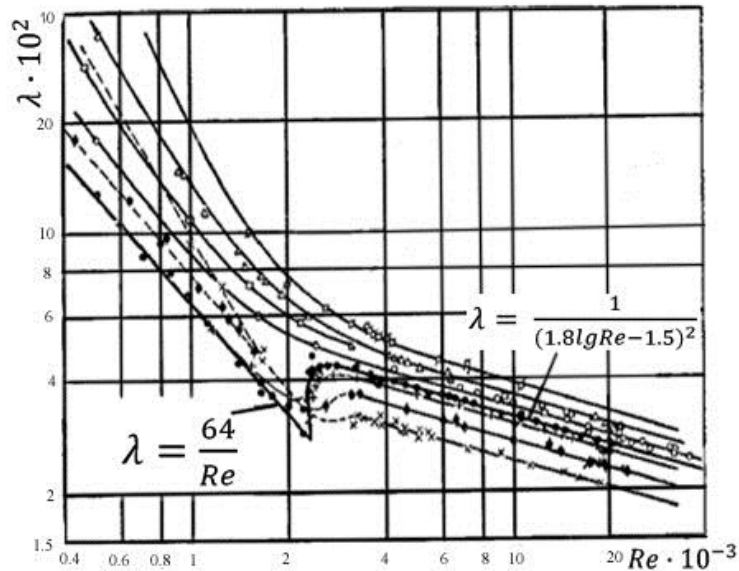


Рис. 2. Зависимость среднего значения коэффициента λ от Re при неизотермическом потоке в гладких трубах по опытам Михеева

Искусственные нейронные сети

Искусственные нейронные сети представляют собой устройства параллельных вычислений, состоящие из множества взаимодействующих простых процессоров.

Нейронная сеть является совокупностью элементов, соединенных некоторым образом так, чтобы между ними обеспечивалось взаимодействие. Эти элементы, называемые также нейронами, или узлами, представляют собой простые процессоры, вычислительные возможности которых обычно ограничиваются некоторым правилом комбинирования входных сигналов и правилом активизации, позволяющим вычислить выходной сигнал по совокупности входных. Выходной сигнал элемента может посылаться другим элементам по взвешенным связям, с каждой из которых связан весовой коэффициент или вес. В зависимости от значения весового коэффициента передаваемый сигнал или усиливается, или подавляется.

Структура связей отражает детали конструкции сети, а именно то, какие элементы соединены, в каком направлении работают соединения и каков уровень значимости (т.е. вес) каждого из соединений. Задача, которую понимает сеть, описывается в терминах весовых значений связей, связывающих элементы.

С каждым процессором (т.е. обрабатывающим элементом сети) связывается набор входящих связей, по которым к данному элементу поступают сигналы от других элементов сети, и набор исходящих связей, по которым сигналы данного элемента передаются другим элементам.

Каждая связь определяется тремя параметрами: элементом, от которого исходит данная связь, элементом, к которому данная связь направлена, и числом, указывающим весовой коэффициент.

Данные, используемые для обучения нейронной сети, обычно разделяются на две категории: одни данные используются для обучения, а другие – для тестирования. На

самом деле реальные качества нейронной сети выявляются только во время тестирования, поскольку успешное завершение обучения сети должно означать отсутствие признаков неправильной работы сети во время ее тестирования.

Структура связей отражает то, как соединены элементы сети. Для решения поставленной задачи подходят многослойные или слоистые сети, схематично представленные на рис. 3 [4].

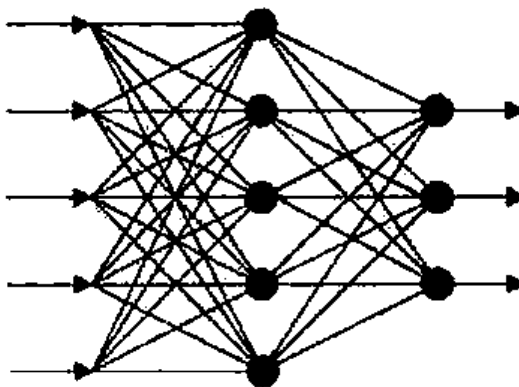


Рис. 3. Многослойная нейронная сеть

В многослойных нейронных сетях нейроны объединяются в слои. Слой содержит совокупность нейронов с едиными входными сигналами. Число нейронов в слое может быть любым и не зависит от количества нейронов в других слоях.

Нейронные сети позволяют с любой точностью вычислять произвольную непрерывную функцию. Следовательно, с их помощью можно сколь угодно точно аппроксимировать функцию, порожденную любой непрерывной системой.

Многослойная сеть с одним скрытым слоем и сигмоидными функциями активации, обучаемая по градиентному алгоритму, может аппроксимировать функции с заданной точностью в случае отсутствия ограничения на число базовых элементов в слое [5].

Описание экспериментальной установки и расчетная часть

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 4. Она представляет собой замкнутый контур циркуляции 1, выполненной из трубы внутренним диаметром 64 мм и длиной 2065 мм. Материал трубопровода нержавеющая сталь. Мощность варьируется от 0 до 10 кВт.

В контуре имеется обогреваемый пропусканием электрического тока подъемный участок 2 и охлаждаемый водопроводной водой опускной участок контура циркуляции 3. На выходе из подъемного участка установлен бак 4 с запасом теплоносителя. В состав стенда входит система компенсации изменения объема теплоносителя в воде бака, снабженного уровнемером и необходимой аппаратурой; система заполнения и осушения стенда; расходомерное устройство охлаждающего контура циркуляции; система энергоснабжения и управления.

В качестве примера получаемых результатов в табл. 1 приводятся экспериментальные данные при мощности установки $N = 10$ кВт. При этом использованы следующие условные обозначения температуры: T1-1 – температура на входе в обогреваемый участок; T1-8 – температура на выходе из обогреваемого участка; T2-1 – температура на входе в теплообменник со стороны контура охлаждения, T2-3 – температура на выходе из теплообменника со стороны контура охлаждения.

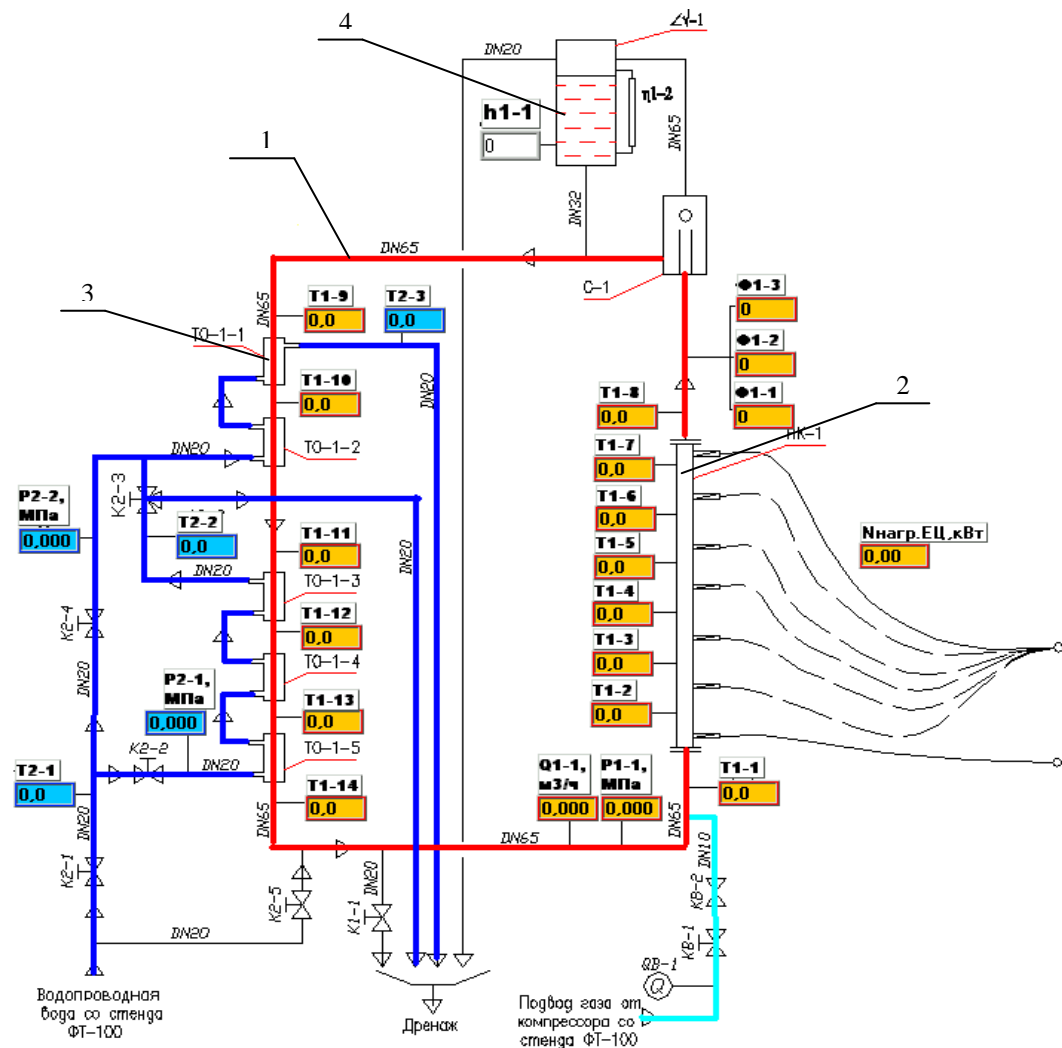


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:
 1 – замкнутый контур циркуляции теплоносителя; 2 – подъемный участок;
 3 – опускной участок; 4 – бак запаса теплоносителя

Таблица 1
 Экспериментальные значения температур, °С
 при фиксированной мощности нагрева

T1-1	T1-8	T2-1	T2-3
30,4	51	5,9	10,1
44,8	60,7	5,5	10,8
55,2	70,7	5,3	12,5
65,7	74,6	5,2	12,1
70,1	82,3	4,9	13,7
76,2	85,9	4,7	13,5
80,6	89,2	4,5	14,1
84,5	92,2	4,5	14,1
87,3	95	4,5	15,5
90	97	4,5	16,5
91,9	97,7	4,7	16,7
93,4	99,8	4,5	16,7
95,2	100,1	4,4	16,3
96,2	100,7	4,3	16,7

В замкнутом контуре, на некоторой части которого генерируется пар, плотность среды в подъемных и опускных линиях различна, и вследствие действия сил гравитации возникает естественная циркуляция. Разница в значениях плотности среды опускных и подъемных участков создает движущий напор, величина которого для вертикальных каналов определяется из соотношений, записанных для давления в нижней точке контура циркуляции. При движении среды величину этого давления можно выразить двояким образом:

$$P = P_0 + h \rho_{\text{оп}} g - \Delta P_{\text{тр}}^{\text{оп}}, \quad (2)$$

$$P = P_0 + h \rho_{\text{под}} g - \Delta P_{\text{тр}}^{\text{под}}, \quad (3)$$

где h – высота контура; $\rho_{\text{оп}}$, $\rho_{\text{под}}$ – средняя плотность среды на опускном и подъемном участках; $\Delta P_{\text{тр}}^{\text{оп}}$, $\Delta P_{\text{тр}}^{\text{под}}$ – гидравлическое сопротивление опускного и подъемного участков; P_0 – давление над зеркалом испарения; g – ускорение свободного падения.

Из соотношений (2) и (3):

$$h g (\rho_{\text{оп}} - \rho_{\text{под}}) = \Delta P_{\text{тр}}^{\text{оп}} + \Delta P_{\text{тр}}^{\text{под}}, \quad (4)$$

$$h g (\rho_{\text{оп}} - \rho_{\text{под}}) - \Delta P_{\text{тр}}^{\text{под}} = \Delta P_{\text{тр}}^{\text{оп}}. \quad (5)$$

Левая часть (4) называется движущим напором естественной циркуляции, правая часть (5) – полезным напором естественной циркуляции. Движущий напор расходуется на преодоление местных сопротивлений, а также потерь на трение и ускорение во всем контуре. Движущий напор, уменьшенный на величину гидравлических потерь в подъемном участке (полезный напор), может быть определен путем измерения гидравлических потерь опускного участка. Для данного контура при определенном значении мощности, подводимой к обогреваемой части, величины движущего – $S_{\text{дв}}$ и полезного $S_{\text{пол}}$ напоров, как и гидравлических потерь, определяются массовым расходом жидкости в контуре. Чем выше массовый расход M , тем ниже $S_{\text{дв}}$ и $S_{\text{пол}}$ и тем выше P .

Массовый расход воды в первом контуре из уравнения баланса мощности на обогреваемом участке (при нагреве)

$$M = N / C_p (T_{1-8} - T_{1-1}). \quad (6)$$

Теперь определим объемный расход и скорость течения рабочего тела:

$$Q = M/\rho. \quad (7)$$

$$V = Q S. \quad (8)$$

Зная среднюю скорость потока, можно вычислить значение числа Рейнольдса, по диаграмме Никурадзе определить, в каком режиме течения жидкости мы находимся, и вычислить коэффициент гидравлического трения на обогреваемом участке:

$$\text{Re} = V \cdot d/\nu. \quad (9)$$

По полученному значению числа Рейнольдса определим режим течения жидкости – ламинарный. Тогда коэффициент гидравлического трения будет определяться по итерационной формуле:

$$\lambda = 64/\text{Re}. \quad (10)$$

Таблица 2

Результаты расчета параметров потока теплоносителя

M , кг/ч	Q , м ³ /ч	V , м/с	ν , (м ² /с) 10 ⁻⁶	Re	λ
1	2	3	4	5	6
0,385433	0,000385	3,67E-05	0,801	2,792294	22,92022
0,39165	0,000392	3,73E-05	0,658	3,453955	18,52948

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
0,441496	0,000441	4,2E-05	0,475	5,39359	11,86594
0,485646	0,000486	4,62E-05	0,413	6,82361	9,3792
0,539607	0,00054	5,13E-05	0,413	7,581789	8,44128
0,39807	0,000398	3,79E-05	0,365	6,328657	10,11273
0,458157	0,000458	4,36E-05	0,365	7,283926	8,786471
0,516645	0,000517	4,91E-05	0,326	9,19642	6,95923
0,495557	0,000496	4,71E-05	0,326	8,821056	7,255367
0,485646	0,000486	4,62E-05	0,326	8,644635	7,403436
0,476123	0,000476	4,53E-05	0,326	8,475132	7,551505
0,564705	0,000565	5,37E-05	0,294	11,14599	5,741978
0,527876	0,000528	5,02E-05	0,294	10,41907	6,142581
0,622623	0,000623	5,92E-05	0,294	12,28916	5,20784
0,527876	0,000528	5,02E-05	0,294	10,41907	6,142581

Альтернативным путем решения задачи нахождения коэффициента гидравлического трения является использование искусственных нейронных сетей. С помощью экспериментальных данных мы сможем обучить нейронную сеть. В процессе обучения на входы сети подаются значения параметров, определяющих режим течения теплоносителя (в частности, мощность нагрева), а также данные, получаемые в результате эксперимента (температуры T1-1, T1-8, T2-1, T2-3), на выходе же должны получить прогнозируемые значения коэффициента гидравлического трения. После того как ИНС будет обучена, можно будет прогнозировать изменение коэффициента гидравлического трения на ранних стадиях процесса, что позволит своевременно принять необходимые действия по управлению процессом развития ЕЦ.

Выводы

1. С помощью представленной в работе экспериментальной установки и использования расчетных программ, реализующих искусственную нейронную сеть, возможно решение задачи по нахождению коэффициента гидравлического трения в неизотермическом по длине потоке для неустановившегося режима течения жидкости.

2. Одним из результатов решения поставленной задачи может явиться аппроксимация экспериментальных и расчетных данных в виде зависимости коэффициента гидравлического трения от скорости потока и температуры рабочего тела. Данная поверхность позволит уйти от необходимости использования приближенных кривых Рейнольдса, а также использовать данные, полученные при развитии циркуляции, а не при ее установившихся значениях.

3. Построение этой обобщенной поверхности позволит визуализировать и предсказать поведение жидкости в канале, что, в свою очередь, даст возможность выбирать область работы установки с наименьшими потерями энергии потока, а также влиять на поток жидкости, используя имеющиеся для этого способы.

Библиографический список

1. Турченко, М.В. Повышение уровня безопасности установок, работающих на естественной циркуляции теплоносителя / М.В. Турченко, В.В. Андреев // Актуальные вопросы современной техники и технологий: 2-я Международная научная заочная конференция». – Липецк, 2010.
2. Альтшуль, А.Д. Примеры расчетов по гидравлике / А.Д. Альтшуль. – М.: Стройиздат, 1982.

3. **Никулин В.А.** Гидрогазодинамика течений с тепломассообменом / В.А. Никулин. – Ижевск. 1988.
4. **Круглов, В.В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В.В. Круглов, В.В. Борисов. – М.: Горячая линия - Телеком, 2001. – 382 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.07.2011*

M.V. Turchenko, V.V. Andreev, A.V. Duntsev

MODELLING OF FACTOR OF THE HYDRAULIC FRICTION AT THE UNSTEADY CURRENT OF THE LIQUID BY MEANS OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

In the given work the method of definition of factor of a hydraulic friction is considered. By means of experimental data we train a neural network. On network inputs values of the parameters defining a mode of a current of the heat-carrier move (in particular, capacity of heating), and also the data, received as a result of experiment. On exit we should receive predicted values of factor of hydraulic friction. After training of an artificial neural network, we can predict change of factor of a hydraulic friction at early stages of process. It will allow accepting in due time necessary actions on management of development of natural circulation.

Key words: natural circulation, the heat-carrier, hydraulic resistance, artificial neural network.

УДК 004.942

В.Б. Кайдалов, В.Л. Патрушев, А.А. Руин, С.А. Соловьёв

**ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ РОТОРА ПРИ ОТКАЗЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ**

ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»

Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования динамики аварийного выбега гибкого вертикального ротора в страховочных подшипниках. Страховочные подшипники скольжения с сухой смазкой установлены с зазором относительно ротора. В нормальных условиях эксплуатации ротор вращается в электромагнитных подшипниках. Приводятся требования к программным средствам расчёта, а также основные факторы, учёт которых необходим для моделирования роторной системы.

Ключевые слова: динамика, колебания, контакт, моделирование, подшипник, программа, прецессия, резонанс, ротор, трение.

Системы подвеса ротора на электромагнитных подшипниках (ЭМП) находят в технике всё большее применение [1, 2]. Основным достоинством ЭМП является бесконтактное вращение ротора, а следовательно, отсутствие смазки и малое сопротивление вращению. Электронная система управления позволяет менять жёсткостные и демпфирующие характеристики ЭМП в зависимости от движения ротора, открывая широкие возможности активного снижения его вибраций.

В силу конструктивных особенностей ЭМП имеют ограниченную грузоподъёмность, и для их работы требуется стабильный источник электропитания. При достаточно сильных внешних воздействиях (например, сейсмических) или отключении электропитания системы ЭМП ротор отклоняется от оси вращения в радиальных ЭМП, может произойти его касание о статорные элементы роторной машины и вызвать их повреждение. Для исключения аварийных последствий в систему подвеса ротора на ЭМП вводят страховочные подшипники типа подшипников скольжения или качения. Зазор между ротором и СП устанавливается таким образом, чтобы в любых режимах эксплуатации, включая сейсмическое воздействие, исключалось касание ротора и ЭМП.

При проектировании страховочной системы ротора возникает задача поиска конструктивных схем СП, наилучшим образом удовлетворяющих требованиям технологичности и эффективности работы, а также параметров страховочного подвеса, при которых нагрузки на элементы СП не приводят к критичной вибрации роторной машины и разрушению элементов СП.

Обеспечение прочности конструкции СП является необходимым условием. Её обоснование с использованием моделирования осуществляется различными способами. Например, построением масштабной модели; созданием математической модели на ЭВМ (компьютерная модель); моделированием только каких-либо свойств системы с помощью адекватных физических явлений и свойств системы (феноменологическая модель). Идеальным вариантом с точки зрения достоверности данных, является полномасштабное моделирование – опытный образец. Однако основные проблемы при исследовании опытного образца роторной системы и СП связаны с трудностью получения данных, обусловленных быстропротекающими процессами, характерными при выбеге ротора на больших частотах вращения, а также недоступностью информации о работе элементов СП в закрытых зонах (элементы подшипников, контактные поверхности и др.).

Выбег ротора на СП является аварийным режимом. Такой режим конструкция может выдержать ограниченное количество раз. При необходимости проведения серии испытаний, например, для подбора параметров упругих и демпфирующих элементов подшипников потре-

буется изготовление и установка нескольких их комплектов, что значительно увеличивает стоимость полномасштабного моделирования.

По этим причинам на этапе проектирования является целесообразным применение математического моделирования. Нахождение аналитического решения сложно нелинейной системы ротор – СП сопряжено с непреодолимыми на сегодняшний день математическими проблемами. Поэтому используют компьютерное (виртуальное) моделирование, основанное на численных методах расчёта. Виртуальное моделирование представляет собой процесс создания математического прототипа конструкции или её функций на ЭВМ с проведением расчётов, цель которых – воспроизведение поведения конструкции в условиях эксплуатации, включая аварийные ситуации. Применение такого моделирования для динамики ротора позволяет наглядно продемонстрировать характер его взаимодействия с подшипниками, а также оперативно менять как геометрию конструкции, так и параметры модели. Однако в виртуальной модели всегда вводятся упрощения, требующие соответствующего обоснования.

Виртуальное моделирование выбега вертикального ротора в СП

При расчёте задачи на ЭВМ важным этапом является выбор программного средства (ПС). Программа должна адекватно воспроизводить поведение ротора, учитывать факторы, оказывающие заметное влияние на его динамику. ПС должно быть верифицировано в области применения. Верификация подразумевает расчёт тестовых задач и подтверждение достоверности полученных результатов сравнением с экспериментальными данными, либо с решениями, полученными с помощью аналитических расчётов или альтернативными аттестованными ПС.

Выбег ротора с номинальной до низкой частоты вращения может составлять десятки секунд. Для получения достоверных результатов расчётов при дискретизации процесса выбега каждый оборот ротора разбивается на значительное число участков. Например, за время выбега 20 с, с частоты 6000 об/мин (100 Гц) при линейной зависимости между частотой вращения от времени и фиксацией параметров в 12 положениях ротора за один оборот от программы потребуется выполнение 12000 итераций. В зависимости от сложности задачи и мощности ЭВМ вычисление каждой итерации может занимать несколько минут. При решении поисковых и оптимизационных задач необходим многократный расчёт всего процесса выбега. В итоге, общее время расчёта может оказаться неоправданно большим. Для приемлемого времени расчёта задачи в основу программы должны быть заложены методы, обеспечивающие максимальную скорость вычислений. Такому требованию больше удовлетворяют программы твёрдотельного моделирования (типа MSC.ADAMS), чем ПС, использующие метод конечных элементов (типа ANSYS LS-DYNA).

Следующим шагом после выбора ПС является разработка (построение) модели. Создание модели по реальному объекту всегда сопровождается упрощениями, обусловленными существующими ограничениями ПС (из-за возможностей математического аппарата), ускорением времени счета, исключением несущественных факторов нагружения. Однако при расчёте выбега ротора в СП должны учитываться: демпфирование в системе ротор – СП, характеристики контактного взаимодействия тел, жёсткостные характеристики ротора, гироскопические моменты, распределение дисбаланса по длине ротора.

В системе ротор – СП присутствует несколько видов трения, каждый из которых влияет на динамику ротора. Во-первых, это внутреннее трение материала ротора. При относительно большой величине внутреннее трение может приводить к неустойчивому движению ротора со значительными амплитудами колебаний. Внутреннее трение определяется не только материалом, но и конструктивным типом соединения частей составного ротора, посадками навешенных на ротор деталей и способом их закрепления – так называемым конструкционным демпфированием. Идентификация жесткостных характеристик и демпфирующих свойств ротора требуют экспериментального определения. На этапе проектирования такие данные обычно отсутствуют, поэтому приходится использовать значения необходимых параметров, полученных из опыта разработки аналогичных конструкций.

Во-вторых, “сухое” трение (трение Кулона), возникающее при контакте вращающегося ротора с элементами подшипников (здесь и далее понимаются СП), большая величина трения приводит к появлению обратной прецессии, т.е. обкатки ротором внутренней поверхности подшипника в направлении, противоположном вращению. Обратная прецессия вызывает большие нагрузки на элементы подшипника и повышенную вибрацию ротора. В связи с этим учёт “сухого” трения для роторной динамики необходимо. Вместе с аэродинамическими силами в компрессоре или силами тяжения в генераторе, при моделировании роторной системы турбомшины “сухое” трение создаёт момент сопротивления, замедляющий вращение ротора. Для СП, работающих без смазки, подбирают материалы, обеспечивающие минимальное “сухое” трение [3].

Также необходимо учитывать демпфирование в упругих элементах подшипников. В зависимости от конструкции подшипника оно может достигать значительных величин. Демпфирование в упругих элементах, наряду с их жёсткостью, является одним из параметров, варьируемых при моделировании с целью достижения эффективного ограничения уровня вибраций при вращении ротора в подшипнике.

Трение, проявляющееся при взаимодействии двух тел, определяет диссипацию энергии в зоне контакта. Оно зависит от нескольких параметров: материалов тел, состояния их поверхностей, скорости в зоне контакта и пр. В некотором приближении коэффициенты контактного трения могут быть выражены только от скорости контакта (рис. 1).

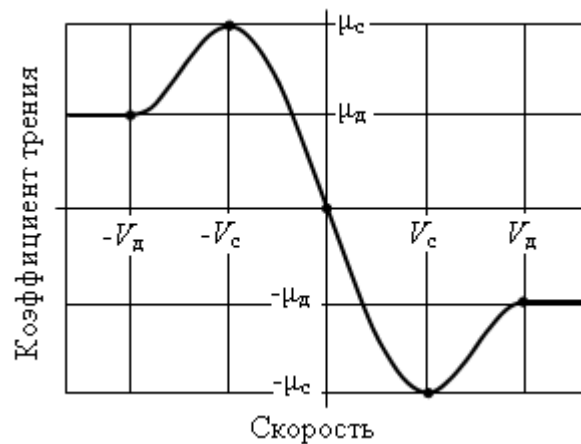


Рис. 1. Зависимость коэффициентов трения от скорости:

μ_c , μ_d — статический и динамический коэффициенты трения;

V_c — скорость, при которой трение достигает максимума;

V_d — скорость, перехода к динамическому трению

Величина внутреннего трения, наряду с внешним трением (трение при контакте ротора с элементами подшипников, трение в подшипниках), сказывается на устойчивости вращения ротора. Это условие, определенное из уравнений движения, имеет вид [4]

$$\omega < \omega_{\text{крит}} = \Omega(1 + K_e / K_i),$$

где Ω — собственная частота колебаний системы; K_e , K_i — коэффициенты внешнего и внутреннего трения соответственно.

Таким образом, ротор при наличии возмущения может терять устойчивость движения при превышении некоторой критической скорости вращения, зависящей от отношения внешнего и внутреннего трения.

При выбеге ротора, вращающегося с рабочей частотой, лежащей в закритической области, неизбежно прохождение им резонансных зон, в которых СП испытывают значительные нагрузки, определяющие их прочность. Корректное моделирование поведения ротора в

резонансных зонах требует учёта его гибкости. При использовании метода конечных элементов построение модели гибкого ротора не вызывает затруднений. Применяя ПС твёрдотельного моделирования это сделать несколько сложнее. В таких программах обычно предусмотрен импорт гибких тел из других CAD систем, однако при передаче модели сохраняются не все её свойства. Например, в ПС MSC.ADAMS не передаются инерционные характеристики, сказывающиеся на гироскопических эффектах, внутреннее трение материала.

В ПС твёрдотельного моделирования в ряде случаев можно создать гибкий ротор комбинацией твёрдых тел и упругих балок или пружин. При этом массово-инерционные характеристики ротора сохраняются, а внутреннее трение материала создаётся за счёт введения демпфирования в упругие элементы. Подбор жёсткости упругих элементов расчётной модели осуществляется решением оптимизационной задачи по обеспечению соответствия оригиналу ротора форм и значений собственных частот изгибных колебаний. Если ротор только проектируется, то его собственные частоты колебаний можно получить расчётным анализом конечно-элементной модели, адекватно описывающей оригинал.

При отказе ЭМП смещение вращающегося ротора из своего начального положения вызывается инерционными силами, обусловленными остаточной неуравновешенностью после балансировки. Эти силы определяют скорость взаимодействия с элементами СП и уровень вибраций ротора. Величина дисбаланса в первом приближении может приниматься исходя из допустимого значения остаточного удельного дисбаланса по нормативным документам (например, ГОСТ ИСО 1940-1-2007).

Распределение дисбаланса определяется многими факторами: возможным проведением балансировки ротора по частям; жесткостью разъемов и значениями предельных отклонений диаметров насаженных деталей ротора; износом вращающихся деталей, искажением их формы и ослаблением разъемов в процессе эксплуатации. При отсутствии данных по распределению дисбаланса выбирается худший вариант его распределения для формы собственных колебаний ротора, близких к рабочей частоте вращения. В этом случае реализуется консервативный подход. В модели ротора задание дисбаланса может быть осуществлено различными способами: смещением центра масс участков ротора; добавлением к ротору масс, не оказывающих существенного влияния на его инерционные характеристики.

Для исследования выбега ротора в подшипниках, установленных с зазором, важным является адекватность моделирования контакта. При описании контакта обычно используют теорию Герца [5]. Нормальная к поверхности контактная сила вычисляется

$$F_c = n\alpha k x_l^n \dot{x}_l + nk x_l^{n-1} x_l, \quad (1)$$

где $n = 1,5$ – показатель степени; α – коэффициент восстановления (зависит от геометрии и материала контактируемых поверхностей); k – параметр, характеризующий местную жёсткость (зависит от геометрии и материала контактируемых поверхностей); x_l – величина местной деформации от проникновения одной контактирующей поверхности в другую.

При контакте вращающегося ротора с подшипником дополнительно на ротор и элементы подшипника действует тангенциальная сила F_τ , вызванная трением Кулона,

$$F_\tau = \mu F_c, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения.

Сложность в моделировании контакта связана с необходимостью получения его параметров, в частности, потери энергии при соударениях, “сухого” трения, при скольжении одного из взаимодействующих тел по другому, жёсткости контактирующих поверхностей. Для получения таких данных могут потребоваться экспериментальные исследования.

Контактное взаимодействие тел в сложных расчётных моделях СП вызывает вычислительные трудности и требует значительного машинного времени, в частности, из-за близости диаметров ротора и внутренних поверхностей подшипников или большого количества контактных поверхностей. Ускорить вычисления в этом случае можно, если вместо наложения на тела условий контакта использовать усилия, действие которых определяется функционально. Рассмотрим, например, контакт вращающегося ротора с СП колодочного типа. Сле-

лав допущение, что колодка может контактировать с ротором, например, только в трёх точках A, B, C (рис. 2), взаимодействие ротора с колодкой будет иметь место, когда расстояние от центра ротора до любой из этих точек станет равным радиусу R ротора. В этом случае на колодку будут действовать: нормальные силы F_{n1}, F_{n2} , величина которых определяется по (1), а направление – положением центра ротора относительно центра подшипника D ; силы трения $F_{\tau1}, F_{\tau2}$, вычисляемые по значениям F_{n1} и F_{n2} по формуле (2).

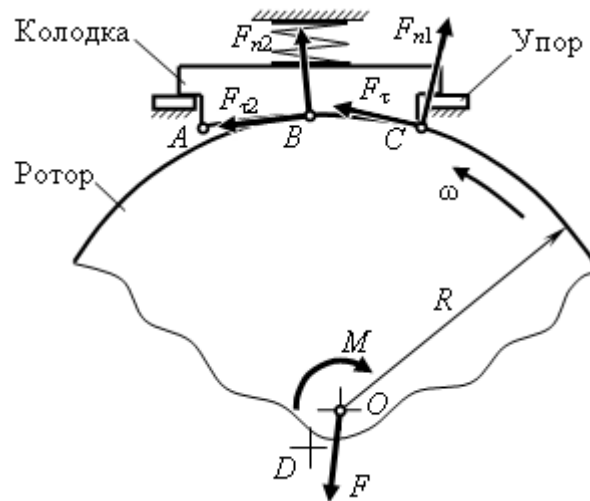


Рис. 2. Усилия, действующие на ротор и колодку СП при их контакте

Реактивные усилия, передаваемые со стороны колодки на ротор – сила F и момент сопротивления M , – могут быть непосредственно приложены к его центру O . Величина и направление силы F определяются векторной суммой F_{n1} и F_{n2} . Момент $M = (F_{\tau1} + F_{\tau2}) \cdot R$ действует в направлении, противоположном вращению.

Особо следует рассмотреть проблемы моделирования нелинейных элементов СП. На рис. 3 приведена характеристика предварительно поджатой на $F_1 = 5$ кН фрикционной кольцевой пружины. На графике точка, соответствующая ходу пружины, равному нулю – точка неопределённости, так как этому ходу пружины соответствует диапазон значений нагрузки от 2 до 5 кН. Расчётная программа не может корректно выполнять вычисления при такой характеристике. Чтобы обойти это затруднение, делается следующее допущение. В точке поджатия пружины (рис.3) с её стороны на колодку СП действует упругая сила 2 кН. При незначительном ходе (сжатии) пружины на величину Δu (например, в пятьдесят раз меньше её рабочего хода) достигается упругая сила 5 кН. Жёсткость пружины на участке сжатия от 0 до Δu будет составлять $C = F_1 / \Delta u$ соответственно.



Рис. 3. Характеристика предварительно поджатой фрикционной кольцевой пружины

Вывод

В связи со спецификой задачи разработки конструкции СП, обеспечивающей безопасность гибкой роторной системы, на этапе проектирования целесообразно моделирование процесса выбега ротора на ЭВМ. При моделировании необходимо решить две проблемы. Первая – проведение экспериментальных исследований для определения необходимых данных (уровня демпфирования в системе ротор – СП, параметров контактного взаимодействия тел, распределение дисбаланса). Восполнить отсутствие данных можно использованием опыта создания аналогичных конструкций, либо применением консервативного подхода к решению задачи. Вторая проблема связана с ограниченными возможностями программных средств, с помощью которых происходит процесс моделирования, а также мощности вычислительных машин. Эти ограничения требуют создания расчётных моделей и организации вычислительного процесса, экономно использующих ресурсы вычислительной техники.

Библиографический список

1. **Schweitzer, G.** Active magnetic bearings. Basics, properties and applications / G. Schweitzer, H. Bleuler, A. Traxler // Vdf Hochschulverlag AG an der ETH. – Zurich. 1994. – 244 p.
2. **Yang, Xu.** Design aspects and achievements of active magnetic bearing research for HTR-10GT / Xu Yang [at al.] // Nuclear Engineering and Design. 238 (2008). P. 1121–1128.
3. **Baxi, C.B.** Telengator. Tribological testing of catcher bearing materials of gas turbine modular helium reactor (GT-MHR) turbomachine / C.B. Baxi [at al.] // Proceedings of ICAPP'10. – San Diego, CA, USA, June 13-17, 2010.
4. **Болотин, В.В.** Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости / В.В. Болотин. – М.: Физматгиз, 1961. – 339 с.
5. Машиностроение. Энциклопедия / Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. Т. 1-3. Кн. 1. / К.С. Колесников [и др.]. – М: Машиностроение, 1994. – 534 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.08.2011*

V.B. Kaydalov, V.L. Patrushev, A.A. Ruin, S.A. Soloviev

MODELLING PROBLEMS OF THE ROTOR DYNAMICS IN CASE OF ELECTROMAGNETIC BEARINGS FAILURE

The article deals with considering questions about computer modelling rotor emergency overrun dynamics of the vertical flexible rotor in catcher bearings. Friction catcher bearings with dry lubrication are installed with air gap between rotors. For normal working conditions rotor is rotating in electromagnetic bearings. Requirements for computational software and basic influencing factors are introduced, which are necessary to take into consideration for correct modelling of the rotor system.

Key words: dynamics, vibration, contact, modelling, bearing, software, precession, resonance, rotor, friction.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 658.512

К.С. Ившин, Л.Е. Ермолаева

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДИЗАЙНА ПОЛИМЕРНЫХ ПАНЕЛЕЙ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ ОСОБО МАЛОГО КЛАССА

ГОУВПО «Удмуртский государственный университет»

Разработаны методические основы дизайна полимерных панелей легковых автомобилей особо малого класса с учетом факторов, влияющих на процесс моделирования панелей, что позволяет улучшить качество формального решения кузова автомобиля. Рассмотрены методические особенности электронного геометрического моделирования полимерных панелей автомобиля особо малого класса.

Ключевые слова: полимерные панели, кузов, методика, дизайн, автомобиль.

В настоящее время отсутствуют методические основы моделирования внешних полимерных панелей в дизайне легкового автомобиля особо малого класса. Информация по дизайн-проектированию панелей имеет разрозненный характер. Данные методические основы должны охватывать этапы дизайн-проектирования панелей от художественного образа до получения художественно-конструкторской документации.

Легковые автомобили особо малого класса являются актуальным и активно развивающимся направлением современного дизайна транспортных средств [1–4], автомобили данного класса применяются в сельском хозяйстве, используются как городской коммерческий транспорт и как индивидуальные транспортные средства. В основе концепции этого направления транспортных средств лежат такие факторы, как минимализация размеров автомобиля, удешевление его стоимости, унификация и многофункциональность.

В процессе разработки транспортных средств, в частности, при разработке кузовов, закладываются новые материалы (применяются разные полимеры). Производственные возможности, функциональное назначение, особенности конструкции и расположение внутренних агрегатов влияют на деление общей полимерной оболочки кузова автомобиля особо малого класса на отдельные панели.

Основным признаком оболочки, набранной из панелей, является разбивка разъемами на отдельные элементы. Элементы имеются стационарные, закрепленные на силовом каркасе, и подвижные (откидывающиеся двери, люки и т.д.). Каждый элемент панельной оболочки имеет фланцы для базировки относительно друг друга или на силовом каркасе, размещения крепежных деталей и перекрытия конструктивных зазоров. Соединенные элементы представляют замкнутый объем, скрывающий конструктивные и крепежные элементы, для доступа к внутреннему пространству некоторые панели проектируются съемными или откидными (рис. 1).

В процессе структурирования информации по полимерным панелям кузова автомобиля особо малого класса выявлены общие факторы, влияющие на процесс дизайн-проектирования внешних панелей кузова:

- *эстетический* – замысел дизайнера, форма, общая композиция (моделирование об-

разного решения оболочки кузова), силуэт кузова, композиция членений (разбивка проектируемого изделия на панели и анализ визуального восприятия светотеневых нюансов стыков панелей, композиционное пропорционирование панелей в общей оболочке и форме);

- *эргономический* – безопасность, шум, вибрация, обзорность, посадка водителя и пассажира;
- *конструктивно-технологический* – выбор технологии производства (особенности технологии и производственного оборудования, ограничения и возможности), выбор материала для изготовления панели (прочность, коррозионная стойкость, экологичность – производство, утилизация, использование), выбор видов стыковки панелей в изделии, методы крепления панелей (склейка, клепка и др.), унификация, прочность панели (ребра жесткости, подштамповки и прочие конструктивные элементы), энергоемкость, разбивка кузова на панели, минимальная масса изделия, аэродинамичность, вентиляция;
- *функциональный* – безопасность, герметичность, микроклимат.

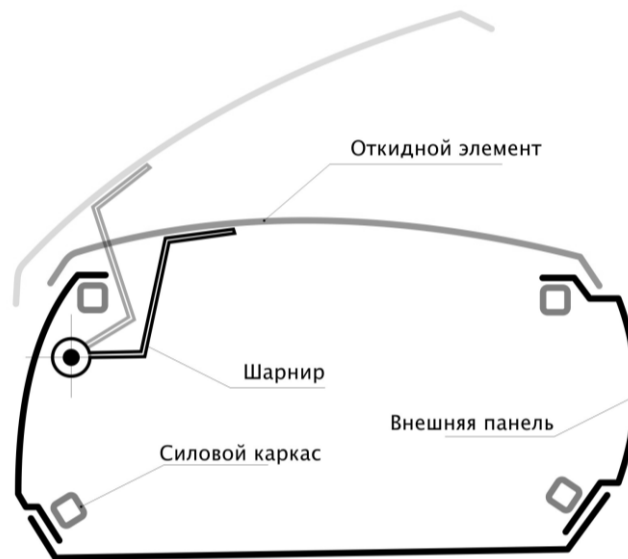


Рис. 1. Принципиальная схема каркасно-панельной конструкции

Работа по дизайн-проектированию панелей кузова начинается с постановки задачи (аналитический этап): исследуется тип проектируемого транспортного средства, функциональное решение, область применения, условия эксплуатации, социальное решение, формулируется эмоциональная составляющая формы и общие композиционные, стилевые решения. Производится обзор информации о существующих материалах, производственных технологиях. Формулируются основные параметры и требования к проектируемому транспортному средству.

Общая концепция формируется на втором этапе дизайн-проектирования (этап эскизирования). Посредством 2D (рукотворного или электронного) и 3D эскизного моделирования формируется внешняя оболочка легкового автомобиля особо малого класса, ее общие габаритные параметры, производится композиционная гармонизация формы. Параллельно принимается решение об использовании определенных материалов и технологий производства, наиболее удовлетворяющих требованиям данной формы. Производится исследование на соответствие формы эргономическим параметрам человека и примерная разбивка общей оболочки кузова на отдельные панели. Существует несколько факторов разбивки объема кузова на отдельные панели:

- *функциональный* – определяет доступность для обслуживания скрытых под панелями агрегатов, а также придание необходимым зонам рельефной фактуры;

- *технологический* – ограничивает размеры и параметры формы панелей в зависимости от технологии производства и возможностей производственного оборудования;
- *эстетический* – разделение общего объема на панели для получения эстетически приятного (визуального и тактильного) восприятия формы изделия.

На рис. 2 представлен алгоритм дизайн-проектирования полимерных панелей кузова легкового автомобиля особо малого класса.

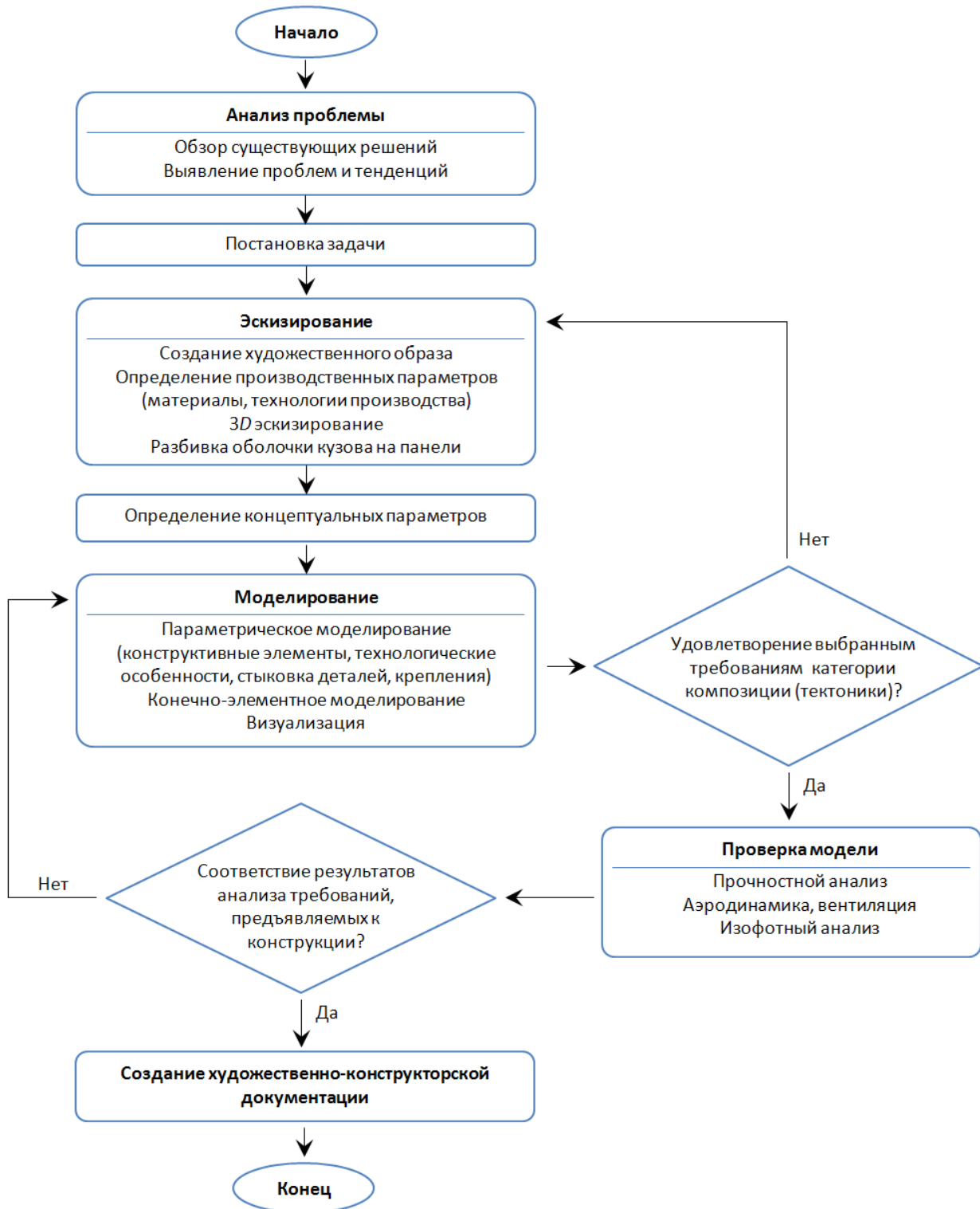


Рис. 2. Блок-схема алгоритма дизайн-проектирования полимерных панелей кузова легкового автомобиля особо малого класса

Третьим этапом является этап моделирования, т.е. создания параметрической 3D модели оболочки кузова. Существует несколько видов электронного моделирования. Их разделяют по наличию истории построения объекта (параметрическое, непараметрическое, смешанного типа) и по виду элементов построения (табл. 1) [5–8].

Таблица 1

Виды 3D моделирования по виду элементов построения

Виды моделирования	Элементы построения	Программы*	Модель
Полигональное	Полигон, кривая (poly, nurbs, mesh)	<i>Alias, 3D max, Maya, Rhino</i>	Полигональная
Каркасное	Точка и линия (line & point)	<i>Alias ST, AutoCAD, CATIA, IsemSurf</i>	Каркасная
Поверхностное	Точка, линия, поверхность (surface)	<i>Alias ST, AutoCAD, CATIA, IsemSurf</i>	Поверхностная
Твердотельное	solid (твердое тело)	<i>Alias ST, AutoCAD, CATIA, IsemSurf, SolidWorks</i>	Твердотельная модель
Конечно-элементное	Узел, конечный элемент, сетка (point, lines, mesh)	<i>Ansys</i>	Конечно-элементная

* курсивом выделены программы, специализирующиеся на определенном виде моделирования.

При проектировании моделей полимерных панелей кузова автомобиля особо малого класса применяется поверхностное моделирование, имеющее рядом особенностей: способность создавать сложные геометрические поверхности (криволинейные); возможность получения трехмерного изображения; способность распознавать особое построение на чертежах; получение качественного изображения путем визуализации (*rendering*); недостатком поверхностного моделирования является трудность отображения внутренних областей.

На этапе моделирования производится построение всех стыков, креплений, различных функциональных рельефов. Их расположение и геометрия решается исходя из общей концепции формы кузова. На данном этапе дизайн-проектирования создаются несколько моделей панели: параметрическая, полностью отражающая геометрию панели, и конечно-элементная, необходимая для проведения прочностного анализа. На основе электронной геометрической модели осуществляется визуализация (*rendering*), позволяющая визуализировать форму проектируемой панели при разных типах освещения и сборку кузова ТС, проанализировать эффекты эмоционального восприятия, которые могут возникнуть в разных условиях среды. Визуализация модели позволяет устранить возможные недочеты и ошибки без воплощения модели в материале, что существенно снижает временные и материальные затраты.

После получения параметрической модели проектирование выходит на этап проверки ее соответствия техническим и эстетическим требованиям. Посредством прочностных анализов (модального, статического, нелинейного) анализируется надежность спроектированного кузова ТС, его пригодность к эксплуатации человеком. Изофотный анализ позволяет проверить геометрию поверхностей панелей, устранить возможные недочеты, нарушающие общую гармонию формы. Так же производится исследование аэродинамики и вентиляции кузова. Все эти виды анализов позволяют вовремя устранить возможные ошибки дизайнера, вернувшись на предыдущий этап дизайн-проектирования.

На каждом этапе дизайн-проектирования внешних панелей кузова автомобиля особо малого класса должен осуществляться контроль качества структуры формы кузова, его соответствия поставленным задачам. В процессе дизайн-проектирования на каждом этапе долж-

ны быть учтены факторы, влияющие на процесс моделирования, что позволяет улучшить качество формального решения кузова автомобиля особо малого класса и существенно сократить временные и материальные затраты.

Библиографический список

1. **Ившин, К.С.** Направления разработки в дизайне малогабаритных микролитражных автомобилей / К.С. Ившин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 4–2. С. 85–90.
2. Автомобили особо малого класса (квадрициклы) с гибридной энергосиловой установкой / В.А. Умняшкин [и др.]; под общ. ред. В.А. Умняшкина. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2004. – 138 с.
3. **Ившин, К.С.** Проблемы и перспективы развития малогабаритных микролитражных транспортных средств / В.А. Умняшкин, К.С. Ившин // Проблемы и перспективы автомобилестроения в России: материалы 53-й Междунар. научно-техн. конф. ААИ РФ. – Ижевск, 2006. С. 186–198.
4. **Ившин, К.С.** Квадрициклы. Перспективы развития / В.А. Умняшкин, Д.В. Скуба, К.С. Ившин // Транспорт Урала. 2006. № 3. С. 72–81.
5. **Ившин, К.С.** Электронное геометрическое моделирование в дизайне промышленных изделий и транспортных средств // Дизайн. Материалы. Технология. 2009. № 1. С. 105–108.
6. **Ившин, К.С.** Методика выбора функционала программного обеспечения в дизайн-проектировании / К.С. Ившин, С.Н. Зыков // Дизайн. Материалы. Технология. 2010. № 3. С. 131–132.
7. **Норенков, И.П.** Автоматизированное проектирование / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 188 с.
8. **Сомов, Ю.А.** Композиция в технике / Ю.А. Сомов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: «Машиностроение», 1987. – 288 с.

*Дата поступления
в редакцию 21. 07.2011*

K.S. Ivshin, L.E. Ermolaeva

METHODICAL BASE OF THE DESIGN OF THE POLYMERIC PANELS OF THE BASKET OF THE MINI CAR

In article is designed methodical bases of the design of the polymeric panels of the mini cars, taking into account factors, influencing upon process of modeling of the panels that allows to perfect the quality of the formal decision of the basket of the mini car. They are considered methodical particularities of electronic geometric modeling of the polymeric panels of the mini car.

Key words: polymeric panels, basket, methods, design, mini car.

УДК 629.113

В.Г. Дыгало, А.А. Ревин

ВИРТУАЛЬНО-ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)

Рассматривается виртуально-физическая технология моделирования при проектировании систем активной безопасности колёсных машин.

Ключевые слова: виртуально-физическая технология моделирования, колёсная машина, система активной безопасности, эффективность торможения, имитатор вождения.

Каждый год в мире происходит огромное количество ДТП. Примерно с 60-х годов прошлого века начинают активно развиваться системы пассивной безопасности (рис. 1). С конца 70-х одновременно с появлением антиблокировочных систем (АБС) на серийных машинах начинается бурное развитие систем активной безопасности.

Применение новых систем активной безопасности усложняется, поскольку совместно с усложнением исполнительных механизмов совершенствуются и расширяются алгоритмы работы системы [1–3].

Данный фактор приводит к тому, что очень сложно на этапе испытаний и оценки работы системы в совокупности с шасси автомобиля идентифицировать все недочеты, допущенные при проектировании. А это приводит к значительным временным и финансовым затратам.

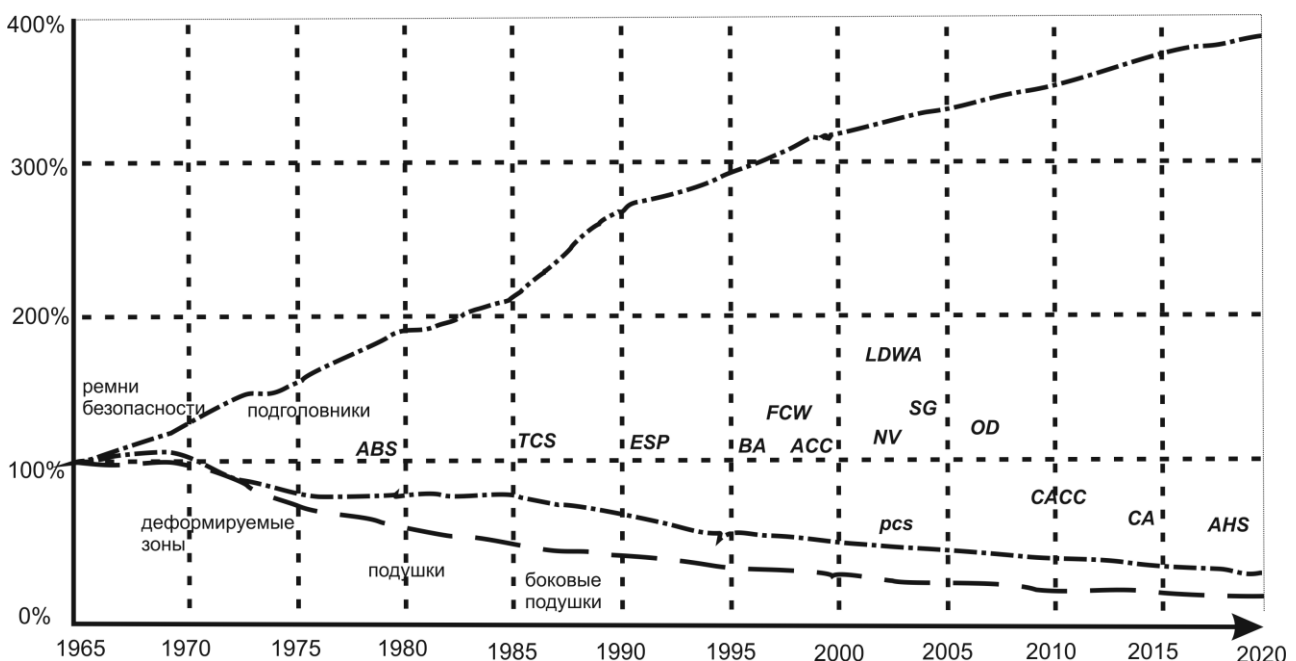


Рис. 1. Развитие систем безопасности, устанавливаемых на автомобиль

В настоящее время все производители стараются ускорить цикл проектирования колёсных машин, одновременно совершенствуя модельный ряд, предлагая все более новые системы, упрощающие процесс управления колёсной машиной в сложных режимах движения. В области проектирования и производства колёсных машин за последние годы произошли очень серьезные изменения. Можно даже заключить, что цифровые технологии набрали в

середине 90-х годов некую критическую массу, которая позволила почти всем крупным производителям разом совершить качественный скачок.

Конкурентная борьба вынуждает производителей все больше и больше сокращать сроки разработки и организации производства новых моделей. Кроме того, производимую продукцию необходимо сертифицировать согласно международным нормативам и требованиям.

Данное стремление приводит к все большему усложнению систем, что влечет за собой вопрос о выявлении ошибок на ранних стадиях проектирования автомобиля.

Известно много случаев, когда новая модель, запущенная в серийное производство, отзывалась на завод или в сервисные центры для устранения недостатков, допущенных при проектировании изделия. Данное явление особенно опасно в случае ошибок в системах активной безопасности, таких как тормозные.

Отечественные производители автотранспортных средств в последнее время активизировали работы по установке АБС на свою продукцию. Известно, что основные требования к тормозным системам автомобилей с АБС определяют правила № 13 ЕЭК ООН (ГОСТ Р 41.13, ГОСТ Р 41.13Н). Внедрение АБС на конкретных типах автомобилей связано с определенными трудностями и материальными затратами, особенно остро проявляющимися на этапе доводки. Строительство собственных специальных полигонов для испытания тормозных автоматизированных систем чрезвычайно дорого из-за специальных требований к поверхности дороги. Следует признать, что полигонные испытания не являются идеальным средством для проведения доводочных работ и используются фирмами на этапе заключительной оценки, поскольку они не позволяют обеспечить высокую воспроизводимость условий испытаний автомобиля при оценке его свойств наиболее эффективным методом сравнения состояний. Это приводит к невозможности отслеживания влияния какой-либо отдельно взятой настройки блока управления АБС, структурной схемы или выбранного технического решения исполнительской части на процесс торможения в целом. Кроме того, новыми регламентами допускается проведение альтернативных испытаний при сертификации новых систем (приложение 21 к правилам 13 ЕЭК ООН).

Проведение испытаний на стендовом оборудовании в лабораторных условиях дает несомненные преимущества перед полигонными. Возможно обеспечение отличной воспроизводимости условий испытаний, а также обеспечение секретности разработок от посторонних глаз. Проведение испытаний в лаборатории не зависит от погодных условий и времени суток, что позволяет значительно сократить сроки разработки и адаптации новых систем. Однако современные стенды классического типа (роликовые, барабанные и ленточные), обеспечивающие скорость движения колёсной машины свыше 100 км/ч, довольно дорогостоящи и громоздки. Например, стенды, разрабатываемые для крупнейших автомобилестроительных концернов фирмой MTS, обходятся заказчику в сумму ~ 10 млн долл.

При разработке новых систем перед конструкторами встает вопрос апробирования принятых при проектировании решений. Если рассмотреть цикл проектирования тормозных систем, то можно отметить, что несомненную помощь на определенных этапах оказывают комплексы CAD/CAE/CAM, но в случае проведения испытаний тормозных и других систем возможностей данных комплексов оказывается недостаточно.

Выходом из создавшейся ситуации является дальнейшее совершенствование стендового оборудования и методов испытаний, которые в рамках доводочных испытаний позволяют получить необходимую информацию о разработанной системе, оценить эксплуатационные свойства колёсной машины с АБС в режиме торможения, выбрать оптимальную структуру управления тормозными механизмами.

Для подготовки к сертификации и проверки работоспособности систем колёсной машины экономически целесообразно после этапа проектирования осуществлять проверку принципиальной правильности принятия решений на основе проведения комплексного моделирования систем и агрегатов колёсной машины.

Проведенные с 70-х годов исследования в области комплексной технологии модели-

рования (КТМДА) позволяют сделать вывод о возможности проведения виртуальных лабораторных испытаний новых образцов тормозных систем и проверки правильности принятых решений [4–11].

Например, несмотря на применение комплексов CAD/CAE/CAM на этапе функциональных испытаний, возможностей последних зачастую оказывается недостаточно при проектировании и отработке перспективных систем.

В отличие от существующего стендового оборудования для испытания тормозных систем, виртуально-физическая технология моделирования предполагает замену реального колеса на математическое описание.



Рис. 2. V-цикл проектирования системы активной безопасности

Однако, после проведения функциональных испытаний, для запуска новой модели системы автомобиля в серийное производство необходимо проведение большого количества доводочных испытаний, в ходе которых ведется проверка на соответствие нормативным требованиям как автомобиля в целом, так его отдельных узлов и агрегатов. Дорожные испытания являются наиболее ресурсоемкими и дорогими. Причем проведение данного вида испытаний возможно лишь на специально оборудованных для этого полигонах (на территории РФ – НИЦИАМТ г. Дмитров, 21 НИИ МО г. Бронницы). К тому же дорожные испытания являются и самыми опасными как для водителя оператора – испытателя, так и для дорогостоящей измерительной техники, не говоря уже о самой исследуемой колёсной машине. Являясь основным критерием правильности принятых технических решений, вместе с тем, дорожные испытания не позволяют добиться идеальной воспроизводимости условий проведения эксперимента, так как параметры дорожного полотна и окружающие условия в разные временные отрезки не совпадают. Вследствие этого довольно трудно, а порой и невозможно, например, отследить влияние какого-либо из параметров настройки блока управления системой. При проведении дорожных испытаний в условиях жесткой конкуренции появляется проблема – защита новых моделей и разработок от посторонних «глаз» конкурентов.

Виртуально-физическая технология моделирования (ВФТМ) позволяет решить указанные проблемы, возникающие перед конструкторами и испытателями новых систем. На

рис. 2 представлен V-цикл проектирования системы активной безопасности с учётом возможности использования современных методов проектирования и проведения испытаний.

На этапе проектирования и расчета системы, а в последствии и конкретного модуля максимально облегчить труд позволяют программные пакеты математического моделирования (ММ).

На этапе проверки, контроля и испытаний возможно широкое применение ВФТМ. Данная технология позволяет совмещать натурные агрегаты систем с математическим описанием динамики протекающих процессов и явлений. Управление физическим объектом, как и расчет модели, ведётся в реальном масштабе времени. При этом, если на этапе верификации системы была найдена ошибка, то возможно провести быстрое прототипирование и применить ВФТМ, скорректировав спецификацию системы, что не вызывает значительных задержек при проектировании, и проблема может быть решена локально.

В настоящее время одной из современных стала электрогидравлическая тормозная система (electro-hydraulics breaking (EHB) system).



Рис. 3. Внешний вид стенда для испытаний электрогидравлических тормозных систем (

Для проведения поэлементных и комплексных испытаний электрогидравлических тормозных систем в лаборатории и отработки принципов торможения по проводам (break by wire technology), а также поиска путей снижения стоимости системы был создан испытательный стенд (рис. 3), при построении которого были использованы принципы комплексной технологии моделирования. Стенд разработан в результате сотрудничества кафедры Технической эксплуатации и ремонта автомобилей Волгоградского государственного технического университета (Россия), и кафедры Механики Туринского политехнического института (Италия).

Для обеспечения моделирования рабочих процессов EHB на стенд были установлены: гидравлический блок Bosch ESP 5.7, блок электроклапанов от гидравлического блока Bosch ABS 5.3, передний тормозной механизм от автомобиля Alfa Romeo 166, гидроаккумулятор для поддержания высокого давления в системе, гидравлический цилиндр двустороннего действия, подключенный к насосной станции для имитации нажатия на тормозную педаль с разными скоростями.

Вычислительная часть стенда построена на базе двух персональных компьютеров, использующих MathLab/Simulink для построения модели на головном компьютере – сервере. Для обеспечения управления стендом и обработки сигналов в реальном масштабе времени использовалась операционная система реального времени MathWorks XPCtarget, загружаемая на второй «целевой» компьютер, оснащенный устройствами сопряжения объектов. Перед проведением испытаний модель компилируется и загружается на «целевой» компьютер, который после запуска процесса моделирования выполняет управление стендом и осуществляет сбор и обработку данных автономно.

Расчет модели и работа стенда проводились с временным интервалом 0,001 с в реальном масштабе времени за счет применения операционной системы реального времени.

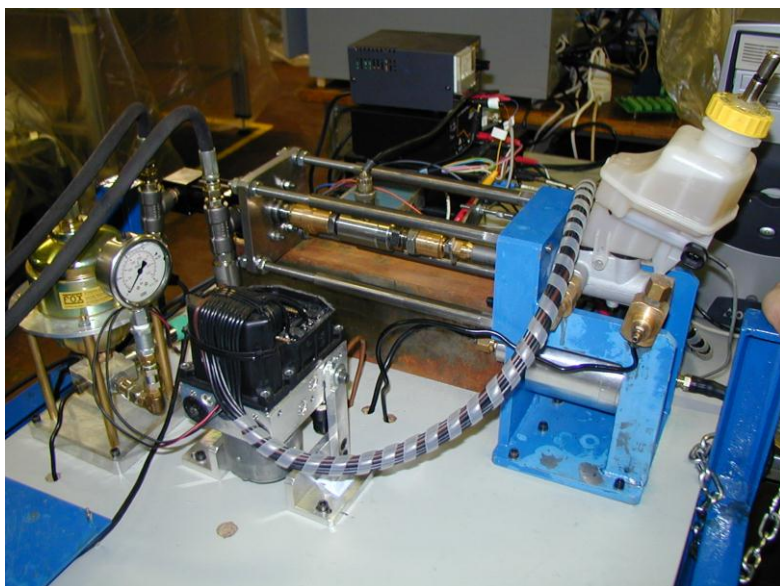


Рис. 4. Вид монтажа гидравлического блока Bosch ESP 5.7, гидроаккумулятора высокого давления, гидроцилиндра, главного тормозного цилиндра и эмулятора усиления педали

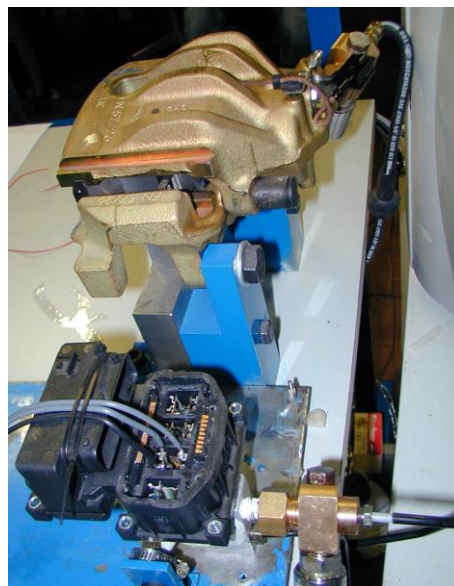


Рис. 5. Вид монтажа тормозного механизма и клапанов гидравлического блока Bosch ABS 5.3

Для коммутации, обеспечения работы клапанов гидравлического блока и возможности изменения алгоритма работы разработана и изготовлена оригинальная коммутационная аппаратура. В качестве электрических переключателей клапанов гидравлического блока применялись реле фирмы CRYDOM с временным интервалом работы 0,001 с.

Система датчиков подключена к двум платам производства National Instruments, для аналого-цифрового преобразования сигналов датчиков стенда и передачи управляющих сигналов на стенд. Необходимо отметить, что данные результаты были достигнуты с использованием элементов стандартных, серийно выпускаемых и широко используемых систем Bosch ESP 5.7 и Bosch ABS 5.3. Это позволяет предположить, что в недалеком будущем возможно широкое применение гидравлических тормозных систем на более доступных для потребителя автомобилях.

Таким образом, стенд дает возможность проводить полный цикл испытаний электрогидравлических тормозных систем и отработки логики работы блока управления в лабораторных условиях, позволяя находить пути снижения стоимости системы и сокращать затраты на проведение функциональных испытаний.

Проведение испытаний в лаборатории позволяет добиться прекрасной воспроизводимости испытаний и защитить новые разработки.

Выполнение данных исследований возможно на специальном стенде, позволяющем имитировать управляющие воздействия водителя и реакцию на них автомобиля, а также об-

ратное действие – исследование физиологической реакции на человека посредством механизмов управления, поскольку, согласно требованиям правил № 13 ЕЭК ООН, водитель может корректировать траекторию движения автомобиля в процессе торможения.

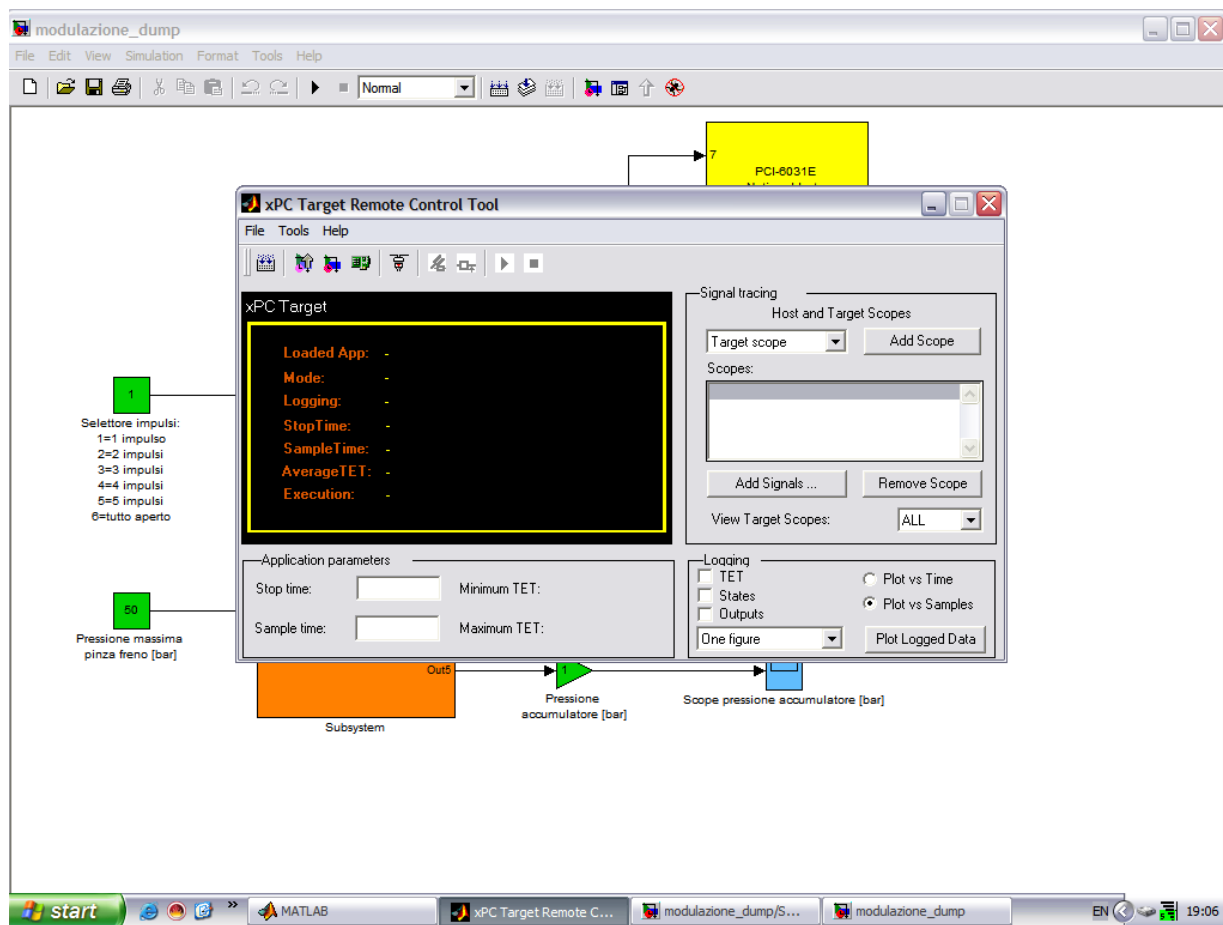


Рис. 6. Окно MathLab/Simulink с запущенной панелью удаленного контроля XPCtarget

Величина и динамика изменения момента на рулевом колесе являются важной для водителя информацией, используемой им для контролирования и прогнозирования поведения автомобиля. Практика показывает, что во время движения водитель управляет рулевым колесом непрерывно (левая рука находится 99 % времени на руле, а действия правой руки распределяются между рулевым колесом 81 % и рычагом переключения передач 13 % времени). Следует добавить также то обстоятельство, что управление траекторией автомобиля с АБС в режиме экстренного торможения имеет свою специфику. По мнению специалистов ряда ведущих фирм, водителя (в том числе и водителя-испытателя) необходимо приучить к новому режиму движения с коррекцией траектории. Это обуславливает необходимость совершенствования тренажерных систем, в частности, применительно к режиму экстренного торможения. Следовательно, при проведении испытаний в лабораторных условиях необходимо обеспечить внешнее возмущение и реактивный момент, осязаемый на руле.

Для реализации выдвигаемых выше положений в ВолгГТУ (в соответствии с Научно-технической программой – «Научные направления высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», подпрограмма 205 Транспорт, раздел научно-технической программы 205.03 Наземные транспортные средства, тема 205.03.01.14 «Разработка стенда-тренажера для испытания автомобилей с АБС в режиме торможения») разработан имитационный стенд-тренажер (рис. 7). Стенд включает следующие основные узлы и блоки: соединенные в сеть три персональных компьютера; стенд с физической моделью тормозной системы легкового автомобиля, выполненной на основе реальных агрегатов тормозного приво-

да и элементов АБС; устройство для моделирования тактильных воздействий на рулевое колесо; устройство сопряжения объектов; энергетическую и измерительную систему стенда.

Созданный образец стенда позволяет проводить виртуальные испытания автоматизированных тормозных систем любых типов. Необходимо отметить, что стенды подобного типа позволяют имитировать любую скорость начала торможения, а затраты на создание подобных имитационных стендов-тренажеров не превышают 50–100 тыс. \$, в зависимости от категории автомобиля (легковой автомобиль – грузовой автопоезд, автобус), что сравнимо по стоимости с крупными аналитическими пакетами, включающими дополнительные модули анализа.

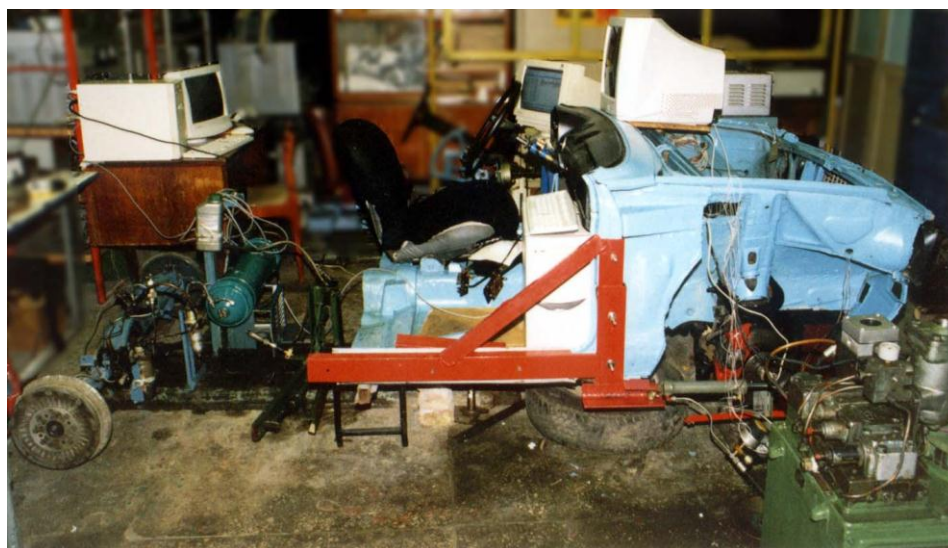


Рис. 7. Имитационный стенд-тренажер для испытания автоматизированных тормозных систем автомобилей



Рис. 8. Имитационный стенд-тренажер в ходе испытания автоматизированных тормозных систем

Созданный имитационный стенд-тренажер позволяет проводить испытания всех схем гидравлических антиблокировочных систем, существующих на данный момент.

После проведения эксперимента на имитационном стенде-тренажере возможно мгновенное получение итоговых результатов – 43 параметров, характеризующих процесс торможения. Все параметры можно отобразить и сохранить в виде графических зависимостей, или таблицы для дальнейшего анализа проведенного эксперимента.

Для рассмотрения управляемого движения в режиме торможения на имитационном стенде-тренажере перед водителем-оператором установлен монитор ПК (возможно применение и LCD проекторов и виртуальных 3D шлемов).

На персональном компьютере было реализовано построение и отображение дорожной обстановки перед колёсной машиной и динамика изменения дорожной ситуации (рис. 8).

Применение современных графических средств позволило выполнять визуализацию движения в трехмерном пространстве с качеством воспроизводимой информации, не уступающим зарубежным имитаторам езды. На экране отображается прямолинейный участок дорожного полотна с осевой линией, информирующей о границе раздела сред с различным коэффициентом сцепления. Показана часть капота колесной машины для оценки водителем габаритов автомобиля. На капоте имитируется точка цели для возможности оценки водителем величины отклонения колесной машины в процессе торможения.

Кроме имитационного стенда-тренажера, разработан программный комплекс (рис. 9), позволяющий предварительно оценить работу антиблокировочной тормозной системы, установленной на колёсную машину.

Все параметры можно отобразить и сохранить в виде графических зависимостей, или таблицы, для дальнейшего анализа поведенного эксперимента. Для удобства анализа полученных данных возможен вывод окна, отображающий значения точки кривой, на которую в данный момент наведен указатель мыши. Кроме того, предусмотрены возможности масштабирования графиков для более детального анализа отдельных участков кривой экспериментальных данных.

Применяя современные методики проведения испытаний, основанных на комплексной технологии моделирования и применении имитационных стендов-тренажеров, возможно значительное снижение затрат на проведение испытаний, сокращение сроков проектирования и объемов дорожных испытаний при внедрении автоматизированных тормозных систем.

Данные работы выполнялись в соответствии:

- с научно-технической программой «Научные направления высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» подпрограмма 205 Транспорт, раздел научно-технической программы 205.03 Наземные транспортные средства, тема 205.03.01.14 «Разработка стенда-тренажера для испытания автомобилей с АБС в режиме торможения»;
- научно-технической программой «Научные направления высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» подпрограмма 205 Новые авиационные, космические и транспортные технологии, раздел научно-технической программы 205.03 «Экологически чистый и высокоскоростной наземный транспорт», тема 205.03.01.001 «Разработка методики проведения комплекса доводочных испытаний автоматизированных тормозных систем автомобилей с использованием имитационных стендов-тренажеров»;
- межотраслевой программой сотрудничества Минобразования России и ОАО «АВТО-ВАЗ» проект 03.02.004. «Разработка методики построения имитационных стендов-тренажеров для проведения виртуальных лабораторных испытаний автоматизированных тормозных систем автомобилей семейства «АвтоВАЗ»» 2004 г.
- грантом президента РФ по государственной поддержке молодых российских ученых-кандидатов наук 2006–2008 гг. МК-9265.2006.8 «Разработка технологии и методики проведения комплексных испытаний автоматизированных тормозных систем колёсных транспортных средств».

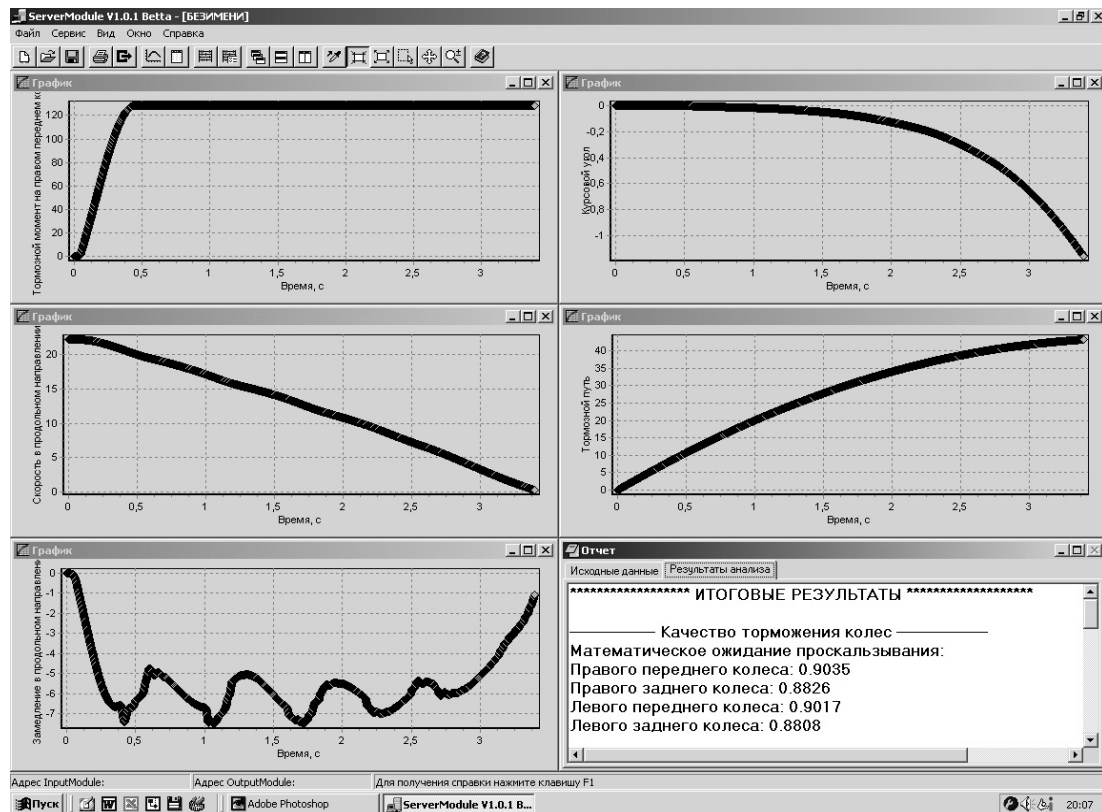


Рис. 9. Главное окно программы (просмотр результатов анализа)

Библиографический список

1. **Emig, R.** Robert Bosch GmbH, Antilock Braking Systems (ABS) for Commercial Vehicles – Status 1990 and Future Prospects / R. Emig, H. Goebels, H. J. Schramm // SAE Technical Paper Series 901177, 1990.
2. Bosch, Automotive Braking Systems, Robert Bosch GmbH, 1995.
3. Electrohydraulic Brake System – The First Approach to Brake-By-Wire Technology / Wolf D. Jonner [at al.] // SAE Technical Paper Series 960991, 1996.
4. **Ревин, А.А.** Комплексное моделирование в цикле проектирования автомобилей и их систем / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Автомобильная промышленность, 2002. №11. С. 29–30.
5. **Дыгало, В.Г.** Средства виртуальных испытаний автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. // ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. С. 67–73.
6. **Ревин, А.А.** Виртуальные испытания в цикле проектирования автоматизированных тормозных систем / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Наука – производству. 2005. №1. С. 43–47
7. **Дыгало, В.Г.** Стенд для комплексных лабораторных испытаний ЭГТС // В.Г. Дыгало [и др.] // Автомобильная промышленность, 2006. № 3. С. 34–35.
8. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология лабораторных испытаний систем активной безопасности автотранспортных средств: монография / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин. – Волгоград: ВолгГТУ, 2006. – 316 с.
9. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология моделирования в цикле проектирования автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. научн. тр // ВолгГТУ. 2007. Т. 8. № 2. С. 13-15.
10. **Ревин, А.А.** Комплексная технология моделирования тормозной динамики автомобиля: монография / А.А. Ревин. – Волгоград: ВолгГТУ, 2000. – 92 с.
11. **Ревин, А.А.** Исследование тормозной динамики автомобиля методами комплексной технологии моделирования: учеб. пособие/ А.А. Ревин, В.Г. Дыгало.– Волгоград: ВолгГТУ, 2001. – 122 с.

12. **Maier, M.** Robert Bosch GmbH, ABS 5.3: The New and Compact ABS5 Unit for Passenger Cars / M.Maier, K. Müller // SAE Technical Paper Series 950757, 1995.
13. **Petruccelli, L.** Electro-Hydraulic Braking System Modelling and Simulation, 21st Annual Brake Colloquium & Exhibition, October 2003 / L. Petruccelli, M. Velardocchia, A. Sorniotti. – Hollywood, FL, USA, Session: Models & Simulations, SAE 2003-01-3336.

*Дата поступления
в редакцию 12.07.2011*

V.G. Dygalo, A.A. Revin

VIRTUALLY-PHYSICAL TECHNOLOGY MODELING ACTIVE SAFETY SYSTEM

In the papers described virtually-physical technology method modeling in the process develop active safety system vehicles.

Key words: virtually-physical technology modeling, vehicles, active safety system, efficiency breaking, driving simulator.

УДК 629.3.076, 34.06

А.С. Лакеев, Ю.И. Молев, Д.Н. Прошин

МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТОРМОЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Требования к эффективности тормозных механизмов менялись дважды, но данный процесс не нашёл своего отражения в методике расчёта остановочного пути автомобиля. Приведены формулы и результаты расчётов параметров замедления для ТС с системами активной безопасности.

Ключевые слова: торможение, технических регламентов, коэффициент сцепления, ABS.

В настоящее время парк легковых автомобилей продолжает расти в темпе 2–3% в год. Увеличивается интенсивность движения на дорогах, повышается вероятность столкновений. Решение о виновности или невиновности водителей, участвующих в аварии, выносится по результатам технической экспертизы. Вместе с тем, зависимости, по которым производят расчёт эксперты, утверждены в 80-х годах прошлого века и с тех пор никаких существенных изменений не претерпели. Так, величину остановочного пути в настоящий момент принято определять из уравнения:

$$S = (t_1 + t_2 + 0,5t_3)v_2 + \frac{v_2^2}{2\phi g}, \quad (1)$$

где t_1 – время реакции водителя; t_2 – время срабатывания тормозной системы; t_3 – время нарастания замедления, v – начальная скорость движения транспортного средства; ϕ – коэффициент сцепления колеса с дорогой.

Расчёт по данной зависимости позволяет определить, что ускорение замедления транспортных средств на ровном сухом асфальте должно находиться в пределах от 6,86 до 7,84 м/с², тогда как вступивший в действие в 2001 году ГОСТ Р 51709 [1] исправными легковыми автомобилями считал те, у которых ускорение замедления превышает величину равную 5,3 м/с², а для грузовых автомобилей – 4,6 м/с². В 2010 году в действие вступил Технический регламент о безопасности колёсных транспортных средств, утверждённый Постановлением Правительства Российской Федерации от 10 сентября 2009 года № 720, который установил новые, более мягкие требования к эффективности тормозных механизмов транспортных средств. Так, рабочая тормозная система должна обеспечивать эффективность торможения транспортных средств категории М1 не менее 5,2 м/с², а остальных – не менее 4,5 м/с². То есть за последние годы требования к эффективности тормозных механизмов менялись как минимум дважды, однако данный процесс не нашёл своего отражения в методике расчёта остановочного пути автомобиля. Результаты исследований, проведённых на станциях технического осмотра (рис. 1 и 2), показывают, что применяемая в настоящее время математическая модель расчёта параметров торможения автомобилей имеет погрешность расчёта, превышающую величину 25% для легковых автомобилей и 40% для грузовых. То есть у 25% легковых и 40% грузовых автомобилей водители не имели техническую возможность избежать столкновения за счёт недостаточной величины развития тормозного усилия, развиваемого в тормозном механизме, а не на поверхности контакта колеса с дорогой, как это имеет место в существующей методике расчёта.

Повышение точности расчётов параметров торможения может обеспечить применение для сухого и мокрого асфальтобетонного покрытия не коэффициента сцепления колеса с дорогой, а минимально допустимой величины ускорения, развиваемого тормозными механизмами:

$$\begin{cases} \text{для } \varphi g > a \quad S = (t_1 + t_2 + 0,5t_3)v_2 + \frac{v_2^2}{2a}, \\ \text{для } \varphi g \leq a \quad S = (t_1 + t_2 + 0,5t_3)v_2 + \frac{v_2^2}{2\varphi g} \end{cases}, \quad (2)$$

где a – предельно допустимая величина тормозного ускорения, установленная техническим регламентом о безопасности колёсных транспортных средств.

Кроме того, в данной формуле используется замедление снаряжённого транспортного средства. В реальных условиях эксплуатации, прежде всего у грузовых автомобилей, величина действующей загрузки может значительно превышать величину снаряжённой массы. Для учёта данного параметра расчёт величины остановочного пути предлагается осуществлять по выражению:

$$S_{ост} = \begin{cases} \text{для } \varphi g > a \quad S = (t_1 + t_2 + 0,5t_3)v_2 + \frac{v_2^2}{2a} \frac{M_H}{M_C}; \\ \text{для } \varphi g \leq a \quad S = (t_1 + t_2 + 0,5t_3)v_2 + \frac{v_2^2}{2\varphi g}, \end{cases} \quad (3)$$

где M_C – масса снаряжённого транспортного средства; M_H – действительная масса транспортного средства в момент ДТП

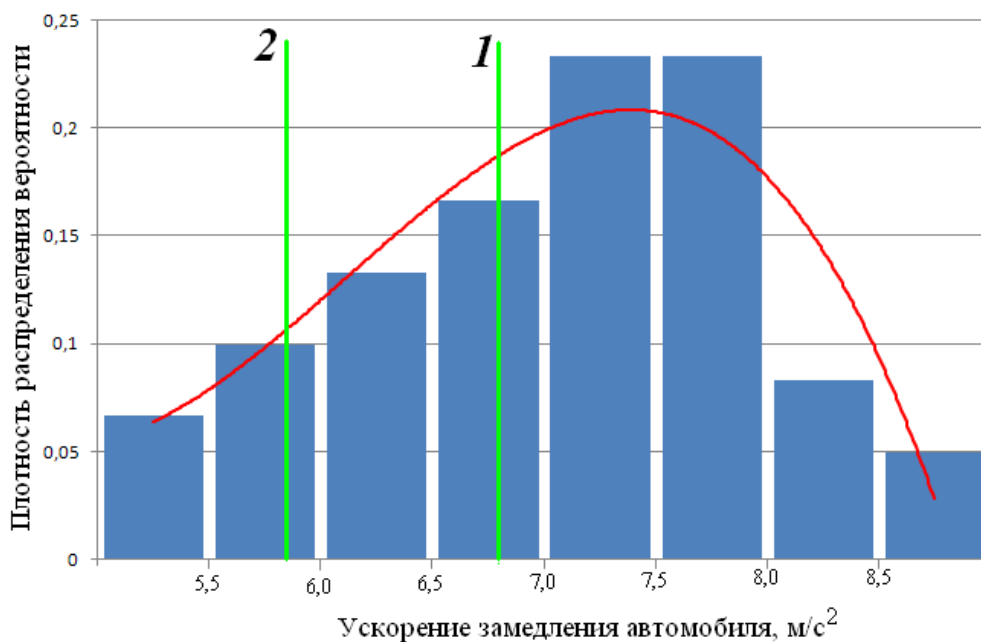


Рис. 1. Существующая плотность распределения вероятности достижения реализуемого тормозным механизмом коэффициента сцепления колеса с дорогой в продольном направлении для легковых автомобилей:

- 1 – расчётное значение минимального ускорения замедления по существующей методике;
2 – параметр, определяющий исправность легковых автомобилей по техническому регламенту о безопасности колёсных транспортных средств

Следует отметить, что эффективность торможения автомобилей, оснащённых антиблокировочной системой тормозов, оценивается по-иному. Так, согласно п. 5.2.1, прил. 13 ГОСТ Р 41.13-99 [2], антиблокировочная система считается исправной, если реализуется условие $\varepsilon \geq 0,75$ как в грузённом, так и в снаряжённом состоянии, где ε – реализуемое сцепление, которое, доп. 1 прил. 13 ГОСТ Р 41.13-99 [2], определяется как соотношение между максимальным коэффициентом торможения при включённой антиблокировочной системе и коэффициентом сцепления, то есть $a \geq 0,75\varphi$. Тогда уравнение для определения величины

остановочного пути на технически исправном автомобиле, оснащённом антиблокировочной системой тормозов, будет иметь вид:

$$S_{ост} = (t_1 + t_2 + 0,5t_3)v_2 + \frac{v_2^2}{1,5\phi g}, \quad (4)$$

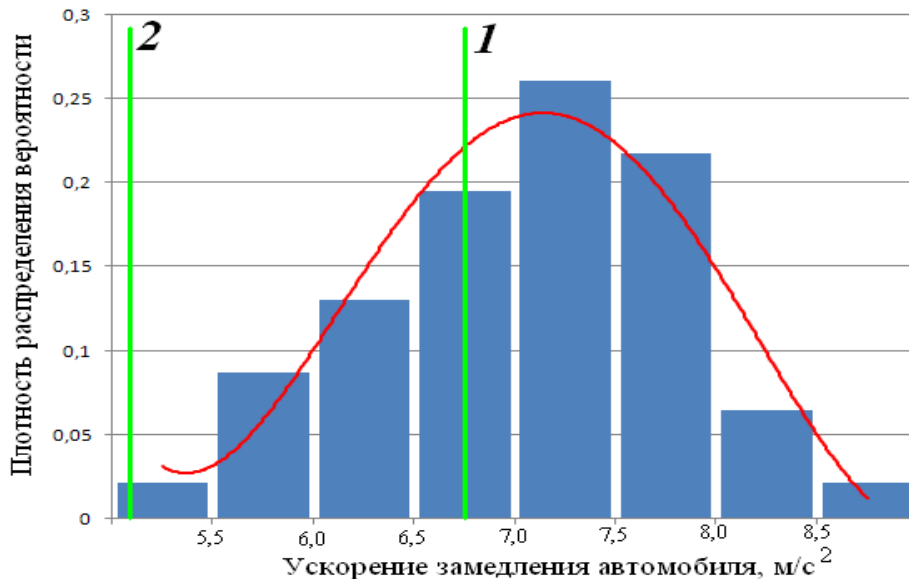


Рис. 2. Существующая плотность распределения вероятности достижения реализуемого тормозным механизмом коэффициента сцепления колеса с дорогой в продольном направлении для грузовых автомобилей:

1 – расчётное значение минимального ускорения замедления по существующей методике;
2 – параметр определяющий исправность грузовых автомобилей по техническому регламенту о безопасности колёсных транспортных средств

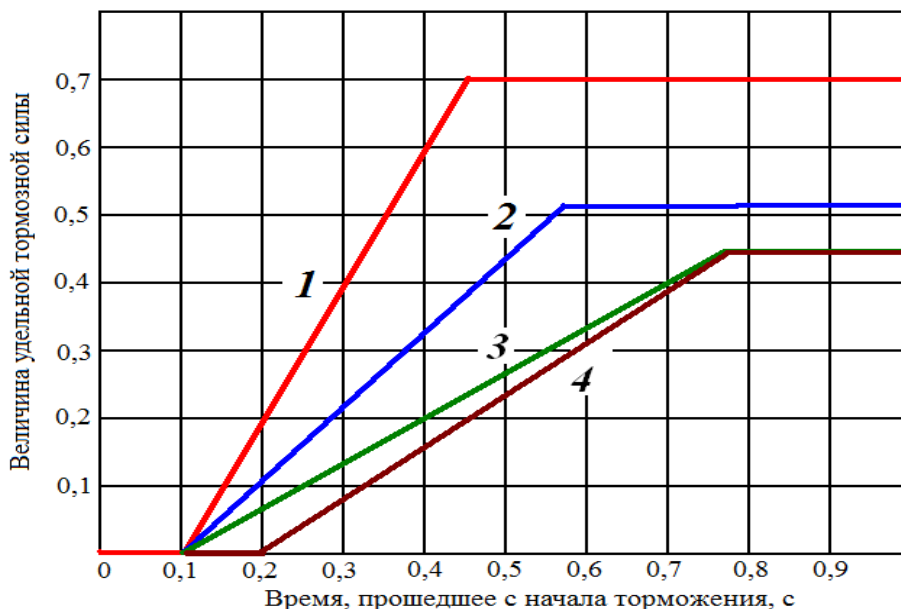


Рис. 3. Изменение развития тормозной силы тормозной системой в начальный период замедления:

1 – по существующей методике определения остановочного пути; 2 – по требования технического регламента для автомобилей категории М₁; 3 – по требованиям технического регламента для транспортных средств других категорий (для времени запаздывания срабатывания тормозной системы, равной 0,1 с); 4 – по требованиям технического регламента для транспортных средств других категорий (для времени запаздывания срабатывания тормозной системы, равной 0,2 с)

Следует отметить, что наряду с регламентацией в действующих нормативных документах величины эффективности торможения на процесс остановки транспортного средства оказывает такой параметр, как время нарастания замедления. Ранее данный параметр регламентировался величиной 0,5 с, во вступившем в действие техническом регламенте (требования табл. 2.6 прил. 5) данная величина увеличена до значения 0,6 с для транспортных средств категории M_1 и до 0,8 с для транспортных средств категории M_2, M_3, N_1, N_2 и N_3 . Разница в параметрах расчёта времени нарастания замедления представлена на рис. 3.

Таким образом, величина параметра «время нарастания замедления» по существующей методике аппроксимируется по зависимости:

$$t_3(\varphi) = \begin{cases} \text{для } \varphi g > a & t_3 = t_{НОМ} - t_2 - 0,5, \\ \text{для } \varphi g \leq a & t_3 = (t_{НОМ} - t_2 - 0,5) \frac{\varphi}{a}, \end{cases} \quad (5)$$

где $t_{НОМ}$ – установленное техническим регламентом максимально допустимое время срабатывания тормозного механизма, для транспортных средств рассматриваемой категории.

Таблица 1

Сравнительный анализ определения времени нарастания замедления по существующим методам судебной экспертизы и по нормам «Технического регламента о безопасности колёсных транспортных средств»

Категория транспортного средства		Коэффициент сцепления шин с опорной поверхностью						
		0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
M_1 ($t_2=0,1с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,45	0,45	0,45	0,35	0,25	0,20	0,10
M_2 ($t_2=0,1с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,60	0,50	0,45	0,35	0,25	0,20	0,10
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,65	0,65	0,65	0,60	0,45	0,30	0,15
M_3 ($t_2=0,2с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,60	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,60	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,15
N_1 ($t_2=0,1с$)	Значения, применяемые в настоящее время	Данные отсутствуют						
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,70	0,70	0,70	0,65	0,50	0,35	0,20
N_1 ($t_2=0,2с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,35	0,35	0,30	0,25	0,20	0,10	0,05
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,60	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,15
N_2 ($t_2=0,2с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,60	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,60	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,15
N_3 ($t_2=0,2с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,60	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,60	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,15

Результаты величины времени нарастания замедления [3], полученные по приведённой формуле, и их сравнения с действующими нормативными данными для определения величины остановочного пути представлены в табл. 1.

Как видно из приведённых данных, при применении требований к транспортным средствам, регламентированных «Техническим регламентом о безопасности колёсных транспортных средств» [4], время нарастания замедления для некоторых случаев расчёта будет отличаться на 70–100 % от результатов расчётов, используемых в методиках судебной дорожно-транспортной экспертизы [5, 6 и 7]. Особенно заметное отличие имеет место для транспортных средств категории M_1 при движении по заснеженной дороге, когда указанный параметр будет отличаться в 2,5 раза. Согласно требованиям технического регламента, рассматриваемый параметр оценивает быстродействие тормозной системы и никак не связан с массой транспортного средства. Вместе с тем в таблицах, приведённых в [5, 6 и 7], подготовленных В.Г. Григорьяном имеются незначительные отличия (на величину не более 0,05 с) во времени нарастания замедления транспортных средств категорий M_2 , M_3 , N_1 , N_2 и N_3 при изменении их полной массы. Изменение параметров торможения транспортных средств категории M_1 в данных таблицах отсутствует. Сравнение нормативных параметров времени нарастания замедления у транспортных средств, движущихся в условиях полной загрузки, и данных, установленных техническим регламентом в качестве предельно допустимых представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ определения времени нарастания замедления по существующим методикам судебной экспертизы и по нормам технического регламента о безопасности колёсных транспортных средств, для транспортных средств, движущихся в условиях полной загрузки

Категория транспортного средства		Коэффициент сцепления шин с опорной поверхностью						
		0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
M_2 ($t_2=0,1с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,20	0,10
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,65	0,65	0,65	0,60	0,45	0,30	0,15
M_3 ($t_2=0,2с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,20	0,10
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,60	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,15
N_1 ($t_2=0,1с$)	Значения, применяемые в настоящее время	Данные отсутствуют						
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,70	0,70	0,70	0,65	0,50	0,35	0,20
N_1 ($t_2=0,2с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,35	0,35	0,35	0,30	0,25	0,15	0,10
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,60	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,15
N_2 ($t_2=0,2с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,60	0,60	0,60	0,50	0,40	0,25	0,15
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,60	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,15
N_3 ($t_2=0,2с$)	Значения, применяемые в настоящее время	0,60	0,60	0,60	0,50	0,40	0,25	0,15
	Значения, полученные по требованиям технического регламента	0,60	0,60	0,60	0,55	0,45	0,30	0,15

Приведённые данные свидетельствуют о том, что гружёные транспортные средства категорий M_2 , M_3 , N_2 и N_3 в настоящее время рассчитываются по параметрам, которые, практически полностью совпадают с требованиями действующего технического регламента.

Таким образом, исходя из п. 4 ст. 14, Уголовно-процессуальный кодекс Российской Федерации [8] гласит о том, что обвинительное заключение не может быть основано на предположениях, в том числе и на тех, что исправное транспортное средство обладало более высокими параметрами активной безопасности, чем этого требуется по техническому регламенту [4], то для расчёта остановочного пути необходимо использовать следующие зависимости.

Для транспортных средств, оснащённых антиблокировочной тормозной системой:

$$S_{OCT} = (t_1 + t_2 + 0,375 \{ t_{НОМ} - t_2 - 0,5 \} \frac{\varphi}{a}) v_2 + \frac{v_2^2}{1,5\varphi g}. \quad (6)$$

Для транспортных средств, не оснащённых антиблокировочной тормозной системой

$$S_{OCT} = \begin{cases} \text{для } \varphi g > a \quad S = (t_1 + t_2 + 0,5 \{ t_{НОМ} - t_2 - 0,5 \}) v_2 + \frac{v_2^2}{2a} \frac{M_H}{M_C}; \\ \text{для } \varphi g \leq a \quad S = (t_1 + t_2 + 0,5 \{ t_{НОМ} - t_2 - 0,5 \} \frac{\varphi}{a}) v_2 + \frac{v_2^2}{2\varphi g} \end{cases} \quad (7)$$

или

$$S_{OCT} = \begin{cases} \text{для } \varphi g > a \quad S = (t_1 + 0,5 t_{НОМ} - 0,5 t_2 - 0,25) v_2 + \frac{v_2^2}{2a} \frac{M_H}{M_C}; \\ \text{для } \varphi g \leq a \quad S = (t_1 + t_2 + 0,5 \{ t_{НОМ} - t_2 - 0,5 \} \frac{\varphi}{a}) v_2 + \frac{v_2^2}{2\varphi g}. \end{cases} \quad (8)$$

Величина 0,375 в зависимости по определению остановочного пути для транспортных средств, оснащённых антиблокировочной тормозной системой, появляется благодаря произведению величины 0,5, присутствующей во всех зависимостях, на параметр 0,75 – минимально допустимого реализуемого сцепления.

Библиографический список

1. **ГОСТ 51709-2001.** Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
2. **ГОСТ Р 41.13-99.** (Правила ЕЭК ООН № 13) Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и О в отношении торможения. – М.: Изд-во стандартов, 1999.
3. **Коллинз, Д.** Анализ дорожно-транспортных происшествий / Д. Коллинз, Д. Моррис. – М.: Транспорт, 1971. – 128 с.
4. Технический регламент о безопасности колёсных транспортных средств, утверждённый Постановлением Правительства Российской Федерации от 10 сентября 2009 года № 720.
5. **Суворов, Ю.Б.** Судебная дорожно-транспортная экспертиза. Судебно-экспертная оценка действия водителей и других лиц, ответственных за обеспечение безопасности дорожного движения, на участках ДТП: учеб. пособие/ Ю.Б. Суворов. – М.: Экзамен, 2003.
6. **Илларионов, В.А.** Экспертиза дорожно-транспортных происшествий / В.А. Илларионов. – М.: Транспорт, 1989.

7. **Евтюков, С.А.** Экспертиза ДТП: справочник / С.А. Евтюков, Я.В. Васильев. – СПб.: ООО «Издательство ДНК», 2006.
8. Уголовно-процессуальный кодекс Российской Федерации (УПК РФ) от 18.12.2001 N 174-ФЗ (принят ГД ФС РФ 22.11.2001) (ред. от 03.06.2011). – М., 2001.

*Дата поступления
в редакцию 05.07.2011*

A.S. Lakeev, Y.I. Molev, D.N. Proshin

**THE METHOD OF BRAKING VEHICLES PARAMETERS ESTIMATION
IN ACCORDANCE WITH THE TECHNICAL REGULATION REQUIREMENTS**

It is well known that regulation requirements for braking system mechanisms efficiency were changed twice, but at the same time this fact wasn't reflected in calculation methods of vehicle stopping distance estimation. This paper presents formulas and calculations results of vehicle deceleration parameters with a glance of active safety systems.

Key words: braking, technical Regulations, adhesion coefficient, ABS.

УДК 629.113

Т. Фулеп, Л. Палкович, Л. Надай

**КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ
ЭЛЕКТРОННЫХ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ***

Будапештский университет технологий и экономики

Развитие систем безопасности для коммерческого транспорта обусловлено в первую очередь потребностью общества, которое желает видеть на дорогах более безопасные и надежные транспортные средства с интеллектуальными системами, обеспечивающими движение в сложных дорожных условиях, с которыми обыкновенный водитель может не справиться. В этой связи актуальным является вопрос применимости классической теории надежности к оценке надежности современных систем безопасности, таких как электронные тормозные системы, используемые более 10 лет используются на коммерческом транспорте в Европе.

Ключевые слова: электронная тормозная система, степень дублирования, анализ надежности.

Введение

Теория надежности является одной из наиболее важных направлений в системотехнике. Любой детальный системный анализ обязательно предполагает оценку надежности системы и ее работоспособности. Как правило, разработчик системы непременно сталкивается с проблемой оценки и повышения надежности, а также проблемой определения оптимального графика технического обслуживания системы. Для решения этих проблем приходится, как правило, анализировать различные математические модели [1, 2].

Надежность в основном определяется способностью какой-либо детали, сборки или системы выдерживать возможные при эксплуатации перегрузки без разрушения и выхода из строя. Надежность элементов автомобиля (системы, подсистемы, сборок, узлов, деталей) все чаще становится предметом внимания проектировщиков автомобилей и автомобильной отрасли в целом [3].

Автономные системы безопасности (АБС – антиблокировочная система, подушки безопасности, системы электронного контроля устойчивости (ЭКУ)) распределяют функции по элементам конструкции транспортного средства, которые связаны между собой, но, как правило, не являются интегрированными в один узел. В качестве примера можно привести современные электронные технологии, используемые для контроля управлением процессов шасси автомобилей [4, 5], объединенные в единую интеллектуальную систему, управляющую элементами трансмиссии и способствующую улучшению безопасности дорожного движения и повышению эффективности эксплуатации большегрузных автомобилей [6]. Таким образом, технологии управления агрегатами автомобиля «по проводам» являются весьма перспективными и имеют целый ряд преимуществ, однако их применение в системах безопасности, например, в тормозных системах и системах рулевого управления, предполагает реализацию особых подходов на стадиях проектирования и эксплуатации.

1. Структура тормозных систем современных большегрузных автомобилей

В отношении степени дублирования данные системы имеют единый электронный контур, который контролирует работу всех модуляторов, и – в соответствии с потребностями заказчика – двойной пневматический контур, используемый в качестве резервного. В случае отказа в электронном контуре, в зависимости от степени значимости отказа, система переключается частично или полностью на работу резервных контуров, способных обеспечить выполнение основных функций тормозной системы. Данная структура полностью отвечает

требованиям нормативных документов, о которых будет сказано ниже, однако резервный режим работы не позволяет реализовывать некоторые дополнительные функции (только основные). Такая система имеет обозначение 1E+2P (один электронный контур и два пневматических контура).

Ввиду высокой стоимости указанной системы и определенных конструктивных ограничений нередко возникает вопрос об исключении одного из пневматических контуров при условии, что система 1E+1P будет отвечать требованиям безопасности, регламентированным нормативными документами. Это означает, что запасной пневматический контур, соединенный с клапаном управления тормозами прицепа (составная часть ТСМ – модуля управления тормозами прицепа) и/или с задней осью транспортного средства, может быть удален из системы. На рис. 1 показаны возможные схемы систем типа 1E+2P (с дублированием и без дублирования на заднюю ось либо на клапан управления тормозами прицепа) с двухсекционным главным тормозным краном (является частью FBM – модуля главного тормозного крана), а также схемы типа 1E+1P, в которых используется односекционный главный тормозной кран.

Представленные схемы 1E+1P обеспечивают выполнение требований нормативных документов, сохраняя при этом возможность дублирования рабочей тормозной системы контурами запасной системы (при этом, однако, будет наблюдаться снижение эффективности торможения в случае возникновения отказа в рабочем контуре). Тем не менее, в случае повреждения электронного контура, функции системы АБС, а также функции распределения тормозных усилий по колесам осей не будут выполняться.

Структура системы 1E+1P не позволяет реализовывать концепцию автоматизированного управления транспортным средством (без участия водителя), поскольку срабатывание резервного пневматического контура не возможно в автоматизированном режиме. С этой точки зрения такая система не обладает высокой степенью надежности и безаварийности. Для решения проблемы отсутствия автоматизированного привода (так называемого «патрулирования»), в рамках европейской программы Водитель-2 была разработана надежная и полностью дублируемая тормозная система. Несмотря на достоинства такой системы, ее практическая реализация весьма затруднительна ввиду высокой стоимости системы. Тем не менее, разработка такой системы позволила накопить немалый опыт в определении основных требований, которые должны предъявляться к подобным системам, а также выявить целый ряд менее значимых требований безопасности.

Альтернативная система 2E со структурой PEIT (разработанная в рамках 5-й рамочной программы Европейского Союза) не является в полной мере безотказной, хотя данная система обеспечивает выполнение всех функций без снижения эффективности работы в случае возникновения какого-либо отказа. В то же время она имеет несколько особенностей, позволяющих ей сохранять высокую эффективность при выходе одно из контуров, обеспечивая при этом более высокий уровень безопасности по сравнению с системами типа 2P, 1E+2P и 1E+1P [6].

В системах типа 1E+2P и 1E+1P выход рабочего (электронного) контура означает одновременную потерю всех дополнительных функций, реализуемых только электронными системами (таких как: контроль тормозных усилий, АБС, ЭКУ и др.), при условии сохранения основных функций тормозной системы. Архитектура системы типа 2E, в которой все функции обеспечиваются двумя электронными блоками управления (ЭБУ), позволяет сохранить полный функционал тормозной системы даже при вышедших из строя модулях электронных систем.

Если контур передней оси выходит из строя, контур задней оси способен реализовывать функции АБС, ПБС (противобуксовочной системы), системы контроля тягового усилия и др. При этом некоторые функции системы ЭКУ также остаются доступными (компенсация недостаточной поворачиваемости). Аналогично, при выходе из строя заднего контура, кон-

тур передней оси способен обеспечивать выполнение всех функций, которые, к примеру, не могут быть реализованы запасным пневматическим контуром (например, контроль крена кузова, ABS на передней оси, некоторые функции ЭКУ, в частности компенсация избыточной поворачиваемости), а также функции системы экстренного торможения.

В обоих случаях функции системы контроля движения прицепа (CFC – функция контроля силы в сцепном устройстве, функция предотвращения опрокидывания), а также функции системы управления двигателем и тормозом замедлителем (с бесконтактным принципом действия) остаются доступными, что позволяет снизить нагрузку на фрикционных парах тормозных механизмов прицепа и обеспечить устойчивое его движение.

2. Структурный анализ надежности тормозных систем

Практика показывает, что вероятность совершения дорожно-транспортного происшествия (ДТП) с участием одиночного или сочлененного транспортного средства уменьшилась с момента внедрения систем активной безопасности, таких как ABS, систем контроля тягового усилия, а также ЭКУ. Подобные положительные результаты явились причиной предположения, что дальнейшее развитие систем активной безопасности приведет к более существенному сокращению аварийных ситуаций с участием автомобилей. В то же время следует осознавать, что появление новых технологий связано с появлением новых рисков, которые должны быть тщательно изучены, проанализированы и эффективно предотвращены.

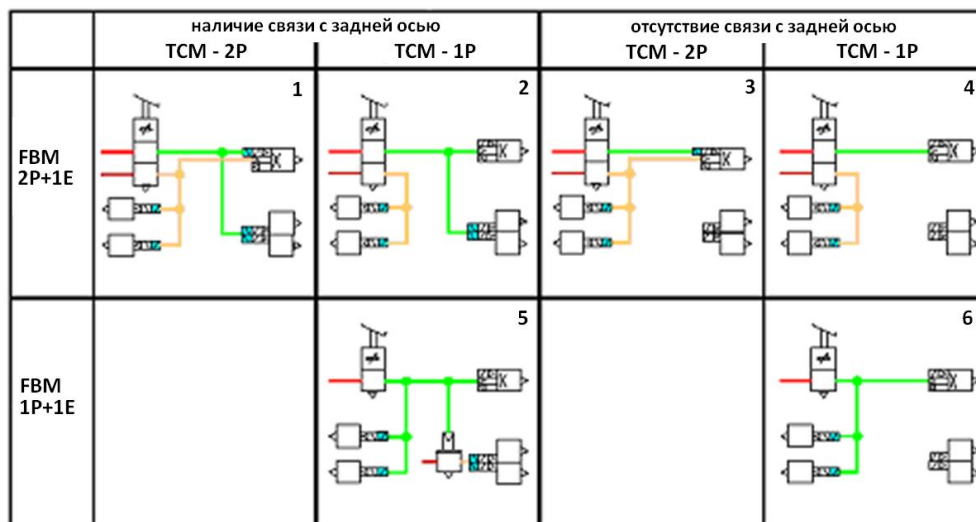


Рис. 1. Возможные варианты исполнения тормозной системы с различными видами связей

Системы активной безопасности имеют практически те же причины выхода из строя, что и любые другие системы, которые достаточно хорошо изучены, однако в рассматриваемых системах можно выделить новые классы потенциально опасных отказов. Так, в традиционной конструкции тормозной системы не наблюдается вид отказа, при котором происходит случайное торможение одного из колес автомобиля. В случае применения электронных систем такая ситуация возможна если речь идет о независимом приводе тормозных усилий к колесам транспортного средства. Безусловно, системы самодиагностики позволяют выявить данный вид отказа и предотвратить связанные с этим аварийные ситуации. Тем не менее, вероятность возникновения такого отказа все же остается, даже с учетом того, что в настоящее время разработаны эффективные методы проектирования электронных систем безопасности. Это говорит о том, что проблема возникновения подобного вида отказов является достаточно актуальной, когда речь идет о разработках и внедрениях новых технологий на транспортных

средствах, поэтому подобные ситуации должны быть тщательным образом исследованы и продуманы меры по их предотвращению.

Абсолютно очевидно, что радикальные изменения в конструкции транспортных средств вызывают обычно серьезные опасения в отношении безопасности и требуют тщательного анализа с точки зрения выбора наиболее рациональной концепции того или иного модуля или системы. Должны быть определены потенциальные виды отказов, а также последствия их возникновения с точки зрения реализации функций активной безопасности [7].

2.1. Проектирование с учетом требований надежности

Для повышения надежности системы ее разработчик может рассматривать способы дублирования функций каждого отдельного компонента, поскольку при определенных условиях это может быть наиболее быстрым и простым решением с наименьшими затратами. В некоторых случаях это единственное решение. С другой стороны, такой подход имеет определенные недостатки: он может оказаться слишком дорогим либо выйти за рамки ограничения по габаритам системы, ее веса или потребляемой мощности. Возможна и такая ситуация, когда описанный подход приведет к необходимости использования большого количества датчиков и коммутационных устройств, наличие которых настолько усложнит систему, что ее недостатки будут превалировать над ее преимуществами [1].

Исследования надежности конструкции на стадии ее концептуальной разработки в первую очередь ориентированы на определение надежности компонентов системы и выбора наиболее приемлемого решения с точки зрения предъявляемых требований по надежности, т.е. анализируется надежность системы в целом и ее отдельных элементов. Процесс проектирования начинается с перевода требований и потребностей потенциального потребителя в спецификацию для проектирования, то есть в техническое задание на проектирование. Фазе разработки концепции также предполагает определение цели проекта с точки зрения соблюдения существующих стандартов и правил.

Проведение анализа отказов и их последствий (FMEA) позволяет определить все возможные и известные случаи отказов системы и ее отдельных компонентов, а также определить их причины и выполнить оценку их последствий. Отдельные элементы системы (подсистемы, сборки, узла) могут иметь несколько видов отказов, поскольку каждая из предусмотренных функций элемента может иметь несколько вариантов выхода из строя. Реализация метода FMEA предполагает выделение возможных ситуаций возникновения отказов, с точки зрения выполнения той или иной функции системы, которые в общем случае разделяются на три группы: полная потеря функционала, частичная потеря функционала и некорректное выполнение функции. Для каждого режима неисправности проводится детальный анализ возможных последствий и прогнозируется поведение всей системы при возникновении того или иного отказа [1].

2.2. Методология качественного структурированного анализа надежности - (MX) FMEA

Перед началом работы по методу FMEA необходимо перевести требования, предъявляемые заказчиком, на уровень спецификаций, удобных для использования разработчиками изделия. Для этого можно использовать разные инструменты, одним из которых является использование матричного анализа (MX), получившего широкое распространение при разработке систем безопасности.

Преимуществом использования матричного анализа является информативное представление системы в виде древовидной структуры, в которой могут быть одновременно обозначены как функции, так и архитектура системы, и возможные отказы, при этом функциональные связи образуют матрицу.

На системном уровне с подсистемами сопоставляются только требования заказчика или нормативных документов, а также функции, обеспечивающие их выполнение (табл. 1). На данном этапе отдельные компоненты системы не анализируются и не сопоставляются. Структура каждой матрицы составляется на основе ответов на следующие три вопроса:

- Какая система, или какой продукт подлежит анализу?
- Какие потребности/ожидания заказчика, нормативных документов, требований, стандартов ассоциируются с системой или продуктом (функции/требования)?
- Какие подсистемы должны входить в состав системы или продукта? Какие функции будут возложены на ту или иную подсистему (прямо или косвенно)?

При данном подходе, основные функции, реализация которых требует использования программного обеспечения, сопоставляются с дублирующими (запасными) подсистемами электронной тормозной системы, а затем устанавливается их связь с выполнением тех или иных требований, предъявляемых к системе (табл. 2 – показаны результаты выполнения проекта SPARC «Безопасное движение с использованием усовершенствованного дублирующего контроля»). Таким образом, формируется некая классификация подсистем, позволяющая выявить прямую взаимосвязь между ними (с помощью «функции»), либо косвенную (посредством «отказа»).

Таблица 1

Требования, предъявляемые к электронной тормозной системе полуприцепа с усовершенствованной системой дублирования

Система SPARC	Законодательные	Заказчика	Внутренние
	Требования		
Информация о состоянии системы АБС	×		
Информация о состоянии системы предотвращения опрокидывания	×		
Наличие желтого предупреждающего сигнала	×		
Наличие красного предупреждающего сигнала	×		
Автоматический контроль положения опорной стойки полуприцепа		×	
Контроль положения грузовой платформы полуприцепа		×	
Гарантированное ручное управление		×	
Контроль компрессора			×

Требования, которым должны отвечать соответствующие компоненты для обеспечения выполнения той или иной функции, отображаются на связующем интерфейсе (рис. 2), который, в свою очередь, используются как средство разделения системы от этапов проектирования, а также как способ их сопоставления. Такой подход позволяет группам разработчиков работать независимо друг от друга в разных местах. Проектирование системы и ее анализ с помощью метода FMEA могут выполняться параллельно до определенной стадии развития процесса, после которого концепция FMEA (анализ того, как поведение системы зависит от поведения каждого отдельного компонента) может быть реализована в полной мере [8].

Метод FMEA обладает целым рядом преимуществ, в том числе возможностью использования системного подхода к классификации отказов компонентов системы, что в свою очередь уменьшает время и стоимость разработки, а также сокращает количество вариантов, необходимых для детального анализа. Таким образом, метод FMEA служит полезным инструментом для организации более эффективного планирования работ по тестированию си-

стемы, определяет ключевые задачи, решение которых требует более детальной проработки и серьезно влияет на безотказность работы системы, и, как следствие, способствует более полному удовлетворению потребностей заказчиков. Это эффективный инструмент для анализа малых, больших и сложных систем, который полезен при разработке экономически эффективной системы технического обслуживания изделия, и обеспечивает предотвращение повторения одних и тех же ошибок в будущем. Метод может быть также использован при проведении сравнительного анализа нескольких систем. Он удобен в практическом использовании как на уровне руководителей, так и непосредственных исполнителей проекта и способствует улучшению коммуникации между сотрудниками [9].

Таблица 2

Матрица функций и элементов системы

Semi-trailer	СТС ¹	АМ1 ²	АМ2	АМ3	АСУ ³	NRG ⁴	ТАУХ ⁵
Информация о состоянии системы АБС	×	×	×	×			×
Информация о состоянии системы предотвращения опрокидывания	×	×	×	×			×
Наличие желтого предупреждающего сигнала	×	×	×	×	×	×	
Наличие красного предупреждающего сигнала	×	×	×	×	×	×	
Автоматический контроль положения опорной стойки полуприцепа	×				×	×	×
Контроль положения грузовой платформы полуприцепа	×	×			×	×	
Гарантированное ручное управление	×					×	×
Контроль компрессора	×				×	×	

Примечание: 1 – центральный блок управления; 2 – модулятор оси; 3 – модуль подачи воздуха;
4 – энергетический модуль; 5 – вспомогательный модуль

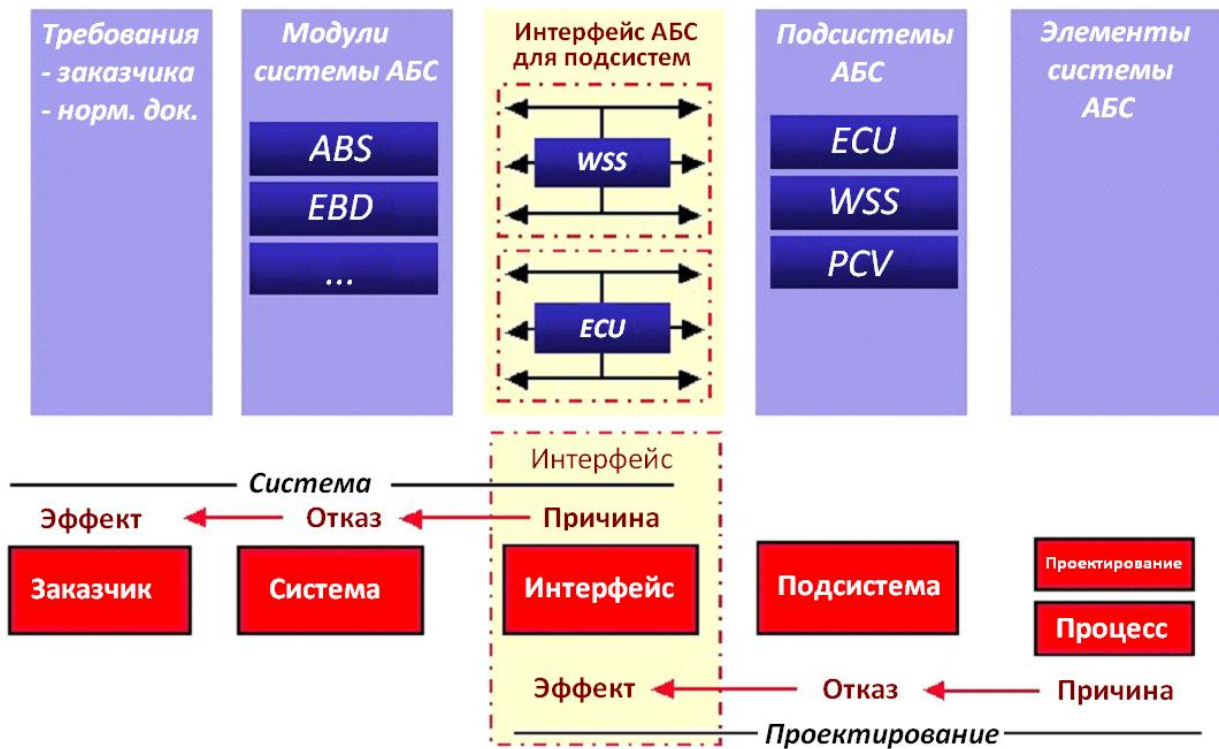


Рис. 2. Представление уровней системы и процесса проектирования по методу FMEA [8]

2.3. Качественный анализ структурной надежности

Каждый объект должен быть ремонтпригодным, срок его службы может быть определен с использованием математического аппарата теории вероятности и теории надежности [10]. Под надежностью системы понимается свойство изделия сохранять значения установленных параметров функционирования в определённый период времени. Надежность тормозных систем большегрузных транспортных средств может быть исследована с использованием математических моделей, описывающих систему как совокупность элементов, для ремонта которых требуется определенное время.

В дальнейшем предполагается [11], что время наработки до отказа элемента системы является независимой случайной величиной, и то, что для всех элементов оно характеризуется одинаковым вероятностным распределением. Кроме того, время ремонта какого-либо компонента системы также считается независимой случайной величиной с одинаковым характером распределения за определенный период эксплуатации.

Далее, функция распределения наработки до отказа будет обозначена $F(t)$ со средним значением T_1 с дисперсией σ_1^2 , а функция распределения продолжительности ремонта будет обозначена $G(t)$ со средним значением T_2 и дисперсией σ_2^2 .

Мерой оценки надежности какого-либо элемента системы, требующего определенного времени на ремонт, является так называемый коэффициент готовности $A(t)$, что есть вероятность фактической работоспособности элемента в момент времени t . Он может быть рассчитан с использованием следующего выражения (при условии, что пройден «достаточно длительный период» времени):

$$A_e = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = \frac{T_1}{T_1 + T_2}, \quad (1)$$

где T_1 – среднее значение времени между отказами (MTBF); T_2 – среднее значение времени, необходимое для ремонта (MTTR).

В нестационарных условиях коэффициент готовности определяется из формулы

$$A(t) = 1 - F(t) + \int_0^t [1 - F(t-x)] h(x) dx, \quad (2)$$

где $h(x)$ функция плотности восстановления [11], при этом

$$h(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(x), \quad \Phi_n(t) = \int_0^t F(t-x) dG_n(x), \quad F_n(t) = \int_0^t F_{n-1}(t-x) dF(x), \quad G_n(t) = \int_0^t G_{n-1}(t-x) dG(x),$$

где n количество отказов зафиксированных за период времени t .

В теории надежности при анализе механических частей транспортных средств принимается допущение о том, что временные интервалы эксплуатации и ремонта подчиняются экспоненциальному закону:

- период эксплуатации $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$,
- время ремонта $G(t) = 1 - e^{-\mu t}$.

Таким образом, в стационарных условиях имеем

$$A_e = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (3)$$

в нестационарных

$$A(t) = \frac{\mu + \lambda e^{-(\lambda + \mu)t}}{\mu + \lambda}. \quad (4)$$

В приведенных выражениях:

- $1/\lambda = T_1$ – среднее значение времени между отказами (MTBF),
- $1/\mu = T_2$ – среднее значение времени, необходимое для ремонта (MTTR).

Достаточно важным является определение вероятности $R(\tau)$ функционирования в течение определенного интервала времени τ , т.е. так называемый коэффициент надежности. В нестационарном случае имеем

$$R_t(\tau) = 1 - F(t + \tau) + \int_0^t [1 - F(t + \tau - x)] h(x) dx, \quad (5)$$

в стационарном

$$R_e(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} R_t(t) = \frac{1}{T_1 + T_2} \int_{\tau}^{\infty} [1 - F(x)] dx. \quad (6)$$

В стационарном случае, используя гипотезу экспоненциального закона распределения временных интервалов эксплуатации и ремонта

$$R_e(\tau) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} e^{-\lambda \tau}. \quad (7)$$

Последовательное соединение элементов системы. В этом случае отказ каждого отдельного элемента приводит к отказу всей системы. Коэффициент готовности (вероятность работы в момент времени t) можно приближенно рассчитать по формуле [11]

$$A_{serial} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^n \frac{T_{k2}}{T_{k1}}}, \quad (8)$$

где n – количество элементов в системе; T_{k1} – среднее время наработки до отказа элемента k ; T_{k2} – среднее время ремонта элемента k .

Коэффициент надежности (вероятность функционирования в течении определенного интервала времени τ) может быть определена из выражения:

$$R_{serial}(\tau) = A_{serial} e^{-\frac{\tau}{T_1}}, \quad (9)$$

где $T_1 = 1 / \sum_{k=1}^n \frac{1}{T_{k1}}$.

Полученные выражения являются относительно точными и адекватными, при условии принятия гипотезы об экспоненциальном законе распределения временных интервалов эксплуатации и ремонта.

Параллельное соединение элементов системы. В этом случае отказ какого-либо элемента системы не влияет на надежность других: отказы элементов являются независимыми, более того, они могут быть восстановлены независимо друг от друга.

Таким образом, в стационарном случае для всей системы в целом (при условии, что каждый отдельный элемент функционирует в течение времени t) имеем [11]

$$A_{parallel} = \frac{T_{11}}{T_{11} + T_{12}} \cdot \frac{T_{21}}{T_{21} + T_{22}} \cdots \frac{T_{n1}}{T_{n1} + T_{n2}} = \prod_{i=1}^n \frac{T_{i1}}{T_{i1} + T_{i2}}, \quad (10)$$

где n – количество элементов в системе, T_{i1} – среднее время наработки до отказа элемента i ; T_{i2} – среднее время ремонта элемента i .

Если структура системы предполагает наличие дублирующего контура, в котором элементы связаны параллельно и имеют такую же степень надежности, то можно рассчитать вероятность эксплуатации k элементов системы среди общего числа n при данном интервале времени t :

$$A_k = \binom{n}{k} A_e^k (1 - A_e)^{n-k}, \quad (11)$$

где A_e – коэффициент готовности для стационарного случая.

Коэффициент надежности k элементов системы среди общего числа n при данном интервале времени t для стационарного случая:

$$R_k(\tau) = \binom{n}{k} R_e(\tau)^k (1 - R_e(\tau))^{n-k}. \quad (12)$$

Смешанный способ соединения элементов системы. Реальные конструкции тормозных систем состоят из последовательно соединенных подсистем, которые имеют различные характеристики надежности. Эти подсистемы в некоторых случаях могут состоять из аналогичных более мелких подсистем с одинаковым уровнем надежности (и с той же функциональностью), соединенных между собой параллельно. Таким образом, структура всей системы, как правило, носит смешанный характер, и определение коэффициента надежности для всей системы требует применения более сложных аналитических расчетов и, в ряде случаев, численного моделирования.

Вывод

В настоящее время в процессе анализа автомобильных систем, в которых количество электронных устройств неуклонно растет, возникает проблема выбора наиболее подходящего метода анализа надежности. В данной работе рассмотрены два наиболее эффективных метода, позволяющие проводить детально структурированный анализ систем. В зависимости от цели анализа необходимо выбирать наиболее подходящий инструмент оценки надежности, а

в случае комплексного анализа рационально использовать различные подходы, которые могли бы успешно дополнять друг друга.

Библиографический список

1. **Srinivasan, S.K.** Probabilistic Analysis of Redundant Systems / S.K. Srinivasan, R. Subramanian. – Springer-Verlag, Berlin, 1980.
2. **Ebeling, C.E.** An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering / C.E. Ebeling. – McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.
3. **Popovic, P.** Design for reliability of vehicles in the concept phase / P. Popovic, G. Ivanovic // EAEC Congress, 2005.
4. **Péter, T.** Gépjármu lengorendszerek felfüggesztéssparamétereinek optimalása / T. Péter. – MTA, Budapest, 1997. Kandidátúésírtekezés.
5. **Péter, T.** Mathematical Transformations of Road Profile Excitation for Variable Vehicle Speeds / T. Péter // Studies in Vehicle Engineering and Transportation Science. 2000. P. 51–69.
6. X-By-Wire systems of the next generation / M. Armbruster [at al.] // AVEC International Symposium, 2004.
7. **Papadopoulos, Y.** Automating aspects of safety design in contemporary automotive system engineering / Y. Papadopoulos, C. Grante, J. Wedlin // FISITA Conference, 2004.
8. **Dobry, A.** Think globally, act locally. FMEA: Effective handling of complex systems / A. Dobry. - Knorr-Bremse Systeme für Nutzfahrzeuge GmbH, Germany, 1999.
9. **Dhillon, B.S.** Design reliability: Fundamentals and Applications / B.S. Dhillon // CRC Press LLC., 1999.
10. **Robinson, R.M.** SIL Rating Fire Protection Equipment / R.M. Robinson, K.J. Anderson // Conferences in Research and Practice in Information Technology, 8th Australian Workshop on Safety Critical Systems and Software (SCS'03).
11. **Prezenszki, J.** A raktári anyagmozgatási géprendszerek megbízhatósági és kapacitásvizsgálata / J. Prezenszki, P. Várlaki // GÉP XXX. 1978. №3. P. 85–92.

*Дата поступления
в редакцию 28.06.2011*

T. Fulep, L. Palkovics, L. Nadai

ON QUALITATIVE AND OPERATIONAL RELIABILITY OF ELECTRONIC BRAKE SYSTEMS FOR HEAVY DUTY VEHICLES

The development of the safety critical systems of future commercial vehicles is mainly driven by that social demand, that the societies wants to see safer, more reliable vehicles on the roads, which can also handle more complex situations than the human driver can. It is questioned whether the approaches of the classical reliability theory are appropriate for redundant electronic systems, especially if they have a safety critical nature, such as the electronic brake system, which has been used in commercial vehicles in Europe for almost a decade.

Key words: electronic brake system, redundancy level, reliability analysis.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.5.001

Нгуен Зуй Бак

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРТОВЫХ БУКСИРОВ ДЛЯ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ

Социалистическая Республика Вьетнам, г. Хайфон

Обсуждается проблема создания современных портовых буксиров, способных обеспечить эффективную и безаварийную кантовку крупнотоннажных судов в портах Вьетнама.

Ключевые слова: морские порты, буксирные суда, транспортные суда, кантовочные операции, грузы, пропускная способность.

Развитие морских портов Вьетнама – это стратегическое направление развития инфраструктуры морского транспорта и портов, принятое согласно программе Правительства Социалистической Республики Вьетнам (СРВ).

Работа судов морского транспортного флота во многом зависит от успешного обслуживания их буксирными судами. Основным видом буксирных работ в настоящее время являются портовые работы, главным образом, буксирные и кантовочные операции. В последние годы количество грузов и транспортных судов, проходящих через порты Вьетнама, непрерывно увеличивалось. Планами Правительства СРВ намечено пополнить транспортный флот страны новыми крупнотоннажными судами. Ставится задача существенно развить пропускную способность морских портов. Таким образом, роль портовых буксиров (ПБ), предназначенных для буксировки и кантовочных работ, значительно возрастет. Следовательно, проблема создания современных ПБ, способных обеспечить эффективную и безаварийную кантовку крупнотоннажных судов, весьма актуальна для СРВ. Эта задача может быть решена посредством проектирования и постройки специальных буксирных судов. Роль проектирования в решении этой задачи очень велика, так как уже на его начальных стадиях за счет технического совершенства и экономической эффективности новых судов, можно сэкономить значительные средства на создание портового флота.

Особенности эксплуатации ПБ в современных условиях и в будущем не позволяют в полной мере использовать традиционные методы, используемые при определении эффективности транспортных судов. Вопрос, связанный с определением масс и координат центра тяжести (ЦТ) судна, является одним из важнейших вопросов при проектировании судна, поскольку от него зависят многие важные качества судна, такие как мореходные качества судна и экономические показатели. В настоящее время на начальных стадиях проектирования, при отсутствии необходимых чертежей, нагрузка масс и координаты ЦТ судна, как правило, определяются по статистическим формулам. Возможность уточненного определения нагрузки масс и координат ЦТ судна на начальных стадиях сократит трудоемкость последующих этапов и повысит качество процесса проектирования.

До 1975 г. судостроения, как отрасли промышленности, в СРВ практически не существовало. Лишь отдельные мелкие заводы в разных концах страны занимались постройкой

деревянных или малых стальных судов. Послевоенный этап проектирования и строительства портового флота начался с 1959 г, когда был разработан кораблестроительным научно-технологическим институтом (г. Хайфон, Вьетнам) проект ТКЛ60 мощностью 170 л.с. В 1996 г. была создана Вьетнамская судостроительная корпорация (Vinashin) на основании существующих предприятий судостроительной отрасли. Деятельность этой корпорации направлена на развитие судостроительной промышленности как одного из ведущих секторов экономики страны. На сегодняшний день Вьетнамская судостроительная корпорация достигла значительных успехов. В настоящее время Правительством СРВ принимаются меры по строительству новых ПБ на верфях Вьетнама. Так, с 2003 г. реализуется план строительства ПБ “TRANSVINA” по проекту VN - L141 мощностью 2х755 л.с., а с 2006 г. - строительство ПБ “Chan May” по проекту VN LT41 мощностью 2х500 л.с.

Определению массы металлических корпусов буксирных судов посвящены работы А.В. Слуцкого, В.М. Пашина, и Б.В. Богданова. Кроме того, А.В. Слуцкий и В.М. Пашин предложили формулы и для определения координат ЦТ буксирных судов. Однако эти работы не учитывают архитектурно-конструктивные особенности вьетнамских портовых буксиров. В настоящее время отсутствуют систематические исследования, посвященные обоснованию частных и общих показателей эффективности использования ПБ, отсутствуют методики определения массы металлического корпуса на начальных стадиях проектирования.

В связи с отсутствием достаточного количества материалов для статистической обработки данных по нагрузкам масс спроектированных и построенных ПБ, различающихся по архитектурно-конструктивному типу (АКТ) и размерениям, было принято решение о проектировании специальной серии таких судов для дальнейших исследований.

Анализ АКТ вьетнамских ПБ и статистические данные по количеству поперечных переборок, ярусов надстроек и рубок, длине машинного отделения, расположению машинного отделения по длине судна, практическим шпациям. В результате были установлены АК характеристик для проектирования серий стальных корпусов ПБ. Принятые параметры характеристик серийных ПБ, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика систематической серии портовых буксиров

Характеристики	Принятые величины
Расчетная длина L , м	15,0; 20,0; 25,0; 30,0; 35,0
Отношение L/B	2,80; 3,30; 3,80
Отношение B/T	2,20; 3,00; 3,80;
Отношение H/T	1,20; 1,40; 1,60
Коэффициент полноты мидель-шпангоута, β	0,840; 0,890; 0,940
Коэффициент продольной полноты, ϕ	0,500; 0,590; 0,680
Система набора	Поперечная
Расположение МО	Среднее
Практическая шпация, мм	500; 600
Придел текучести материала, МПа	235,0

Статьи массы металлического корпуса разделены на две конструктивные группы. В первую группу вошли массы статей металлического корпуса, размеры связей которых устанавливаются по Правилам классификации и постройки морских судов: наружная обшивка; продольный и поперечный набор двойного дна; продольный и поперечный набор бортов; палубы и платформы; обшивка и набор главных поперечных переборок; обшивка и набор бортов, палуб и переборок основного корпуса, надстроек и рубок. В состав второй группы вошли следующие статьи металлического корпуса: мачты с мостиками и площадками, штевни,

отливки, клюзы, дымовые трубы и дымоходы, подкрепления корпуса, фундаменты и т.д. В общем виде массы второй группы можно представить как функции переменных L, B, H .

Разделение массы металлического корпуса на 15 составляющих позволило достаточно точно определить массы и координаты ЦТ каждой статьи с учетом АК особенностей ПБ. Кроме того, позволило подобрать функциональные зависимости, наиболее точно определяющие связь конкретной статьи нагрузки с характеристиками судна при удовлетворении требованиям Правил Российского Морского Регистра Судоходства к назначению размеров связей корпуса. Важно, что избранный принцип разбивки массы металлического корпуса на укрупненные статьи не нарушает требований существующего отраслевого стандарта по нагрузке масс.

Использованы программные продукты AutoCad, Rhinoceros (рис. 1) и ShipConstructor (рис. 2) для определения масс и координат ЦТ наружной обшивки, настилов палуб, поперечных и продольных переборок, элементов набора и т.д. Программа ShipConstructor позволяет создать трехмерную модель набора корпуса судна. В результате её использования получаем высокую точность расчета масс и координат ЦТ отдельных деталей корпуса. В разработке математической модели конструкции корпуса судна авторы опирались на возможности AutoCad, так как важнейшей особенностью решаемой внутренней задачи проектирования судов является создание обводов и конструкции корпуса для соответствующих стадий разработки проекта судна.

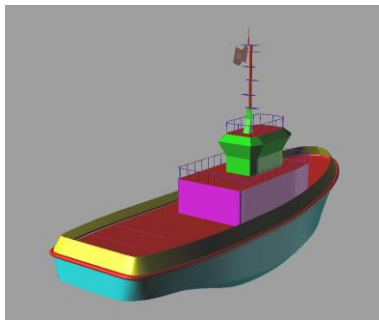


Рис. 1. 3D-модель ПБ варианта №58 в Rhinoceros

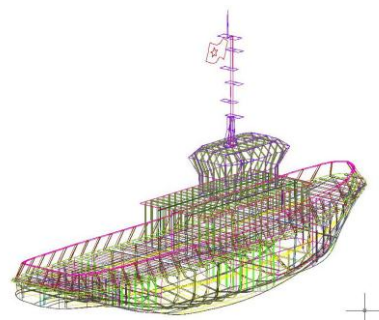


Рис. 2. 3D-модель ПБ варианта №58 в ShipConstructor

В разработанной методике определения масс и координат ЦТ ПБ с учетом АК особенностей была спроектирована серия из 135 судов с систематически меняющимися главными размерениями и основными характеристиками формы и конструкции корпуса. Все модели систематической серии имеют упрощенные обводы с двумя сломом линейчатых обводов на скуле.

Для примера рассмотрены основные этапы определения массы и координат ЦТ наружной обшивки ПБ для варианта №58: $L=25$ м, $B=6,58$ м, $H=3,59$ м, $T=2,99$ м, $a=0,50$ м, $\delta=0,592$, $\varphi=0,680$.

Путем статистической обработки теоретических чертежей (ТЧ) спроектированной серии моделей ПБ с помощью программы AutoCad получаем теоретический чертеж (рис. 3).

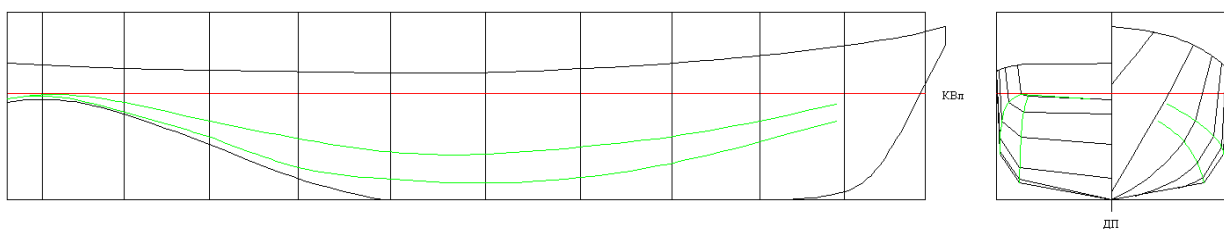


Рис. 3. Теоретический чертеж портового буксира варианта №58

На следующем этапе строится 3D-модель наружной обшивки корпуса в среде AutoCAD (рис. 4).

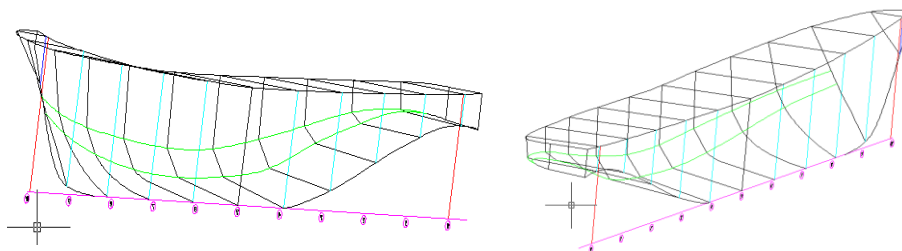


Рис. 4. 3D-модель наружной обшивки в AutoCAD

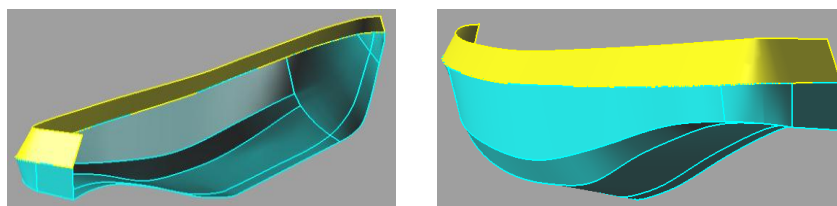


Рис. 5. 3D-модель наружной обшивки и фальшборта в Rhinoceros

Использование программы Rhinoceros позволяет импортировать 3D-модель наружной обшивки (рис. 5) из программы AutoCAD в программу Rhinoceros для формирования поверхности наружной обшивки модели судна, представленной на рис. 5.

Затем с использованием программы ShipConstructor (рис. 6) импортируется модель поверхности наружной обшивки из программы Rhinoceros для создания пространственной 3D-модели конструкции корпуса.

ShipConstructor предоставляет в распоряжение проектанта инструменты для определения массы и координат ЦТ обчитываемой модели судна в графической оболочке WINDOWS, где и производятся непосредственные расчеты по конструкции корпуса.

Аналогично можно определить массы и координаты ЦТ других статей.

Разделение массы металлического корпуса на 15 составляющих позволило определить массы и координаты ЦТ каждой статьи с учетом АК особенностей ПБ, систематически изменяющихся главных размерений, отношений главных размерений, коэффициентов полноты, вариации расположения МО по длине судна, числа и расположения по длине судна главных поперечных переборок, расположения и протяженности надстроек и рубок, шпации. Учет этих характеристик позволил подобрать функциональные зависимости, определяющие связь массы конкретной статьи нагрузки с характеристиками судна при удовлетворении требованиям Правил Российского Морского Регистра Судоходства к назначению размеров связей корпуса.

В качестве примера представим функциональные зависимости, позволяющие рассчитать по разрабатываемой методике массу и координаты ЦТ отдельных статей нагрузки проектируемого буксира на примере наружной обшивки. В зависимости от АКТ ПБ, наружную обшивку можно разбить на нескольких участков, как это показано на рис. 7. Площади участков I, II разбиваются по длине и высоте борта судна на более мелкие участки в соответствии с требованиями Правил классификации и постройки морских судов к толщинам отдельных листов

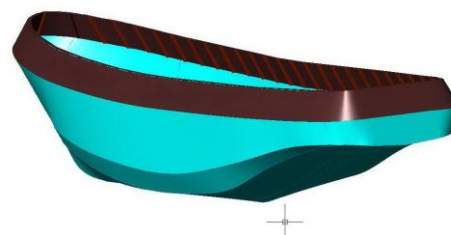


Рис. 6. 3D-модель наружной обшивки и фальшборта в ShipConstructor

наружной обшивки. При этом масса наружной обшивки определяется суммированием масс наружной обшивки основного корпуса P_1 и обшивки фальшборта P_2' (P_2' – масса фальшборта без стоек контрофорсов и планширя).

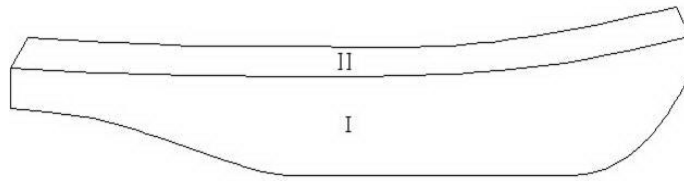


Рис. 7. Наружная обшивка основного корпуса и фальшборта:

I участок – наружная обшивка основного корпуса;

II участок – обшивка фальшборта

Суммарная масса наружной обшивки основного корпуса оценивается по следующей формуле:

$$P_1 = p_1 \cdot 10^{-3} \cdot L^2 (B + H) T / H, \text{ т}, \quad (1)$$

где p_1 – измеритель массы наружной обшивки основного корпуса, $\text{т}/\text{м}^3$.

Измеритель массы наружной обшивки основного корпуса ПБ определен выражением:

$$\begin{cases} p_1 = 47,283 \cdot (LT / H)^{-0,9187}, \text{ т}/\text{м}^3 - \text{ для шпации } a=0,500 \text{ м} \\ p_1 = 55,975 \cdot (LT / H)^{-0,9268}, \text{ т}/\text{м}^3 - \text{ для шпации } a=0,600 \text{ м} \end{cases} \quad (2)$$

В формулах (2) измерители массы наружной обшивки представляются для постоянных значений коэффициентов полноты. С целью универсализации формулы (2) в нее введен ряд поправок, учитывающих возможные изменения коэффициентов полноты и относительной ширины корпуса. С учетом этих поправок формулы (2) для определения измерителя массы наружной обшивки основного корпуса соответственно приобретают вид:

$$P_1' = c_{11} \cdot c_{12} \cdot c_{13} \cdot P_1, \text{ т}/\text{м}^3 \quad (3)$$

где P_1' – измеритель массы наружной обшивки основного корпуса с поправкой на изменение коэффициентов полноты и отношения B/T , $\text{т}/\text{м}^3$; $c_{11} = -0,0452 \cdot B/T + 1,1368$ – коэффициент, учитывающий влияние отношения B/T ; $c_{12} = 0,0914(\varphi - \varphi_0) + 1,0003$ – поправка на коэффициент продольной полноты φ , при постоянном коэффициенте полноты мидель-шпангоута $\beta = \beta_0 = 0,871$; $c_{13} = 0,214(\beta - \beta_0) + 0,9995$ – поправка на коэффициент полноты мидель-шпангоута β , при постоянном коэффициенте продольной полноты $\varphi = \varphi_0 = 0,638$;

Зависимости аппликаты ЦТ наружной обшивки основного корпуса z_1 от выражения H^2/T для вьетнамских ПБ могут быть выражены в виде:

$$\begin{cases} z_1 = 0,4007 \cdot (H^2 / T)^{1,0249}, \text{ м} - \text{ для } H/T=1,200 \\ z_1 = 0,3280 \cdot (H^2 / T)^{1,0374}, \text{ м} - \text{ для } H/T=1,400 \\ z_1 = 0,2841 \cdot (H^2 / T)^{1,0279}, \text{ м} - \text{ для } H/T=1,600 \end{cases} \quad (4)$$

Выражение зависимости абсциссы ЦТ массы наружной обшивки основного корпуса x_1 от длины судна L для ПБ имеет вид

$$x_1 = 0,4925 \cdot L^{0,9966}, \text{ м}. \quad (5)$$

Для определения массы фальшборта, включая стойки и планширь, получена зависимость:

$$P_2 = c_2 \cdot p_2 \cdot L^2 B, \text{ т}, \quad (6)$$

где P_2 – измеритель массы фальшборта; т/м³; h_ϕ – высота фальшборта, м; $c_2 = 0,893h_\phi + 0,109$ – коэффициент, учитывающий фактическое значение высоты фальшборта при его сочетании по высоте с леером. Значения указанного измерителя для ПБ и получено выражение для p_2 :

$$p_2 = 0,0726 \cdot (LB)^{-0,8489}, \text{ т/м}^3. \quad (7)$$

Зависимость центра тяжести фальшборта z_2 от суммарной высоты $(H+h_\phi)$ для портовых буксиров, которая может быть выражена формулой:

$$z_2 = 0,8444 \cdot (H+h_\phi)^{1,0888}, \text{ м}. \quad (8)$$

Выражение зависимости абсциссы ЦТ массы фальшборта x_2 от длины судна L для вьетнамских ПБ имеет вид

$$x_2 = 0,4598 \cdot L^{1,0061}, \text{ м}. \quad (9)$$

Аналогичную структуру имеют формулы и для определения масс и координат ЦТ других статей нагрузки металлического корпуса.

Функциональные зависимости нагрузки масс и относительных координат ЦТ остальных 13 статей нагрузки судна порожнем разработаны путем статистической обработки данных по построенным и спроектированным вьетнамским, российским и советским ПБ.

Функциональные зависимости, связывающие массу и относительные координаты ЦТ статей нагрузки дедвейта судна от его основных характеристик, разработаны для двух случаев нагрузки, при которых проводится проверка остойчивости и посадки буксиров по Правилам классификации и постройки морских судов:

- судно с полными запасами;
- судно с 10% запасов.

Величина дедвейта ПБ разбита на пять групп нагрузки и в основном определяется величиной жидких грузов (пресной воды, топлива, смазки) в составе его нагрузки масс. Из прочих составляющих дедвейта ПБ в основном включается масса экипажа с багажом и провизия.

Сравнение расчетов масс и координат ЦТ металлического корпуса и водоизмещения порожнем судна по предложенному алгоритму с данными технических проектов свидетельствуют об их удовлетворительном согласовании.

Например, для пр. 1514 ошибки в определении масс и координат ЦТ равны ($\delta(P_{\text{МК}})=-1,5\%$, $\delta(x_{\text{МК}})=+2,9\%$ и $\delta(z_{\text{МК}})=+0,5\%$) и ($\delta(D_{\text{П}})=+2,9\%$, $\delta(x_{\text{П}})=+4,2\%$ и $\delta(z_{\text{П}})=-6,4\%$); для пр. VN - LT41 ошибки в определении масс и координат ЦТ равны ($\delta(P_{\text{МК}})=+0,2\%$, $\delta(x_{\text{МК}})=-1,0\%$ и $\delta(z_{\text{МК}})=-3,1\%$) и ($\delta(D_{\text{П}})=-1,8\%$, $\delta(x_{\text{П}})=+0,7\%$ и $\delta(z_{\text{П}})=+0,1\%$).

В настоящее время намечается тенденция к сокращению этапов проектирования, т.е. вместо технического и рабочего проекта создается техно-рабочий проект. А это требует более высокой точности расчетов на стадии эскизного проектирования. В работе показано, что для обеспечения допустимой точности расчета в определении водоизмещения порожнем необходимо водоизмещение порожнем определить со средней квадратичной погрешностью: на стадии технического предложения на более 7,69%; на стадии эскизного проекта - 5,01%. Для определения водоизмещения судна необходимо массы металлического корпуса в стадии технического предложения определять с допустимой средней квадратичной погрешностью 5,8%, а в стадии эскизного проекта 3,8%.

Результаты определения массы и координат ЦТ металлического корпуса по предлагаемой методике свидетельствуют об удовлетворительном согласовании расчетных и проектных значений, а возможная средняя квадратичная погрешность в определении массы металлического корпуса с достоверностью 0,95 составляет 4,3%, что вполне удовлетворяет точно-

сти расчетов на стадии эскизного проекта. Возможная допустимая погрешность в определении водоизмещения порожнем по предлагаемому алгоритму с достоверностью 0,95 составляет 5,1%.

Следовательно, предлагаемые функциональные зависимости для определения массы металлического корпуса и водоизмещения порожнем ПБ удовлетворяют требованиям точности на стадиях технического предложения и эскизного проекта.

Современные тенденции проектирования судов ориентированы на все более широкое применение вычислительной техники. Специфика ПБ и их многообразие требуют разработки специализированных модулей для расширения вычислительных ресурсов систем автоматизированного проектирования. Математическое моделирование на начальных стадиях проектирования судна применяется, чтобы оценить успешность функционирования судна и получить возможность исследования и имитации функционирования проектируемого судна в любых условиях. Применение математического моделирования с использованием соответствующих формул сводит задачу проектирования ПБ к экстремальной задаче математического программирования.

Представление о характере исходных данных, необходимых для решения задачи оптимизации флота ПБ, можно получить из схемы, приведенной на рис. 8.

Рассматриваемая задача в общем случае представляет собой нелинейную задачу математического программирования с функциями критериев и ограничениями неопределенной (в смысле выпуклости и вогнутости) природы. Особенностью этой задачи является также и то, что большинство входящих в модель функций заданы алгоритмически в виде расчетных процедур (например, процедуры расчета скорости на свободной воде, тяги, остойчивости и т.д.).

Установление оптимальных главных размерений, коэффициентов полноты и других основных характеристик судна, обеспечивающих выполнение всех обязательных нормативных требований, предъявляемых к судну, а также удовлетворение в максимально возможной степени многочисленных и подчас противоречивых требований эксплуатации, является основной задачей проектирования современного судна.



Рис. 8. Исходные данные, необходимые для решения задачи оптимизации пополнения ПБ СРВ

Задача выбора наивыгоднейших основных параметров проектируемого судна и числа судов серии в общем виде может быть сформулирована для элементов морского портового буксира при выполнении следующих ограничивающих условий:

- главные размерения, их соотношения, а также коэффициенты полноты не превосходят заданных или принятых допустимых величин;
- характеристики начальной остойчивости ПБ укладываются в рекомендуемые нормами Регистра границы, гарантирующие удовлетворительное поведение его в условиях волнения и ветра, а также в случае косоого рывка буксирного троса;
- тяговые и маневренные показатели достаточны для эффективного выполнения работ в соответствии с его назначением, оговоренным ТЗ;
- соблюдаются требования конвенции о грузовой марке в отношении допустимой величины надводного борта.

Компонентами вектора U (в число параметров задачи проектирования ПБ (вектора U) включаются следующие величины): тип ПБ, $n_{\text{э}}$ – численность экипажа, автономность плавания по запасам, район плавания, T – срок инвестиций и т.д. Значения этих величин считаются заданными заказчиком или определенными на основе тщательного изучения и анализа современного состояния и тенденций эксплуатации буксирного судна в заданном районе. Кроме перечисленных основных параметров, в состав компонентов вектора U могут входить и другие исходные данные, характеризующие условия создания и эксплуатации ПБ. По характеру описания задаваемой величины компоненты вектора U могут быть как детерминированными, так и случайными.

Компонентами вектора X в данном случае приняты:

$x_1 = L/B$ – отношение длины к ширине; $x_2 = B/T$ – отношение ширины к осадке;
 $x_3 = H/T$ – отношение высоты борта к осадке; $x_4 = n$ – число судов в серии ($n \in N$);
 $x_5 = \sum Ne$ – суммарная мощность ГД судна, л.с. (кВт).

Диапазон оптимизируемых переменных:

Множество переменных образует вектор $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, на компоненты которого накладываются двухсторонние ограничения типа:

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max} \quad (i = 1, \dots, m), \quad (10)$$

где $m = 5$ – количество независимых переменных в данной работе.

Двухсторонние ограничения заменяются односторонними тривиальными ограничениями:

$$x_i - (x_i)_{\min} \geq 0; \quad (x_i)_{\max} - x_i \geq 0. \quad (11)$$

К функциональным ограничениям относятся:

$$\text{– требование к длине судна: } L_{\min} \leq L \leq L_{\max}, \quad (12)$$

где L_{\min} , L_{\max} – минимальная, максимальная допустимая длина судна по условиям постройки и характеристикам порта обслуживания, м;

$$\text{– требование к ширине судна: } B_{\min} \leq B \leq B_{\max}, \quad (13)$$

где B_{\min} , B_{\max} – минимальная, максимальная допустимая ширина судна по условиям постройки и характеристикам эксплуатации, м;

$$\text{– требование к осадке судна: } T_{\min} \leq T = \frac{\sum P_i}{\gamma \delta L B} \leq T_{\max}, \quad (14)$$

где T_{\min} , T_{\max} – минимальная, максимальная допустимая осадка судна по условиям эксплуатации на рейде, в канале и в порту обслуживания, м;

К функциональным условиям относятся:

$$\text{– требование соотношения между силами веса и силами поддержания по закону Архимеда, выраженное в виде: } D \geq \sum P_i, \quad (15)$$

где $D = \gamma \delta LBT$ – водоизмещение судна, т; P_i – составляющие нагрузки масс, т.

$$\text{– требование запаса плавучести: } W_{B12} \geq W_{B12}^* ; \quad (16)$$

где $W_{B12} = \alpha \cdot k \cdot L \cdot B \cdot (H - T)$ – фактический запас плавучести; $W_{B12}^* = \alpha \cdot k \cdot L \cdot B \cdot H_{ГМ}$ – требуемый запас плавучести; H – высота борта; $H_{ГМ}$ – величина надводного борта, определяемая по правилам о грузовой марке; α – коэффициент полноты площади КВЛ, k – коэффициент, учитывающий особенности формы надводной части корпуса;

– начальная метацентрическая высота, устанавливаемая с помощью нормативного требования к нижнему пределу начальной поперечной метацентрической высоты:

$$h_0 \geq h_{o_{\min}} , \quad (17)$$

где h_0 – фактическая начальная метацентрическая высота; $h_{o_{\min}}$ – минимально допустимое значение начальной метацентрической высоты (для портовых буксиров $h_{o_{\min}} = 0,15$ м);

– критерий остойчивости при рывке буксирного троса в процессе проведения морских буксировок:

$$K_p = \sqrt{l_{d_{\text{онп}}} / l_{d_{\text{кр}}}} \geq 1 ; \quad (18)$$

где $l_{d_{\text{онп}}}$ – плечо динамической остойчивости, определяемое как ордината диаграммы динамической остойчивости буксира при угле крена, равном углу заливания или углу опрокидывания, определяемому без учета бортовой качки, в зависимости от того, какой из них меньше, м; $l_{d_{\text{кр}}}$ – динамическое кренящее плечо, характеризующее действие условного рывка буксирного троса, м;

– ограничения значений параметров диаграммы статической остойчивости: максимальное плечо диаграммы статической остойчивости должно быть не менее 0,25 м, ($l_{\text{max}} \geq 0,25$); угол заката диаграммы должен быть не менее 60° , ($\theta_{\text{зак}} \geq 60^\circ$); угол максимума диаграммы должен быть не менее 30° , ($\theta_{\text{max}} \geq 30^\circ$);

Все перечисленные функциональные ограничения удобно представить односторонними неравенствами вида $g_j(X, U) \geq 0$. Для этого используется одна из следующих формул:

$$g_j(X, U) = \frac{A_j}{a_j(X)} - 1 \text{ при } a_j(X) \leq A_j, \text{ или } g_j(X, U) = \frac{a_j(X)}{A_j} - 1 \text{ при } a_j(X) \geq A_j, \quad (19)$$

где $a_j(X)$ – значение характеристики судна, полученное в результате расчетов.

Критерий эффективности (функция цели):

Критерии оптимизации, выбираемые в зависимости от требований заказчиков, сформированы в виде:

$F \rightarrow \mathbf{max} (\mathbf{min})$ – экономические критерии оптимизации характеристик флота портовых буксиров.

Оптимальным вариантом судна считается тот вариант, который обладает одним из следующих признаков, рассчитанных с учетом дисконтирования:

- минимальной себестоимостью единицы продукции (услуги) $C_{уд}$ за весь период инвестиции;
- минимальными затратами при эксплуатации судна $З_{\text{общ}}$ за весь период инвестиций;
- минимальным сроком окупаемости судна $T_{ок}$;
- максимальной общей экономической эффективностью $\mathcal{E}_{\text{общ}}$;
- максимальным экономическим эффектом за весь период инвестиций \mathcal{E} ;
- максимальной рентабельностью за весь период инвестиций R ;
- максимальной прибылью (валовой или чистой) за весь период инвестиций $\Pi_{\text{вал}}$ (или $\Pi_{\text{ч}}$).

Кроме этих экономических критериев (max и min), существует критерии конкурентоспособности: т. е. ЧДД > 0 и ИД > 1.

где ЧДД – чистый дисконтированный доход, ИД – индекс доходности.

При вариации вариантов судов, по одному из критериев можно определить оптимальный вариант судна графическим или математическим путем.

Для реализации математической модели используются программные продукты систем Visual Basic For Application (VBA) и средств Microsoft Office Excel.

Библиографический список

1. **Нгуен, З.Б.** Исследование влияния основных характеристик портовых буксиров на измерители массы и координаты центра тяжести металлического корпуса / З.Б. Нгуен, Д.К. Нгуен // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2009. №2. С. 33–38.
2. **Нгуен, З.Б.** Определение массы и координат центра тяжести наружной обшивки портового буксира с использованием программ Autocad, Rhinoceros и Shipconstructor / З.Б. Нгуен, Е.В. Маслюк // Морская индустрия, транспорт и логистика в странах региона балтийского моря: новые вызовы и ответы: VII Международная конференция / БГАРФ. – Калининград, 2009. С. 93–96.
3. **Нгуен, З.Б.** Направления исследований влияния основных характеристик судна на измерители массы и координаты центра тяжести статей нагрузки портовых буксиров / З.Б. Нгуен, Е.В. Маслюк // Инновации в науке и образовании – 2009: VII Международная научная конференция. – Калининград, 2009. Ч. II. С. 47–49.
4. **Нгуен, З.Б.** Математическая модель оптимизации флота портовых буксиров / З.Б. Нгуен, Е.В. Маслюк // Изв. КГТУ. – Калининград. 2010. № 18. С. 233–240.

*Дата поступления
в редакцию 02.08.2011*

Zuy Back Nguyen

JUSTIFICATION OF PROJECT PERFORMANCE PORT TUGS FOR THE SOCIALIST REPUBLIC OF VIETNAM

The problems of modern port tugs for efficient and trouble-free manipulation of large vessels in the ports of Vietnam are considered.

Key words: ports, tugboats, cargo ships, manipulations operation, cargo throughput.

УДК 629.12.011.1(086.5).001.2

П.А. Бимбереков

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛЯХ СУДОВЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ С ПОВЫШЕННЫМ УРОВНЕМ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРИ МЕСТНЫХ НАГРУЗКАХ

ФБОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта», г. Новосибирск

Многочисленные наблюдения за повреждением судовых перекрытий натуральных конструкций показали, что завал несимметричных по отношению к стенке катаных профилей (подавляющая масса холостого судового набора) при воздействии местных нагрузок на подкрепляемую ими обшивку приводит к завалу профиля в сторону, противоположную полке. Это наблюдение привело к рассмотрению решения об установке холостого набора несимметричного сечения с предварительным наклоном в сторону полки, с целью компенсации будущего завала профиля в сторону, противоположную полке в ходе эксплуатации.

Ключевые слова: модели судовых перекрытий, предварительный наклон профиля, повышенная работоспособность.

Следует отметить, что допускаемые нормативы величин повреждений судовой обшивки и набора корпусов судов зачастую не согласованы между собой. Например, допуск на стрелку прогиба вмятины бортов судов, согласно требований Российского Речного Регистра, ограничен 150 мм, в тоже время и рамный и холостой судовой набор перекрытий при таких деформациях обшивки, как правило, обязательно выходит за назначенные ему нормативы деформаций. Поэтому получение конструкций с элементами, более согласующимися по достижению нормативно допускаемых значений деформаций, достаточно актуально. Реализацией такого подхода является установка холостых балок несимметричного профиля с предварительным наклоном в сторону полки, что и явилось основным предметом исследования настоящей работы.

На рис. 1 приведен вариант деформации ботового перекрытия баржи-площадки пр. №Р-56, из которого хорошо виден завал холостого набора несимметричного относительно их стенки профиля (сечением неравнополочный уголок) в сторону против полки.

Изначально автором изучалась на моделях, изготовленных согласно [1], работа холостых балок с нормальной постановкой профиля на обшивку с целью дополнительно удостовериться в зафиксированном на натуральных конструкциях завале профиля холостой балки несимметричного сечения в месте силового воздействия на подкрепляемую им обшивку в сторону, противоположную полке. Размеры профиля модели холостой балки $l \times b \times t = 65 \times 41 \times 0,52$ (высота \times ширина полки \times толщина, мм), установленного на обшивке толщиной $t_{об} = 0,25$ мм. Толщина присоединенного пояска обшивки шириной 20 мм в силу конструкции модели отличалась от толщины всего полотнища и составляла 0,77 мм. Силовое воздействие осуществлялось при помощи падающего груза, имеющего шарообразную ударную часть радиусом 50 мм и массой 3,7 кг. Груз крепился на магнитном штативе, установленном на стальном массивном плазе, на котором при помощи струбцин крепились и модели. Положение подвешенного груза над моделью проверялось при помощи отвеса.

Рассматривались два варианта – холостая балка с жестко заделанными концами и обшивкой по опорному контуру, а также с заделкой только обшивки по опорному контуру. Пример деформации модели первого из указанных вариантов, а также использованная схема регистрации завала профиля приведены на рис. 2 (некоторые данные указанного эксперимента приведены в [2, С. 264–267]).

Было установлено, что во всех случаях поперечного воздействия на обшивку в месте крепления стенки холостой балки у нее появляется составляющая деформации, направленная в сторону против полки.

С целью проверки предположения о возможности использования предварительного наклона профиля в сторону полки для лучшего согласования процесса накопления деформаций балками набора и обшивки перекрытия были изготовлены жестяные модели с балками из неравнобокого уголка с ранее указанными размерами. При этом с целью проверки влияния заделок концов балки, были изготовлены две серии по три модели. Первая из них с жесткой заделкой концов балки и обшивки, вторая вообще нигде не крепилась. Причем в первой из указанных серий из трех моделей силовой воздействие осуществлялось аналогично ранее описанному, при эксперименте с нормальной постановкой балок к обшивке, а во второй - тем же ударным инструментом, но с неконтролируемым усилием по подкинутой модели.

В каждой серии осуществлялся предварительный наклон в сторону полки трех значений, данные по которым сведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения предварительного наклона профиля в сторону полки

Номер	Значение наклона серии вида					
	С жесткой заделкой концов балки и обшивки			Без заделки		
	u , мм	β , град	u/h	u , мм	β , град	u/h
1	0,8	6,89	0,12	1,2	10,4	0,18
2	1,8	16,3	0,28	1,8	16,3	0,28
3	2,2	19,9	0,34	2,4	21,7	0,37

Примечание: u - величина отклонения стенки от нормального положения к обшивке; β - угол наклона стенки от нормали к обшивке; h - значение высоты балки.

а)



б)



Рис. 1. Вариант деформации бортового перекрытия баржи-площадки пр.№Р-56 с холостыми балками сечением из неравнополочного уголка (а) и схема поперечного сечения деформированной холостой балки (б): (--- проектное положение сечения)

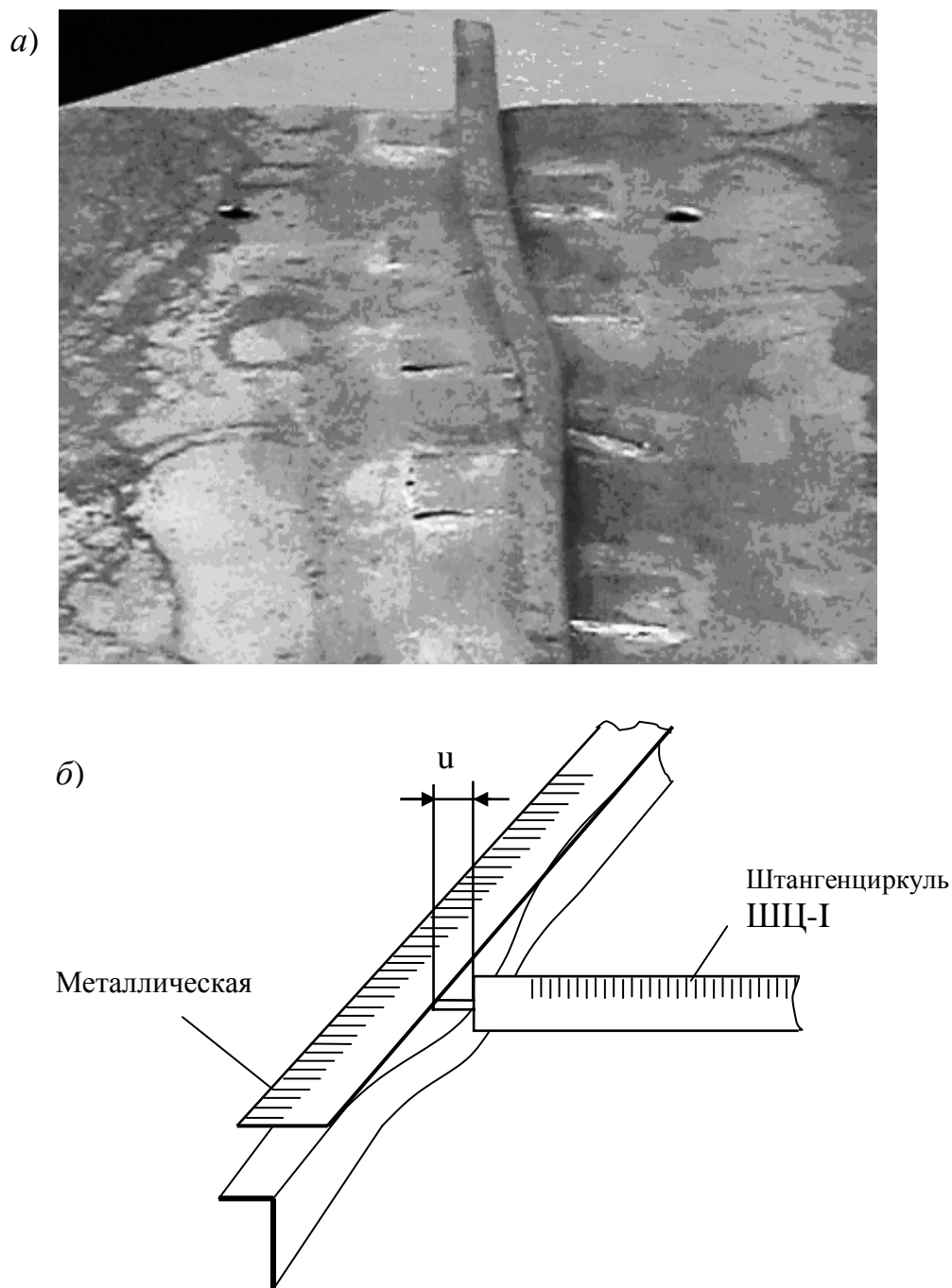


Рис. 2. Деформированная местным силовым воздействием модель холостой балки с нормальной постановкой на обшивку и схема обмера значений завала профиля в месте силового воздействия:

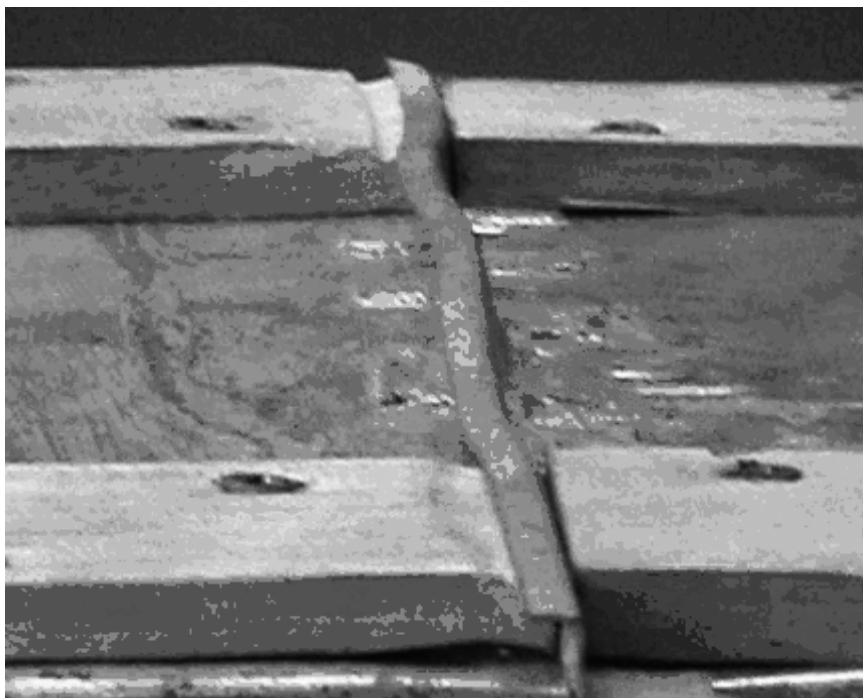
a – деформированная модель перекрытия с холостой балкой;
б – схема измерения завала у моделей холостых балок

Наклон профиля в случае жесткой заделки концов осуществлялся простукиванием уголка, предварительно установленного нормально к обшивке и заделанного жестко по краям. Наклон профиля до нужного значения в серии без заделки осуществлялся надавливанием через линейку сразу по всей длине с небольшой рихтовкой простукиванием.

В случае жестких заделок у моделей концов балок и обшивки в результате силового воздействия восстановление идет однозначно в сторону против полки (рис. 3, *a*). В случае балок без заделок значение результирующего наклона профиля складывалось из двух составляющих - в месте удара грузом с направлением в сторону против полки, и по всей балке в сторо-

ну полки. То есть в последнем случае полного отсутствия заделок перекрытия в месте зоны сосредоточенного силового воздействия есть составляющая восстановления предварительно заваленного профиля.

а)



б)

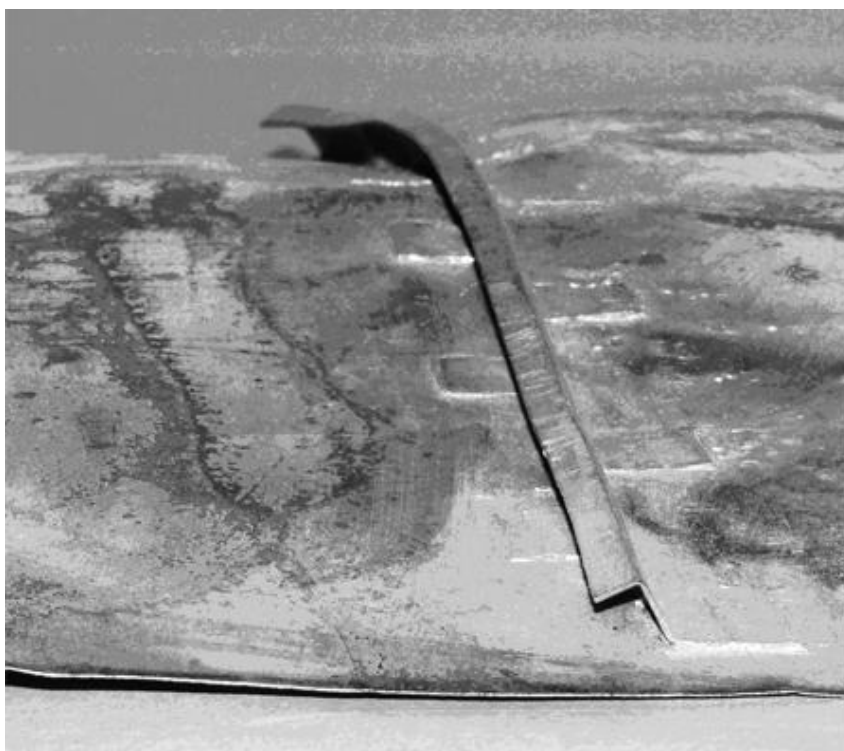


Рис. 3. Деформированные модели с предварительным наклоном балок в сторону полки:

а – вариант деформации модели с жесткой заделкой;
б – вариант деформации модели без заделки

На рис. 3, б приведен пример деформации модели балки без заделок с предварительным завалом профиля $u = 2,4$ мм, где хорошо видно наличие в зоне контактного воздействия участка с восстановлением профиля в сторону против полки в месте силового воздействия. Причем в данном конкретном случае значение завала профиля в сторону полки после удара сохранило свое исходное значение, в то время как завал профиля концов балки увеличился (рис. 3).

На основе результатов данного эксперимента автором предложены следующие конструкции перекрытий с повышенным уровнем работоспособности при местных нагрузках (рис. 4-6) [3]. Формирование таких перекрытий предусматривается производить путем постановки холостого набора неравнобокого (несимметричного) профиля под некоторым углом к обшивке, в сторону полки профиля. Кроме этого, холостой набор может быть изогнут в сторону полки профиля по синусоиде между рамными связями. Судовое перекрытие формируется из предварительно изогнутого на специальном оборудовании путем силовых или термических воздействий или их комбинаций и/или получается прокаткой, а уже после устанавливается и жестко крепится (например, приваркой или формуется) к полотнищу обшивки. Иначе наклон профиля создается после установки и жесткого крепления профиля (например, приваркой или формуется) на полотнище путем воздействий: силового, термического, вспомогательными разрезами, сваркой, формовкой или их комбинациями.

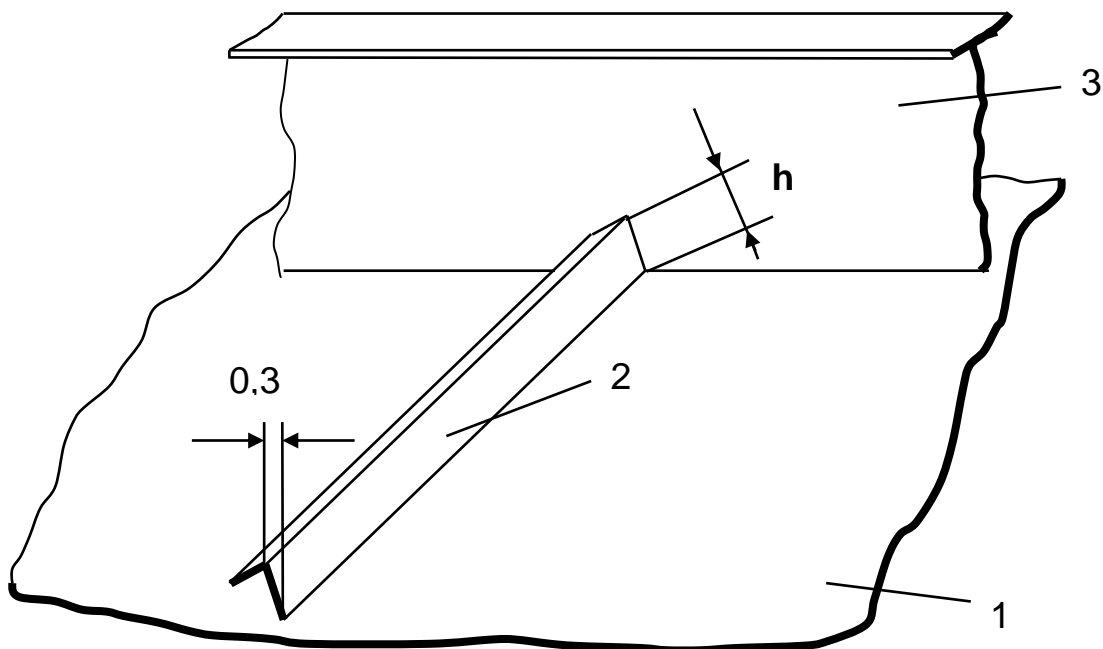


Рис. 4. Вариант предлагаемого перекрытия с предварительным наклоном холостой балки в сторону полки:

1 – обшивка; 2 – холостая балка несимметричного профиля, поставленная с наклоном в сторону полки; 3 – балка рамного набора, служащая опорой для холостой балки

Судовое перекрытие работает следующим образом. В результате силового эксплуатационного воздействия в пределах пролета холостой балки, имеющей наклон в сторону своей полки, она получает прогиб и изменяет наклон к обшивке в сторону, противоположную полке. Этим достигается увеличение как момента инерции, так соответственно и момента сопротивления сечения профиля холостой балки вплоть до начала завала профиля в сторону против полки. Таким образом, указанная конструкция балки с предварительным завалом профиля в сторону полки может выдерживать большее воздействие или число воздействий до получения перекрытием недопустимых нормативами повреждений.

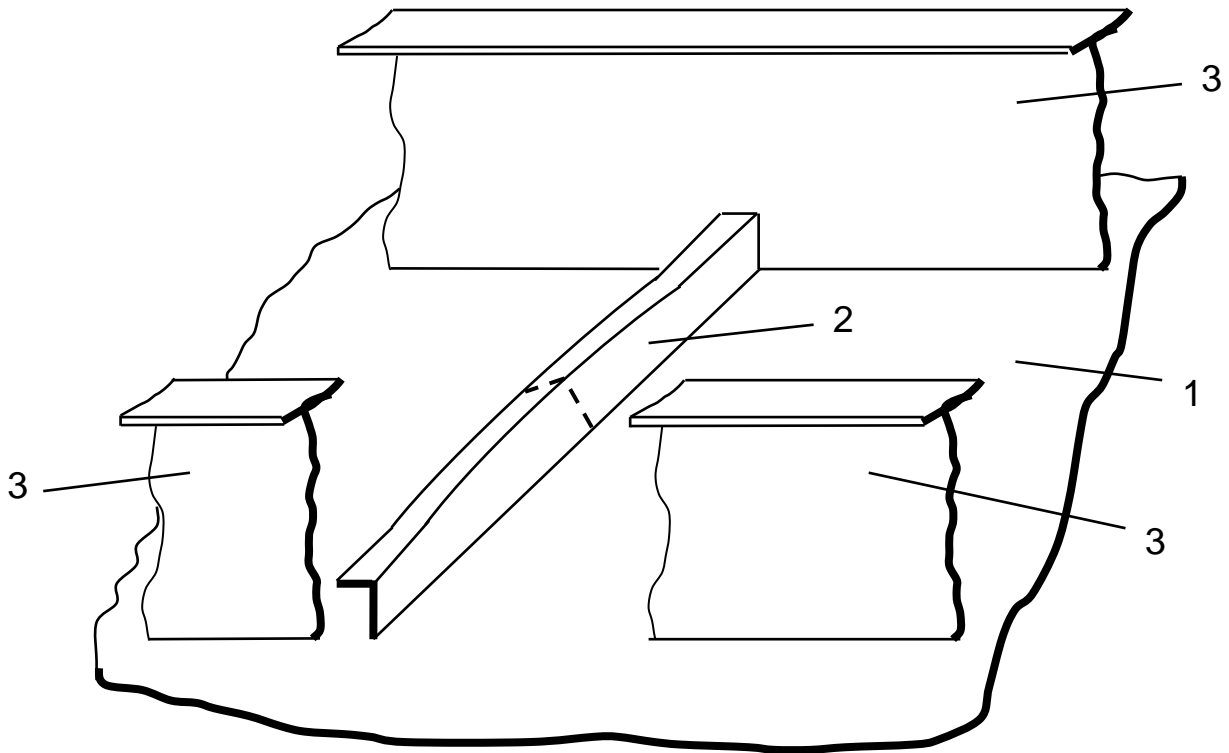


Рис. 5. Вариант предлагаемого перекрытия с предварительным наклоном холостой балки в сторону полки, получаемого путем силового воздействия после установки и крепления балки нормально к обшивке

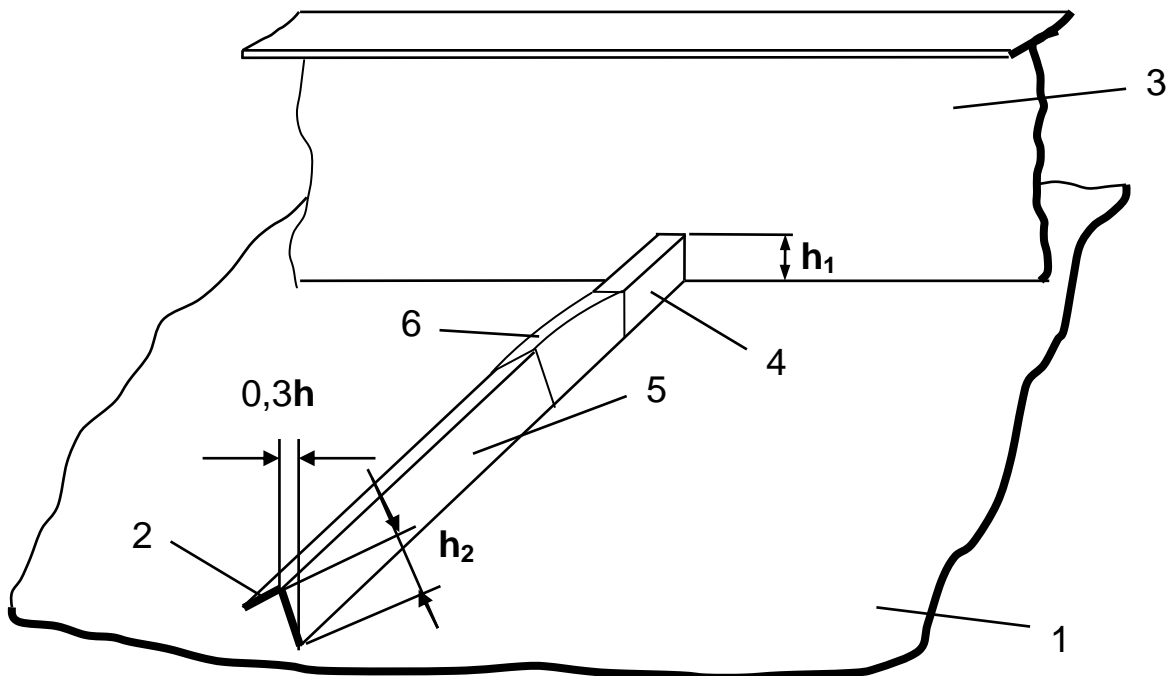


Рис. 6. Вариант формирования балки с предварительным завалом в сторону полки из составных элементов (участков):

h_1, h_2 — значение высоты участка холостой балки у опоры и в пролете соответственно

В случае изготовления холостого набора из частей, предварительно на обшивку устанавливаются участки 4 (нормально) и 5 (с нужным наклоном), а затем переходные участки б, после чего вся конструкция жестко соединяется между собой. При необходимости нужный наклон набора по длине пролета холостой балки может быть получен дополнительными воздействиями: силовым, термическим, вспомогательными разрезами, сваркой, наплавкой, формованием или их комбинациями. Переходные участки б могут быть загнуты до стыковки с участком 5 после установки и крепления к обшивке и концевым участкам 4 и последующим креплением к участку 5 воздействиями: силовым, термическим, вспомогательными разрезами, сваркой, наплавкой, формованием или их комбинациями.

Выводы

1. В результате работы подтверждено для балки неравнобокого уголкового профиля, имеющей предварительный наклон в сторону полки предположение о наличии тенденции восстановления нормального положения относительно обшивки в зоне воздействия местной нагрузки.

2. Установка холостого набора с предварительным завалом в сторону полки позволит получить конструкцию судового перекрытия, более согласованную по работоспособности при деформациях от местных нагрузок.

Библиографический список

1. **Бимбереков, П.А.** Образцы для модельных испытаний конструкций / П.А. Бимбереков. Пат. РФ на полезную модель №31650, 2003.
2. **Бимбереков, П.А.** Исследование повреждаемости, методики освидетельствования и дефектации корпусных конструкций судов внутреннего и смешанного плавания / П.А. Бимбереков. – Новосибирск: НГАВТ, 2007. – 420 с.
3. **Бимбереков, П.А.** Судовое перекрытие и способ его формирования / П.А. Бимбереков. Пат. №2267435, РФ. 2007.

*Дата поступления
в редакцию 28.07.2011*

P.A. Bimberekov

MODELLING OF SHIP FLOORS WITH INCREASED LEVEL OF WORKING CAPACITY WITH LOCAL LOADS

Numerous observations over ship floors of full-scale constructions damage showed that fall on hull plating of asymmetric relatively it rolled shapes (inhibiting mass of idle framing) results in shape fall on hull plating to side counter to rack under influence of local loads on plating being strengthened by rolled shapes. This observation resulted in consideration of decision about installation of idle framing of asymmetric cross-section with preliminary inclination to the side of rack during operating conditions.

Key words: ship floors, preliminary inclination of shape, increased working capacity.

УДК 629.124

В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы создания новой физической модели ледяного покрова для имитации модельных исследований взаимодействия судов со льдом.

Ключевые слова: ледовые условия, сопротивление, битые льды, судно, физико-механические характеристики.

Сложность процессов взаимодействия судов и сооружений со льдом далеко не всегда позволяет составить достоверную математическую модель такого взаимодействия. В то же время необходимость получения данных о ледовых качествах судов еще в процессе проектирования заставляет обращаться к экспериментальным методам исследования. Сейчас в мире насчитывается более десяти работающих ледовых бассейнов, в которых проводятся испытания судов в сплошных, битых и торосистых льдах, моделируется работа буровых установок и мостовых опор в ледовых условиях, исследуются различные устройства и системы, повышающие эффективность проведения операций во льдах.

Основной проблемой моделирования ледового сопротивления является создание физически адекватной модели льда. Теоретические основы моделирования движения судна во льдах были разработаны Ю.А. Шиманским и Л.М. Ногидом. Согласно этой теории, основными критериями подобия являются:

$$Fr=idem, Re=idem, Ch=idem, p_{л}/p_{в}=idem, f_{н}=f_{м}, \mu_{н}=\mu_{м}, \sigma/E=idem, h_{н}/h_{м}=\sigma_{н}/\sigma_{м}=\lambda,$$

где Fr , Re , Ch - числа Фруда, Рейнольдса и Коши; $\rho_{л}$, $\rho_{в}$ - плотности льда и воды; $f_{н}$, $f_{м}$ - коэффициенты трения природы и модели; $h_{н}$, $h_{м}$ - толщины льда природы и модели; σ , E - напряжения и модуль упругости; λ - геометрический масштаб моделирования.

Кроме того, реологическая модель и механизм разрушения льда у модели льда должны быть одинаковыми с натурой. Дополнительный критерий с учетом трещинообразования был введен Аткинсом

$$Jn = Ch^2 \left(\frac{EL}{k} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где Jn - ледовое число; L - характерная длина дефектов в ледяном покрове; k - вязкость разрушения.

При моделировании движения в битом льду требования к материалу модели ослабляются и непосредственно вытекают из перечисленных.

Моделируя сплошной ледяной покров, стремятся получить материал с заданными механическими характеристиками, часть которых должна управляться в зависимости от масштаба модели.

Полное сопротивление среды при движении судна во льдах обычно представляют в виде

$$R = R_p + R_{обл} + R_{в}, \quad (2)$$

где R_p - сопротивление от разрушения льда; $R_{обл}$ - сопротивление обломков; $R_{в}$ - сопротивление воды.

Различная природа составляющих сил ледового сопротивления, подчиняющихся разным законам, требует при моделировании одновременного выполнения перечисленных кри-

териев подобия. Трудности такого подхода общеизвестны. Поэтому во всем мире продолжается поиск новых материалов для имитации ледовых условий, технологии испытаний и способов пересчета результатов на натуру.

Казалось бы, таким образом, материал мог бы быть тонкий естественный лед, однако его высокая прочность по сравнению с требуемой $\sigma_m = \sigma_n / \lambda$, при сохранении геометрического подобия по толщине $h_m = h_n / \lambda$, делали его малоприспособным. Различные способы ослабления прочности часто приводили к тому, что лед становился более пластичным, чем упругим, нарушалось соотношение $\sigma/E = \text{idem}$ и связанная с этим геометрия ломки льда, а следовательно, и динамическое подобие.

Однако выход при частичном подобии и раздельном моделировании при определении сопротивления разрушения и обломков может быть найден. Задача формулируется так: для заданной модели ледяного покрова получить способ пересчета результатов на натуру. Для получения дополнительных критериев подобия воспользуемся уравнением, описывающим НДС ледяного покрова, приведенным к безразмерному виду

$$\frac{D}{\rho g L^4} \bar{w} + \frac{\rho_l h}{\rho_b g T^2} \bar{w} + \bar{w} = 0, \quad (3)$$

где \bar{w} - безразмерный прогиб; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ - цилиндрическая жесткость; L - характерный линейный размер; T - характерный промежуток времени.

В тех случаях, когда инерционными составляющими сопротивления можно пренебречь и, учитывая, что $\rho_{в м} = \rho_{в н}$, $g_m = g_n$, получим

$$\lambda_h = \frac{h_n}{h_m} = \lambda^{3/4} \left(\frac{E_m}{E_n} \right)^{1/3} = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3}, \quad (5)$$

где $\lambda_E = \frac{E_n}{E_m}$.

Естественный лед имеет повышенную прочность по сравнению с требуемой строгой теорией моделирования, поэтому, очевидно, и получило распространенное мнение о невозможности его использования. При использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность льда $\sigma_{н м}$ можно меньшей толщиной, чем требуется (4). Моделируется только разрушение.

На возможность такого подхода указывал еще Л.М. Ногид, в конце 50-х годов прошлого столетия этот способ использовался в Гамбургском опытовом бассейне, причем пересчет сил велся по кубу линейного масштаба, а толщина льда выбиралась кратной величине $\lambda^{3/2}$.

Необходимо отметить, что естественный лед является по существу единственной моделью для полунатурных испытаний, к которым нередко приходится прибегать, и к пересчету их результатов можно применить также предложенный здесь способ.

Поскольку одновременное моделирование всех составляющих при движении моделей в тонком естественном льду невозможно, выход был найден в раздельном моделировании и соответствующем пересчете результатов на натуру составляющих разрушения и сопротивления обломков. Способ пересчета в некоторой степени аналогичен методике пересчета испытаний на чистой воде, когда сопротивление трения рассчитывают, а остаточное пересчитывают в соответствии с законом подобия Фруда.

Сопротивление воды может быть определено традиционным способом при испытаниях в чистой воде. Однако в этом, как правило, нет необходимости ввиду малости этой величины, поэтому его можно определить совместно с $R_{обл}$ и пересчитать на натуру по кубу масштаба.

Для проверки возможности такого моделирования в ледовом бассейне НГТУ были проведены испытания четырех моделей речного ледокола Р-47, представляющих масштабную серию.

Кроме этого, испытывалась модель ледокола "Капитан Чечкин" в масштабе 1:50 и некоторые другие. Результаты испытаний показали удовлетворительную сходимость с натурными данными. Пересчет сопротивления для масштабной серии ледокола Р-47 не выявил заметного масштабного эффекта.

Визуальные наблюдения, а также результаты анализа кино- и фотосъемок показали, что геометрические размеры льдинок и их форма, а также процесс взаимодействия со льдом близок к наблюдаемому в натуральных условиях.

Испытания такого рода не лишены и недостатков. В частности, не выполняется соответствие между силами упругости и тяжести ледяного покрова. Последнее обстоятельство не позволяет, например, пересчитать результаты испытаний во льду СВП. Не просто обеспечить выполнение условия $f=idem$.

Приведенный способ моделирования не противопоставляется более строгому, основанному на подборе материала модели льда. Однако он позволяет расширить объемы исследований, применяя недорогое оборудование, простую технологию и повышая производительность.

Поиски моделей ледяного покрова, более полно удовлетворяющих условиям подобия и обладающих высокой технологичностью и производительностью, привели к созданию новой модели льда композитной конструкции.

Предложены две основные схемы ледяного покрова композитной конструкции. В первой применяются гранулы, диаметр которых соответствует толщине модели льда (рис.1). Причем $d_m = h_m = h_n / \lambda$. Изменяя толщину замерзшего слоя воды h_1 , можно изменять приведенную прочность от нуля до прочности льда заданной толщины и масштаба.

Во второй схеме применяются более мелкие гранулы, промораживаемые на всю толщину нанесенного слоя. При этом толщина модельного льда h_m определяется толщиной слоя частиц, а предел прочности на изгиб σ_m и модуль упругости E_m практически не зависят от толщины модельного льда. При этом приведенная прочность моделированного льда снижается за счет уменьшения эффективного поперечного сечения естественного льда, находящегося в виде прослоек "сотовой" конструкции и слабой адгезии полиэтилена со льдом.

Используя (4), запишем

$$\frac{E_n h_n^3}{E_m^* h_m^3} = \lambda^4, \quad (6)$$

где E_m^* - приведенный модуль упругости льда композитной конструкции.

Как показали опыты, функциональная зависимость $E^*(h)$ остается с точностью до постоянной той же, что и для естественного льда $E(h)$. Модуль пересчета можно представить так:

$$\lambda_E^* = \frac{E_n}{E_m^*} = a \frac{E_n}{E_m} = a \lambda_E, \quad (7)$$

где a – коэффициент, численное значение которого можно принимать равным 2,9.

В этом случае модуль пересчета толщин льда из (6):

$$\lambda_h = \lambda^3 \lambda_E^{*-1} = \lambda^3 \lambda_E^{-1} a^{-1} = 0,70 \lambda^3 \lambda_E^3, \quad (8)$$

причем λ_E можно определить экспериментально.

Технология проведения испытаний моделей во льду композитной конструкции и способов пересчета результатов на натуре следующие:

- поверхность воды в бассейне покрывается слоем (или несколькими слоями) гранул полиэтилена, после чего происходит промораживание части слоя на некоторую величину h_{1m} .

- модель буксируется во льду; при постоянной тяге ($Pe_M = \text{const}$) при этом определяется скорость модели v_M и толщина льда.

После проведения серии испытаний при $Pe_M = \text{const}$ строятся диаграммы ледопроницаемости модели $v_M = f(h_M)$ при $Pe_M = \text{const}$, которые затем перестраиваются к виду $R_M = f(v_M)$ при $h_M = \text{const}$.

При этом имеется в виду, что прочностные свойства льда соответствуют моделированию по толщине замороженного слоя h_{1M} , а гравитационные и инерционные общей толщине слоя $h_M = h_H/\lambda$. Полученные результаты пересчитываются на натуру следующим образом

$$\left. \begin{aligned} h_H &= h_M \lambda = 0,70 \lambda^{\frac{4}{3}} \lambda_E^{\frac{-1}{3}} h_1 \approx 0,70 \lambda^{\frac{2}{3}} h_1; \\ R_H &= \lambda^3 R_M; \\ v_H &= v_M \sqrt{\lambda}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Модельный лед композитной конструкции со стабильными характеристиками легко приготовить в открытых опытовых бассейнах в зимнее время, причем значительные колебания температуры воздуха практически не оказывают влияния на адгезионные свойства полиэтилена и влияют лишь на скорость роста льда. Производительность работ при проведении опытов значительно возрастает (например, при $t_{\text{возд}} = -10^0$, цикл проведения опыта в бассейне составляет 1,0–1,5 ч), т.е. выше в несколько раз по сравнению с известными.

К положительным эффектам новой технологии является и то, что диаграммы разрушения льда композитного и естественного реальных толщин близки, что приводит к большому соответствию работ разрушения и геометрии обломков льда в натуральных и модельных условиях. Заметим, что немаловажным является и обеспечение условия $f = \text{idem}$, поскольку $f_M = 0,19-0,25$. Обобщенные данные МКОБ по натурным измерениям коэффициента трения льда о судно составляют $0,3 \pm 0,07$ при $v \rightarrow 0$ и $0,10 \pm 0,12$ при реальных скоростях движения.

Сопоставление результатов модельных испытаний ледоколов пр. Р-47, 1105 и др. с натурными данными вполне удовлетворительное.

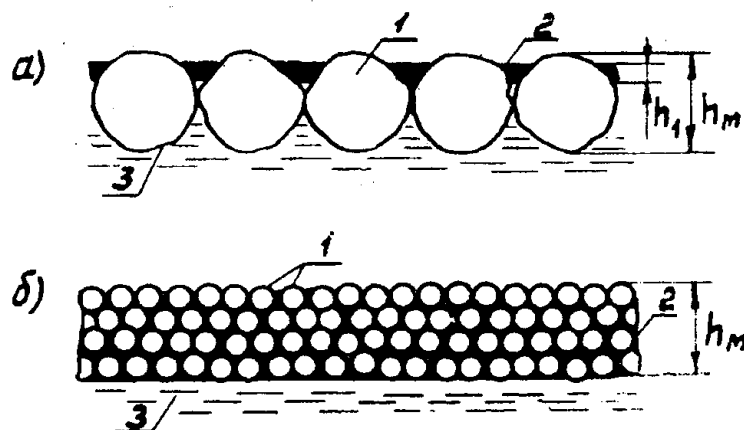


Рис. 1 Схемы ледяного покрова композитной конструкции:
 а – гранулы «большого» диаметра; б – мелкие гранулы;
 1 – гранулы полиэтилена; 2 – естественный лед; 3 – вода

Как и в естественном льду, во льду композитной конструкции были проведены испытания модели R - класса, а результаты сравнения с данными других бассейнов и с натурными показаны на рис. 2 и рис. 3.

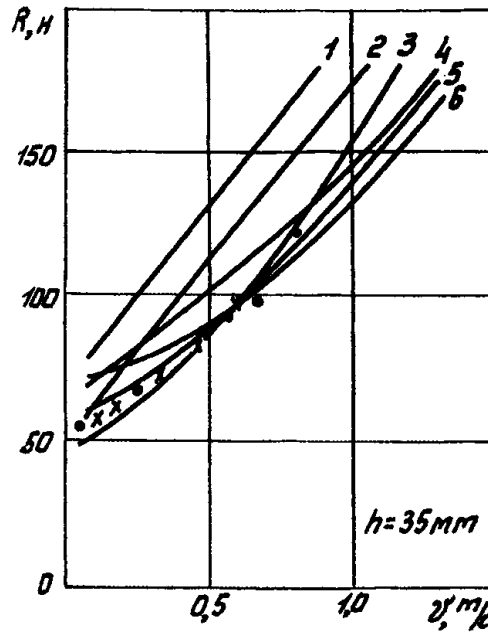


Рис. 2. Сопротивление модели R-класса в бассейнах:
 1 – WARS; 2 – IMD; 3 – NSVA; 4 – JSRI; 5 – CRREL; 6 – NKK; • – в бассейне (естественный лед); x – в бассейне (композитный лед)

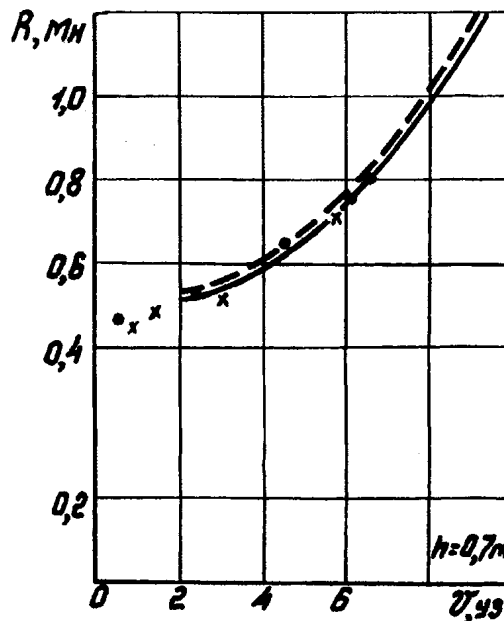


Рис. 3. Сопротивление ледокола R-класса во льду по данным натурных испытаний и по пересчету испытаний модели в бассейне НГТУ:
 • – естественный лед; x – композитный лед

Результаты сопоставления подтверждают возможность описанного подхода к моделированию взаимодействия судов со льдом.

При испытаниях моделей судов в битых льдах в настоящее время используются обычные (не ледовые) опытовые бассейны, наполненные пресной водой. Как показали наши исследования, наиболее подходящим материалом для имитации битого льда, получившим распространение в большинстве опытовых бассейнов в настоящее время является полиэтилен высокого давления. Плотность этого материала $0,92 \text{ т/м}^3$. Таким образом, плотность во-

ды и льда с большой точностью соответствуют льду пресных водоемов. Для морского льда необходимо вводить коррективы. Во-первых, морская вода имеет большую плотность, а во-вторых, морской лед – меньшую плотность. Огромное противоречие прогнозов ледового сопротивления, по нашему мнению, является результатом игнорирования этих фактов. При этом нетрудно заметить, что составляющие прямого и скоростного сопротивления подлежат непосредственному экспериментальному разделению. Этот факт позволяет ввести коррективы в схему пересчета ледового сопротивления с учетом фактических плотностей воды и льда.

При плотности морской воды $1,025 \text{ т/м}^3$, морского льда $0,89 \text{ т/м}^3$, пресноводных воды и льда соответственно $1,000 \text{ т/м}^3$ и $0,92 \text{ т/м}^3$, эта разница равна $0,175 \text{ т/м}^3$ для воды и $0,080 \text{ т/м}^3$ для льда. То есть прямое сопротивление при пересчете на морской лед необходимо увеличивать в 1,7 раза.

Скоростное сопротивление, разделяемое на инерционное и гидродинамическое, не позволяет экспериментальное разделение. Инерционное сопротивление пропорционально плотности льда, а гидродинамическое – плотности воды. Учитывая большую определенность плотности воды, по аналогии с гипотезой Фруда для остаточного сопротивления, будем полагать (до получения проверенных данных) скоростное сопротивление пропорциональным сопротивлению воды.

Это обстоятельство необходимо учитывать при пересчете ледового сопротивления судов, плавающих в соленой воде при испытаниях модели в пресной воде. Как показали наши эксперименты, не учет этого обстоятельства может привести к результатам, отличающимся на 25-30%.

В этом случае прямое (при $v \rightarrow 0$) ледовое сопротивление можно пересчитать следующим образом:

$$R_{\text{пр}}^{\text{н}} = R_{\text{пр}}^{\text{м}} \left(\frac{\rho^{\text{с}} - \rho_{\text{л}}^{\text{с}}}{\rho^{\text{п}} - \rho_{\text{л}}^{\text{п}}} \right) \lambda^3, \quad (10)$$

скоростная составляющая

$$R_{\text{ск}}^{\text{н}} = R_{\text{ск}}^{\text{м}} \frac{\rho^{\text{с}}}{\rho^{\text{п}}} \lambda^3, \quad (11)$$

где $\rho^{\text{с}}$, $\rho_{\text{л}}^{\text{с}}$ – плотность соленой воды и льда; $\rho^{\text{п}}$, $\rho_{\text{л}}^{\text{п}}$ – плотность пресной воды и льда.

Библиографический список

1. **Каштелян В.И.** Сопротивление льда движению судна / В.И. Каштелян, И.И. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968. – 238 с.
2. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
3. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.

Дата поступления
в редакцию 02.08.2011

V.A. Zuev, E.M. Gramuzov, D.A. Semenov

MODELING OF SHIP ICE RESISTANCE

The questions of creation of new physical model of ice cover for imitation model research of interaction of courts with ice are considered.

Key words: ice conditions, resistance, broken ice, vessel, physical and mechanical characteristics.

УДК 532.59:629.12

С.А. Химич, Ю.Ф. Орлов

ДВИЖЕНИЕ НАД ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА ДВУХ СРЕД КРЫЛА КОНЕЧНОГО РАЗМАХА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена задача о генерации поверхностных волн при движении над поверхностью раздела жидкостей с различной плотностью на малой высоте крыла конечного размаха в квадрупольном приближении. При этом двумерное сингулярное интегральное уравнение теории крыла вырождается в краевую задачу для уравнения Пуассона для определения плотности двойного слоя, распределённого по поверхности крыла. Эта задача решалась численно. Рассмотрен пример движения плоского крыла, имеющего размеры реального экраноплана.

Ключевые слова: граница раздела, крыло экраноплана, квадрупольная теория крыла, волны под крылом.

Задачи о движении крыла экраноплана интенсивно исследовались в 60-х годах прошлого века [1]. Первые решения задач методом функциональных параметров получены А.Н. Панченковым [1, 2]. Позже им же создана квадрупольная теория крыла вблизи экрана [3], которая конструктивно использует малость отстояния крыла от экрана, позволяющую перейти от моделирования несущей поверхности слоем диполей к слою квадрупольей, распределённых на экране под крылом. Это вырождение дает возможность перейти от сингулярного интегрального уравнения к дифференциальному соотношению в плоских потоках и к уравнению Пуассона для области течения под крылом в пространственном случае. Для задач со свободной поверхностью первые такие алгоритмы построены в [4, 5]. Обширный круг задач по рассматриваемой теме представлен также в монографии М.А. Басина и В.П. Шадрина [6].

Рассмотрим задачу о волнах при движении на малой высоте над поверхностью раздела жидкостей с различной плотностью крыла конечного размаха. Пусть малоискривленное крыло S движется с постоянной скоростью V_0 на малой высоте h над границей раздела Γ двух жидкостей различных плотностей, ρ_1 - плотность верхней жидкости, ρ_2 - плотность нижней жидкости. Введем систему координат, связанную с крылом, S_p - проекция поверхности крыла S на координатную плоскость xu , S_p^0 - проекция поверхности S на границу раздела жидкостей (рис. 1).

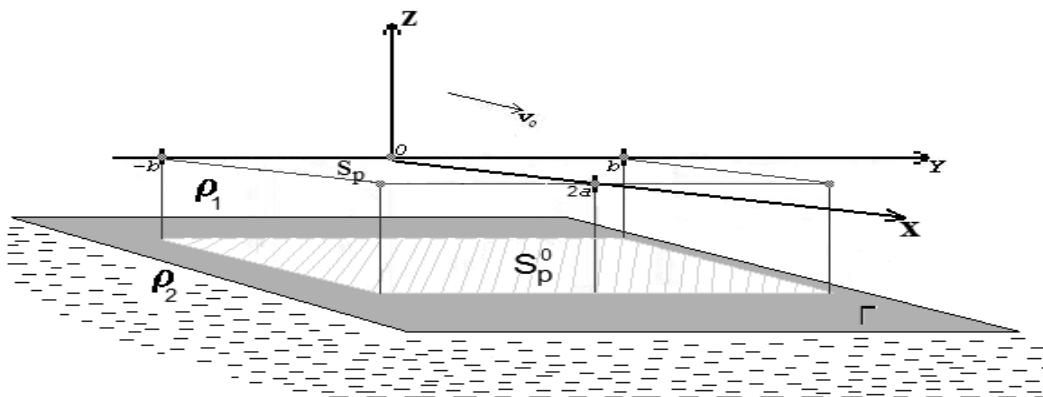


Рис. 1. Выбор системы координат

Основное двумерное сингулярное интегральное уравнение линейной задачи о движении крыла вблизи границы раздела жидкостей имеет вид [1, 2, 3, 4]

$$N_o A_z \gamma = F(q), \quad (1)$$

где $N_o = -\int_{-\infty}^x [\] d\tau$; $A_z \gamma = \frac{1}{4\pi} \int_{S_p} \gamma(p) \frac{\partial^2 G_1(p, q)}{\partial z \partial \zeta} ds$; $p = (\xi, \eta, \zeta) \in S_p$; $q = (x, y, z) \in S_p$; $\gamma(p)$ -

плотность двойного слоя на поверхности S_p ; $F(q)$ - проекция на нормаль к S скорости набегающего потока жидкости; $G_1(p, q)$ - фундаментальное решение уравнения Лапласа.

Введем параметр относительной плотности $\bar{\rho} = \rho_1 / \rho_2 \ll 1$, который предполагается малой величиной, функции потенциала ускорений $\theta_1(x, y, z)$ - для верхней жидкости, $\theta_2(x, y, z)$ - для нижней жидкости. Линеаризованное граничное условие на поверхности раздела Γ жидкостей имеет вид

$$\bar{\rho} (\theta_{1xx} - \mu \theta_{1x} + \nu \theta_{1z}) - \theta_{2xx} + \mu \theta_{2x} - \nu \theta_{2z} = 0, \quad (2)$$

где $\nu = \frac{g}{V_0^2}$, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ - ускорение свободного падения; μ - коэффициент диссипативных сил. По условию (2) фундаментальные структуры определяются в виде [3]:

$$G_1(p, q) = \frac{1}{R(p, q)} + \frac{1}{R_1(p, q)} + G_{11}(p, q) + G_{12}(p, q), \quad (3)$$

$$G_2(p, q) = G_{21}(p, q) + G_{22}(p, q), \quad (4)$$

где $G_1(p, q)$, $G_2(p, q)$ - потенциалы единичного источника, движущегося в верхней жидкости.

$$\begin{aligned} G_{11}(p, q) &= \text{Re} i \bar{v} \bar{a} \cdot (1 - \bar{a}) \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp \left[\frac{v \bar{a}}{\cos^2 \theta} (-(z + \zeta + 2h) + i\omega) \right] \cdot \sec^2 \theta d\theta, \\ G_{12}(p, q) &= -\text{Re} \frac{(1 - \bar{a})}{2\pi} \cdot V \cdot p \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\infty \frac{\exp [r (-(z + \zeta + 2h) + i\omega)] r \cos^2 \theta}{r \cos^2 \theta - va} dr d\theta, \\ G_{21}(p, q) &= -\text{Re} i \bar{v} \bar{a} \cdot (1 - \bar{a}) \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \exp \left[\frac{v \bar{a}}{\cos^2 \theta} (z - \zeta - 2h + i\omega) \right] \cdot \sec^2 \theta d\theta, \\ G_{22}(p, q) &= \text{Re} \frac{(1 - \bar{a})}{2\pi} \cdot V \cdot p \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^\infty \frac{\exp [r (z - \zeta - 2h + i\omega)] r \cos^2 \theta}{r \cos^2 \theta - va} dr d\theta, \quad (5) \\ R(p, q) &= \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}, \\ R_1(p, q) &= \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + \zeta + 2h)^2}, \\ \bar{a} &= \frac{1 - \bar{\rho}}{1 + \bar{\rho}}; \quad \omega = (x - \xi) \cos \theta + (y - \eta) \sin \theta. \end{aligned}$$

Поставленная задача будет решена, если будет решено уравнение (1) с ядром (3), (5). В [2] впервые получено решение (1) методом функциональных параметров. В [4] близкое к (1) уравнение о движении тела по поверхности тяжелой жидкости после асимптотического анализа структур типа (5) сведено к двумерному уравнению сингулярному по поперечной координате и уравнению с периодическим ядром по продольной координате. Получено решение первого приближения по шкале va . Существенного упрощения расчетов можно добиться используя квадрупольные вырождения фундаментальных структур (3) [3].

Поскольку (3) – гармонические функции, которые вместе со всеми своими производными равномерно непрерывны всюду в трехмерном евклидовом пространстве, исключая точки (ξ, η, ζ) и $(\xi, \eta, -\zeta - 2h)$, то их разложения в ряды Тейлора относительно точек

$p_0 = (\xi, \eta, -h)$, лежащих на границе раздела, - равномерно сходящиеся ряды. Выполнив необходимые вычисления, получим:

$$\frac{\partial G_1(p, q)}{\partial \zeta} = \frac{\partial G_1(p_0, q)}{\partial \zeta} + (z+h) \frac{\partial^2 G_1(p_0, q)}{\partial \zeta^2} + (z+h)^2 \frac{\partial^3 G_1(p_0, q)}{\partial \zeta^3 \cdot 2!} + \dots, \quad (6)$$

где $\frac{\partial G_1(p_0, q)}{\partial \zeta} = \frac{\partial G_{11}(p_0, q)}{\partial \zeta} + \frac{\partial G_{12}(p_0, q)}{\partial \zeta}$,

$$\frac{\partial^2 G_1(p_0, q)}{\partial \zeta^2} = 2 \frac{\partial^2 (1/r_0)}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 G_{11}(p_0, q)}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 G_{12}(p_0, q)}{\partial \zeta^2}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^3 G_1(p_0, q)}{\partial \zeta^3} = 2 \frac{\partial^3 (1/r_0)}{\partial \zeta^3} + \frac{\partial^3 G_{11}(p_0, q)}{\partial \zeta^3} + \frac{\partial^3 G_{12}(p_0, q)}{\partial \zeta^3}.$$

$$r_0 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+h)^2}.$$

Будем использовать асимптотическую квадрупольную теорию крыла, которая основана на аппроксимации фундаментальной структуры двумя членами ряда (6) [3, 4, 5]. С учетом (7) получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_1(p, q)}{\partial \zeta} &= \frac{\partial G_{11}(p_0, q)}{\partial \zeta} + \frac{\partial G_{12}(p_0, q)}{\partial \zeta} + 2(z+h) \frac{\partial^2 (1/r_0)}{\partial \zeta^2} + \\ &+ (z+h) \frac{\partial^2 [G_{11}(p_0, q) + G_{12}(p_0, q)]}{\partial \zeta^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Это выражение можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial G_1(p, q)}{\partial \zeta} &= \partial^2 \left[\int_{\zeta}^{\xi} G_{11}(p_0, q) d\zeta + \int_{\zeta}^{\xi} G_{12}(p_0, q) d\zeta + 2(z+h)/r_0 + \right. \\ &\left. + (z+h)(G_{11}(p_0, q) + G_{12}(p_0, q)) \right] / \partial \zeta^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем безразмерные величины соотношениями: $x = \bar{x}a$, $y = \bar{y}b$, $z = \bar{z}a$, $\lambda = b/a$,

$$\xi = \bar{\xi}a, \eta = \bar{\eta}b, \zeta = \bar{\zeta}a, r = \frac{\bar{r}}{a}, G_1 = \frac{\bar{G}_1}{a}, G_2 = \frac{\bar{G}_2}{a}, \gamma = 2\lambda\bar{\gamma}, h = 2a\bar{h}, \omega_0 = va = \frac{1}{2Fr^2},$$

где $Fr = \frac{V_0}{\sqrt{2a g}}$ - число Фруда, $2a$ - хорда, $2b$ - размах, λ - относительное удлинение крыла.

Выделив реальную часть в выражениях (5), получим (черточки над безразмерными координатами далее опущены):

$$\bar{G}_{11}(p, q) = -\omega_0 \bar{a} \cdot (1-\bar{a}) \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\exp\left[\frac{-\omega_0 \bar{a}}{\cos^2 \theta} \cdot (z + \zeta + 4\bar{h})\right]}{\cos^2 \theta} \cdot \sin\left(\frac{\omega_0 \bar{a} \bar{\omega}}{\cos^2 \theta}\right) d\theta,$$

$$\bar{G}_{12}(p, q) = -\frac{1-\bar{a}}{2\pi} \cdot V \cdot p \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{r \cos^2 \theta \cdot \exp[-r \cdot (z + \zeta + 4\bar{h})]}{r \cos^2 \theta - \omega_0 \bar{a}} \cdot \cos(r\bar{\omega}) dr d\theta,$$

$$\bar{G}_{21}(p, q) = \omega_0 \bar{a} \cdot (1-\bar{a}) \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\exp\left[\frac{\omega_0 \bar{a}}{\cos^2 \theta} \cdot (z - \zeta - 4\bar{h})\right]}{\cos^2 \theta} \cdot \sin\left(\frac{\omega_0 \bar{a} \bar{\omega}}{\cos^2 \theta}\right) d\theta,$$

$$\bar{G}_{22}(p, q) = \frac{1-\bar{a}}{2\pi} \cdot V \cdot p \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{r \cos^2 \theta \cdot \exp[r \cdot (z - \zeta - 4\bar{h})]}{r \cos^2 \theta - \omega_0 \bar{a}} \cdot \cos(r\bar{\omega}) dr d\theta,$$

где $\bar{a} = \frac{1-\bar{\rho}}{1+\bar{\rho}}$, $\bar{\omega} = (x-\xi)\cos\theta + \lambda(y-\eta)\sin\theta$.

В силу гармоничности функций $\frac{1}{r_0}$, $G_{11}(p, q)$, $G_{12}(p, q)$ и использования (9) в (1), получим краевую задачу:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \lambda^{-2} \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) \Phi(x, y) = \frac{F(x, y)}{4\bar{H}\lambda^2}, \quad (10)$$

где $\bar{H} = h/2b$; $x \in [0, 2]$; $y \in [-1, 1]$; $\Phi(x, \pm 1) = \Phi(2, y) = 0$; $\frac{\partial \Phi(0, y)}{\partial x} = 0$;

$$\Phi(x, y) = N_0 \left\{ \bar{\gamma}(\tau, y) + \frac{1}{4\pi} \int_{S_p^0} \bar{\gamma}(\xi, \eta) \cdot \left[\frac{\bar{G}_{11}(p, q) + \bar{G}_{12}(p, q)}{\bar{h}} + \frac{\partial(\bar{G}_{11}(p, q) + \bar{G}_{12}(p, q))}{\partial \zeta} \right] ds \right\}. \quad (11)$$

Уравнение Пуассона (10) описывает движение жидкости в ограниченной области между крылом и поверхностью раздела жидкостей. Исходя из аппроксимации (9), предполагается, что возмущения за пределы этой области не распространяются. Поэтому в (11) оператор N_0 следует заменить на оператор $N_{00} = \int_x^2 [] d\tau$, определяющий отсутствие возмущений перед поверхностью S_p^0 . Вместо (11) можно записать

$$\bar{\gamma}(x, y) = (1-\bar{a})L\bar{\gamma} - \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x}, \quad (12)$$

где $L\bar{\gamma} = -\left(\frac{1}{4\pi}\right) \int_{S_p^0} \bar{\gamma}(\xi, \eta) \cdot \left[\frac{\tilde{G}_{11}(p, q) + \tilde{G}_{12}(p, q)}{\bar{h}} + \frac{\partial(\tilde{G}_{11}(p, q) + \tilde{G}_{12}(p, q))}{\partial \zeta} \right] ds$;

$$\bar{G}_{11}(p, q) = (1-\bar{a}) \cdot \tilde{G}_{11}(p, q); \quad \bar{G}_{12}(p, q) = (1-\bar{a}) \cdot \tilde{G}_{12}(p, q).$$

Из соотношения (12) плотность двойного слоя $\bar{\gamma}(x, y)$ может быть найдена и использована для нахождения потенциала скоростей нижней жидкости:

$$\varphi(x, y, z) = -\left(\frac{1}{4\pi}\right) \int_{S_p^0} \bar{\gamma}(\xi, \eta) \cdot \frac{\partial G_2(p, q)}{\partial \zeta} ds. \quad (13)$$

При вычислении формы свободной поверхности жидкости может быть использована известная формула теории волн малой амплитуды [7]:

$$\bar{\zeta}_e(x, y, z) = Fr^2 \frac{\partial \varphi(x, y, z)}{\partial x}, \quad (14)$$

где $\bar{\zeta}_e(x, y, z) = \zeta(x, y, z)/a$ - относительная высота волны в долях полухорды крыла.

Итак, форма свободной поверхности жидкости под низколетящим крылом может быть найдена в результате последовательного решения краевой задачи (10), интегрального уравнения (12) и вычисления потенциала скоростей нижней жидкости и формы поверхности по формулам (13) и (14) соответственно.

Полученная последовательность задач (10), (12), (13), (14) решалась численно. Для решения краевой задачи (10) строится прямоугольная сетка размером $n \times m$ точек

$$S_{p, h, k}^0 = \{x_k, y_l : 0 = x_0 < x_1 < \dots < x_n = 2; -1 = y_0 < y_1 < \dots < y_m = 1\}.$$
 Шаги сетки по x и y задаются формулами $h = \frac{2}{n}$, $k = \frac{2}{m}$ соответственно. Во внутренних узлах этой сетки значения функции $\Phi(x, y)$ могут быть вычислены по итерационной формуле [8]:

$$\Phi_{i,j} = \frac{k^2(\Phi_{i+1,j} + \Phi_{i-1,j}) + \frac{h^2}{\lambda^2}(\Phi_{i,j+1} + \Phi_{i,j-1}) - \frac{h^2 k^2 F_{i,j}}{4H\lambda^2}}{2k^2 + \frac{2h^2}{\lambda^2}}, \quad (15)$$

значения же функции $\Phi(x, y)$ в граничных узлах вычисляются по формулам [8]:

$$\begin{aligned} \Phi_{i,0} = \Phi_{i,m} = \Phi_{n,j} = 0, \\ \Phi_{0,j} = \frac{2k^2\Phi_{1,j} + \frac{h^2}{k^2}(\Phi_{0,j+1} + \Phi_{0,j-1}) - \frac{h^2 k^2 F_{i,j}}{4H\lambda^2}}{2k^2 + \frac{2h^2}{\lambda^2}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Значения $\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x}$ во внутренних узлах сетки могут быть найдены по централизованной формуле порядка $O(h^4)$ [8]:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_{i,j}} = \frac{-\Phi_{i+2,j} + 8\Phi_{i+1,j} - 8\Phi_{i-1,j} + \Phi_{i-2,j}}{12h}, \quad i = \overline{2, n-2}, \quad j = \overline{0, n}. \quad (17)$$

Значения $\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x}$ в приграничных узлах сетки могут быть найдены по централизованной формуле порядка $O(h^2)$ [8]:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_{1,j}} = \frac{\Phi_{2,j} - \Phi_{0,j}}{2h}, \quad j = \overline{0, n}, \quad (18)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_{n-1,j}} = \frac{\Phi_{n,j} - \Phi_{n-2,j}}{2h}, \quad j = \overline{0, n}. \quad (19)$$

Значения же $\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x}$ в граничных узлах сетки могут быть вычислены по формулам правой и левой разностей порядка $O(h^2)$ соответственно [8]:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_{0,j}} = \frac{-3\Phi_{0,j} + 4\Phi_{1,j} - \Phi_{2,j}}{2h}, \quad j = \overline{0, n}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_{n,j}} = \frac{3\Phi_{n,j} - 4\Phi_{n-1,j} + \Phi_{n-2,j}}{2h}, \quad j = \overline{0, n}. \quad (21)$$

Дискретное множество значений функции $\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x}$, заданных на сетке $S_{p,h,k}^0$, можно интерполировать с помощью бикубических сплайнов, положив $g(x, y) = \frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x}$, по формуле [9, с. 146-149]:

$$\begin{aligned} g(x, y) = g_{xx}(x_{i-1}, y) \frac{(x_i - x)^3}{6h} + g_{xx}(x_i, y) \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h} + \\ + (g(x_{i-1}, y) - \frac{g_{xx}(x_{i-1}, y)h^2}{6}) \frac{x_i - x}{h} + (g(x_i, y) - \frac{g_{xx}(x_i, y)h^2}{6}) \frac{x - x_{i-1}}{h}, \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} g_{xx}(x_{i-1}, y) = K_{i-1,j-1} \frac{(y_j - y)^3}{6k} + K_{i-1,j} \frac{(y - y_{j-1})^3}{6k} + \\ + (M_{i-1,j-1} - \frac{K_{i-1,j-1}k^2}{6}) \frac{y_j - y}{k} + (M_{i-1,j} - \frac{K_{i-1,j}k^2}{6}) \frac{y - y_{j-1}}{k}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 g_{xx}(x_i, y) &= K_{i,j-1} \frac{(y_j - y)^3}{6k} + K_{i,j} \frac{(y - y_{j-1})^3}{6k} + \\
 &+ (M_{i,j} - \frac{K_{i,j-1} k^2}{6}) \frac{y_j - y}{k} + (M_{i,j} - \frac{K_{i,j} k^2}{6}) \frac{y - y_{j-1}}{k}; \\
 g(x_{i-1}, y) &= N_{i-1,j-1} \frac{(y_j - y)^3}{6k} + N_{i-1,j} \frac{(y - y_{j-1})^3}{6k} + \\
 &+ (g_{i-1,j-1} - \frac{N_{i-1,j-1} k^2}{6}) \frac{y_j - y}{k} + (g_{i-1,j} - \frac{N_{i-1,j} k^2}{6}) \frac{y - y_{j-1}}{k}; \\
 g(x_i, y) &= N_{i,j-1} \frac{(y_j - y)^3}{6k} + N_{i,j} \frac{(y - y_{j-1})^3}{6k} + \\
 &+ (g_{i,j-1} - \frac{N_{i,j-1} k^2}{6}) \frac{y_j - y}{k} + (g_{i,j} - \frac{N_{i,j} k^2}{6}) \frac{y - y_{j-1}}{k}; \\
 N_{ij} &= g_{yy}(x_i, y_j), \quad M_{ij} = g_{xx}(x_i, y_j), \quad K_{ij} = g_{xxy}(x_i, y_j).
 \end{aligned}$$

Так как оператор $L\gamma$ сжимающий [5], то, положив в качестве нулевого приближения $\bar{\gamma}(x, y)$ интерполированное множество значений функции $-\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x}$, для уравнения (12) можно использовать расчетную схему, основанную на вычислении последовательных приближений:

$$\bar{\gamma}_0 = -\frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x},$$

$$\bar{\gamma}_{n+1} = (1 - \bar{a})L\bar{\gamma}_n - \frac{\partial\Phi(x, y)}{\partial x},$$

где $L\bar{\gamma} = -(\frac{1}{4\pi}) \int_{-1}^1 \int_0^2 \bar{\gamma}(\xi, \eta) \cdot [\frac{\tilde{G}_{11}(\xi, \eta, -2\bar{h}, x, y, z) + \tilde{G}_{12}(\xi, \eta, -2\bar{h}, x, y, z)}{\bar{h}} + \frac{\partial(\tilde{G}_{11}(\xi, \eta, -2\bar{h}, x, y, z) + \tilde{G}_{12}(\xi, \eta, -2\bar{h}, x, y, z))}{\partial\zeta}] d\xi d\eta$.

Было установлено, что для сочетаний жидкостей воздух-вода достаточно вычислить одно-два приближения.

После нахождения дискретного множества значений функции $\bar{\gamma}(x, y)$, его необходимо интерполировать по формуле (22), положив $g(x, y) = \bar{\gamma}(x, y)$, и полученный результат использовать в (13) для нахождения множества значений функции $\varphi(x, y, z)$ потенциала скоростей нижней жидкости:

$$\varphi(x, y, z) = -(\frac{1}{4\pi}) \int_{-1}^1 \int_0^2 \bar{\gamma}(\xi, \eta) \frac{\partial\tilde{G}_2(\xi, \eta, -2\bar{h}, x, y, z)}{\partial\zeta} d\xi d\eta.$$

После этого необходимо найти множество значений функции $\frac{\partial\varphi(x, y, z)}{\partial x}$ по формулам (17)-(21) и использовать полученный результат для нахождения высоты волны в долях полухорды крыла по формуле (14).

В качестве примера был выполнен расчет волнообразования для крыла с плоским профилем размахом 40 м, хордой 10 м, углом атаки 3° при его движении на высоте 2 м над разделом сред воздух-вода со скоростью 100 м/с. Результаты расчета представлены на рис. 2 и рис. 3. На рис. 2 изображена плотность двойного слоя, характеризующая нагрузку на крыле. На

рис. 3 представлен рельеф свободной поверхности под крылом. Её форма близка к волнам при движении сосредоточенного давления [4].

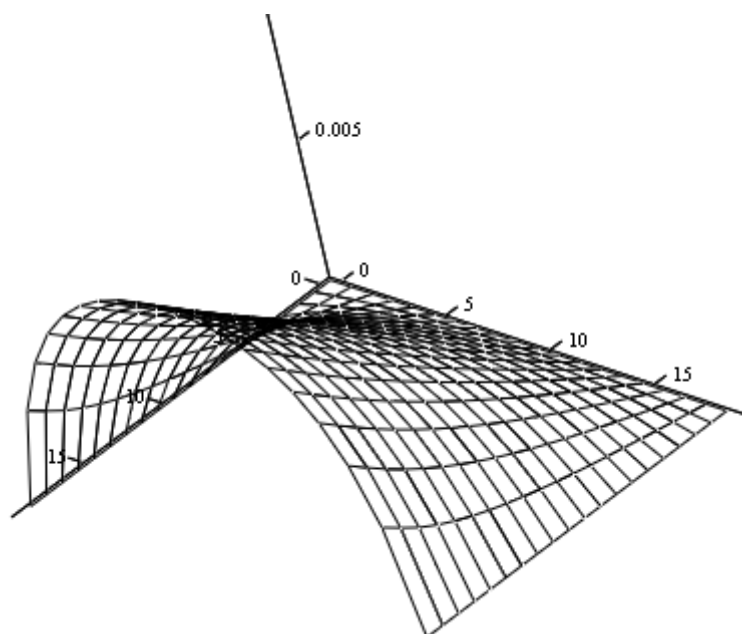


Рис. 2. Плотность двойного слоя

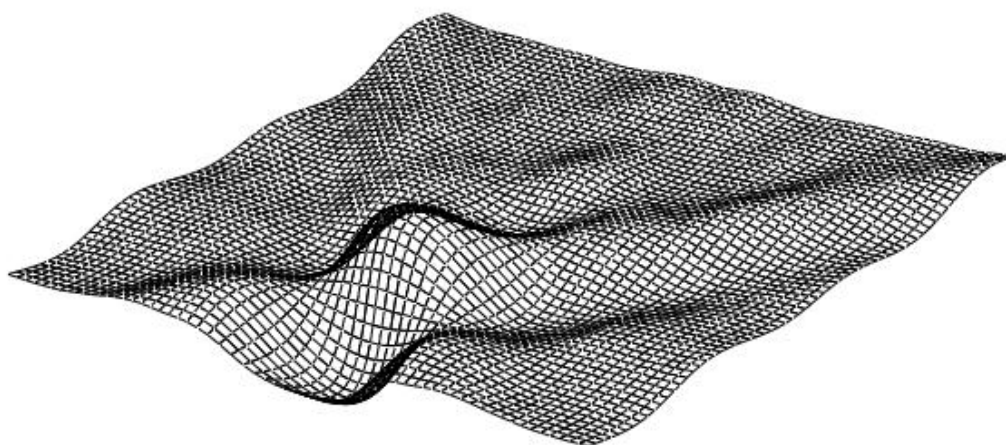


Рис. 3. Форма свободной поверхности жидкости под крылом

Таким образом, в задачах о движении на малой высоте над поверхностью раздела жидкостей с различной плотностью несущей поверхности оказывается эффективным квадрупольное вырождение фундаментальных структур. Построенная численная схема решения задачи может быть просто обобщена на случай движения слабо искривленных тонких крыльев. Также просто можно вычислить силы и моменты на крыле.

Библиографический список

1. **Панченков, А.Н.** Гидродинамика подводного крыла / А.Н. Панченков. – Киев: Наук. думка, 1965. – 552 с.
2. **Панченков А.Н.** Линейные задачи гидродинамики крыла над поверхностью раздела жидкостей разных плотностей // Гидродинамика больших скоростей. Киев: Наук. думка, 1965. Вып. 1. С. 7–20.

3. **Панченков, А.Н.** Квадрупольная теория крыла вблизи твердой границы // Асимптотические методы в динамике систем. – Новосибирск: Наука, 1980. С. 5–116.
4. **Орлов, Ю.Ф.** Потенциал ускорений в гидродинамике корабельных волн / Ю.Ф. Орлов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 214 с.
5. **Орлов Ю.Ф.** Алгоритмы расчета формы свободной поверхности тяжелой жидкости под низколетящим крылом / Ю.Ф. Орлов // Асимптотические методы в механике. – Новосибирск: Наука, 1983.
6. **Басин, М.А.** Гидроаэродинамика крыла вблизи границы раздела сред / М.А. Басин, В.П. Шадрин. – Л.: Судостроение, 1980. – 304 с.
7. **Сретенский, Л.Н.** Теория волновых движений жидкости / Л.Н. Сретенский. – М.: Наука, 1977. – 816 с.
8. **Мэтьюз Джон, Г.** Численные методы. Использование MATLAB: [пер. с англ.] / Г. Мэтьюз Джон, Финк Д. Куртис. – 3-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
9. **Марчук, Г.И.** Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1977. – 456 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.08.2011*

S.A. Khimich, Y.F. Orlov

THE MOTION OF THE WING OF THE FINITE WINGSPAN ABOVE THE INTERFACE OF TWO MEDIUMS

The problem of surface waves generation at the motion of the wing of the finite wingspan at the small height above the interface of two mediums is considered here. Two-dimensional singular integral equation of the wing theory degenerates to the boundary problem for the Poisson equation for finding the double-layer density distributed on the wing surface. This problem was solved numerically. The case of the motion of plain wing which has the size of real ekranoplan wing is considered.

Key words: interface, ekranoplan wing, quadrupole theory of the wing, waves under the wing.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 631.3

В.А. Тихомиров², С.В. Хватов¹

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА СЕТЕВОГО ТОКА УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
ООО «Экологические технологии»¹

Для двух самых распространенных типов современного регулируемого привода постоянного и переменного тока исследованы негативные последствия от циркуляции в питающей сети высших гармоник. Даны рекомендации по компенсации мощности искажения. Материал рассмотрен на примере многолетней эксплуатации полупроводниковых приводов буммашины на одном из предприятий г. Балахна.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, электропривод переменного тока, $\cos\varphi$, высшие гармоники, мощность искажения, компенсация мощности искажения.

Основным энергетическим показателем для различных типов преобразователей электрической энергии является коэффициент мощности K_M , который определяется отношением активной мощности, потребляемой из сети (определяется только первыми гармониками тока и напряжения), к полной мощности, т.е.:

$$K_M = P_{(1)}/S = P_{(1)} \cdot S_{(1)} / S_{(1)} \cdot S = \cos\varphi \cdot K_{И},$$

где $P_{(1)}$ – активная мощность первой гармоники; S – полная мощность; $S_{(1)}$ – полная мощность первой гармоники.

В выражении для коэффициента мощности имеются две составляющие $\cos\varphi$ и $K_{И}$, которые называются соответственно коэффициентами сдвига и искажения. При допущении о синусоидальной неискаженной форме напряжения они характеризуют одновременно фазовый сдвиг первой гармоники сетевого тока и коэффициент искажения формы сетевого тока $K_{И} = I_{\phi(1)}/I_{\phi}$, где $I_{\phi(1)}$ – действующее значение первой гармоники сетевого тока; I_{ϕ} – действующее значение полного тока сети.

Подробный анализ коэффициента сдвига в регулируемых приводах постоянного и переменного тока дан авторами в [1].

Коэффициенты искажения для управляемых выпрямителей при допущении о прямоугольной форме потребляемого из сети тока (при идеальном сглаживании выпрямленного тока) равны: $K_{И}=0,9$ – для однофазной мостовой схемы, $K_{И}=0,955$ – для трехфазной мостовой схемы.

В зарубежной литературе вместо коэффициента искажения $K_{И}$ принято использовать понятие **THD%** – **Total Harmonic Distortion** – Суммарное Гармоническое Искажение, которое определяется выражением:

$$\text{THD}\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} I_{(k)}^2}}{I_{(1)}} \cdot 100 ,$$

где $I(k)$ и $I(1)$ – амплитудные или действующие значения k -й и 1-й гармоник тока.

Связь между $K_{И}$ и THD определяется соотношениями:

$$K_{И} = \frac{I(1)}{I} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}, \quad \text{THD} = \frac{\sqrt{1 - K_{И}^2}}{K_{И}}. \quad (1)$$

Для трехфазной мостовой схемы при $K_{И}=0,955$ будем иметь $\text{THD}=31\% \sim 0,31$.

Найдем связь мощности искажения T с коэффициентом искажения $K_{И}$. Действующее значение всех высших гармоник тока равно:

$$\sqrt{\sum_{k=2} I(k)^2} = \sqrt{I^2 - I(1)^2} = I\sqrt{1 - k_{И}^2}.$$

Тогда мощность искажения

$$T = U \cdot I \sqrt{1 - k_{И}^2} = U \cdot I \frac{I(1)}{I} \sqrt{1 - k_{И}^2} = S_{(1)} \frac{1}{k_{И}} \sqrt{1 - k_{И}^2} = S_{(1)} \sqrt{\frac{1}{k_{И}^2} - 1},$$

где $S_{(1)} = (P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2)^{0,5}$, $Q_{(1)}$ – реактивная мощность первой гармоники.

Учитывая, что $\frac{1}{k_{И}^2} = 1 + \text{THD}^2$, получим

$$T = S_{(1)} * \text{THD}, \quad (2)$$

т.е. чем больше THD, тем больше мощность искажения T . При этом $K_{И}$ получается низким, так как в токе сети I_{Φ} слишком много высших гармоник.

Заметим, что мощность искажения T находится в квадратуре по отношению к $S_{(1)}$, поэтому полная мощность $S = (S_{(1)}^2 + T^2)^{0,5}$ возрастает из-за THD в меньшей степени.

Далее приведены результаты оценки гармонического состава, THD и $K_{И}$ с помощью пакета моделирования MicroCAP для двух классов полупроводниковых преобразователей, наиболее широко применяемых в настоящее время для регулируемых электроприводов постоянного тока (система «Управляемый выпрямитель–Д») и переменного тока (система «ПЧ–АД»).

Описание моделей для анализа гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты

1. Трехфазный управляемый выпрямитель при идеальном сглаживании выпрямленного тока

Такой режим имеет место при работе выпрямителя на большую индуктивность (при анализе обычно полагают, что индуктивность цепи выпрямленного тока $L_d \rightarrow \infty$). Сетевой ток при этом имеет форму разнополярных прямоугольников длительностью 120 град. эл. В пакете моделирования эта форма сетевого тока имитировалась программным способом и был проведен ее гармонический анализ.

Диаграммы моделирования представлена на рис. 1.

В соответствии с результатами моделирования при таком режиме работы трехфазного управляемого выпрямителя $\text{THD}=31\%$, мощность искажения T составляет 31% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$, $K_{И}=0,955$ [2].

2. Трехфазный управляемый выпрямитель при реальных пульсациях выпрямленного тока

Такой режим имеет место при конечной величине индуктивности цепи выпрямленного тока и нагрузке электродвигателя постоянного тока, близкой к номинальной. Сетевой ток при этом имеет форму разнополярных пульсирующих прямоугольников длительностью 120 град. эл.

Схема модели показана на рис. 2.

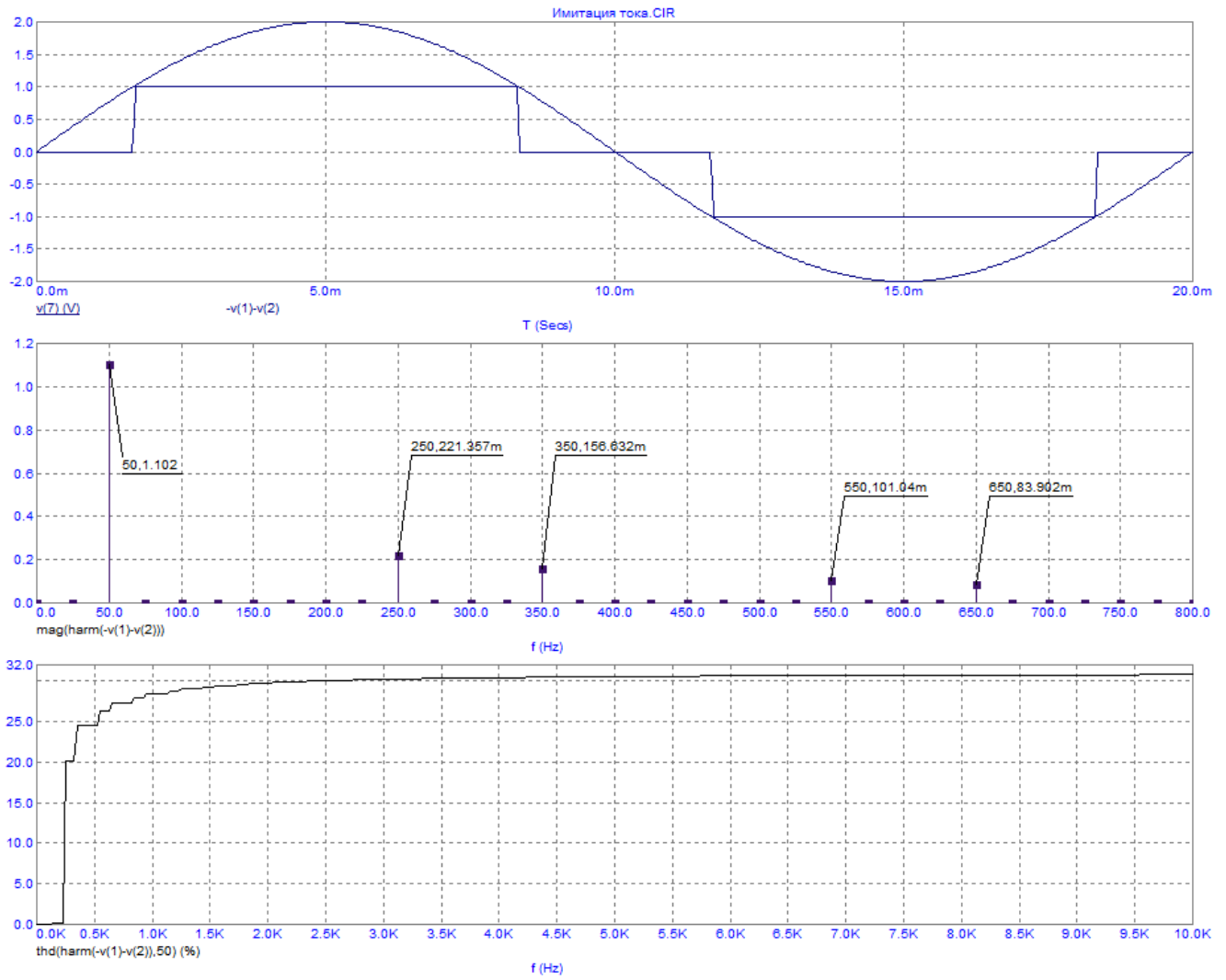


Рис. 1

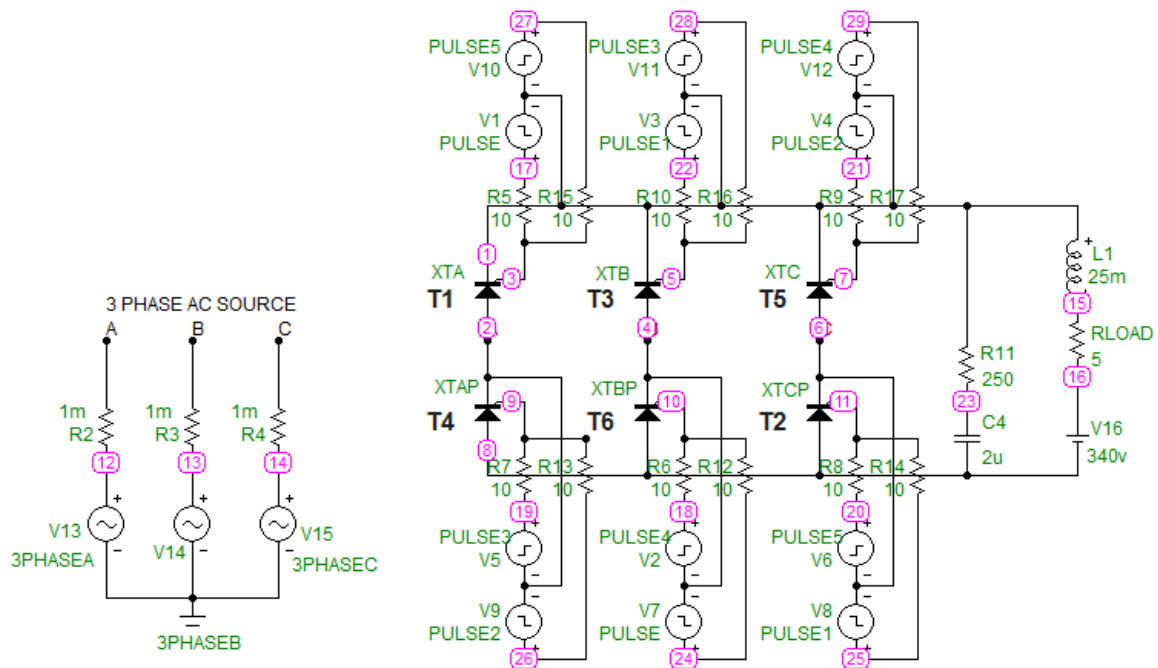


Рис. 2

Диаграммы моделирования с сигналами в обозначенных узлах схемы при угле управления $\alpha \approx 45^\circ$ эл. (рис. 3).

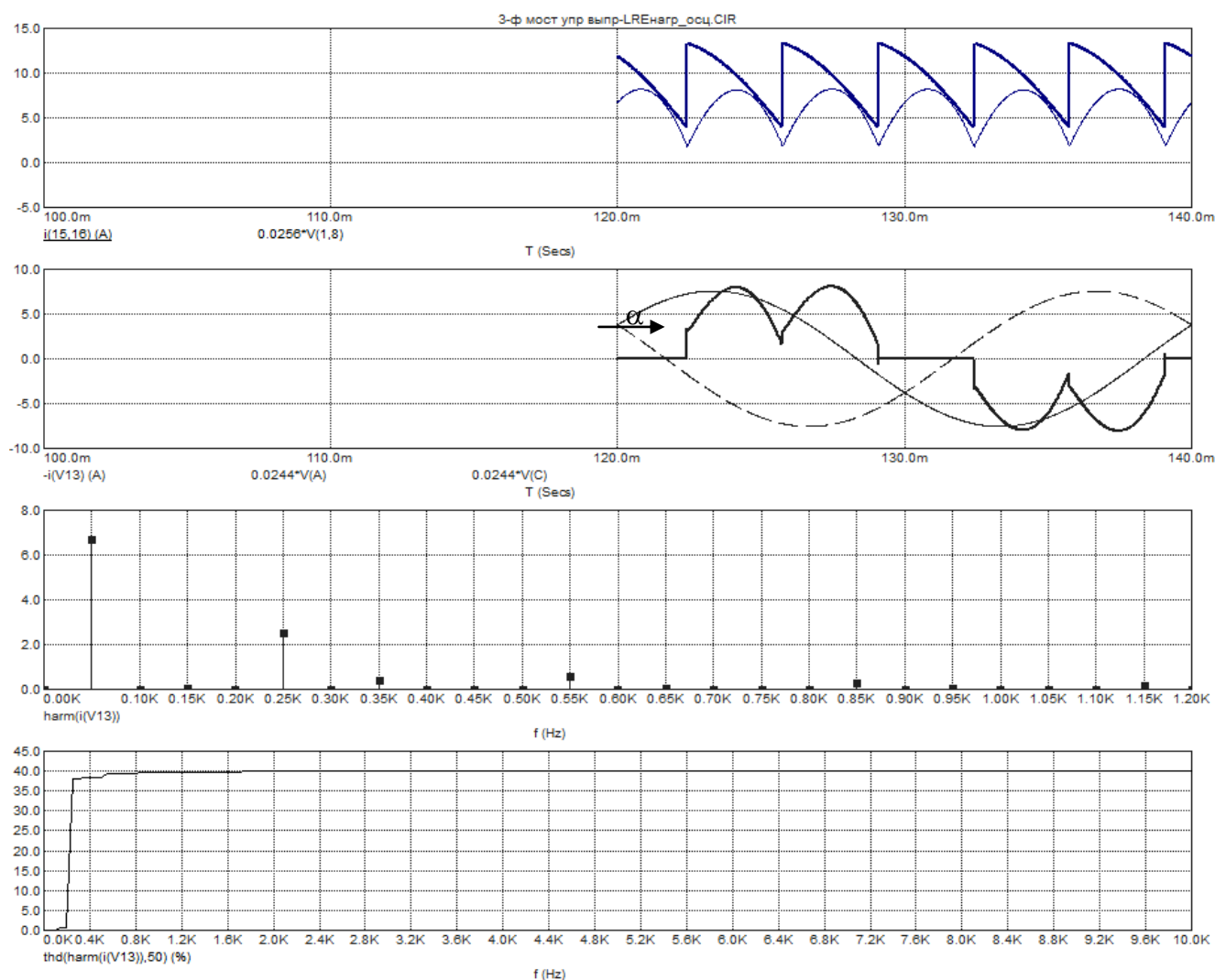


Рис. 3

В соответствии с результатами моделирования при таком режиме работы трехфазного управляемого выпрямителя THD=40%, мощность искажения T составляет 40% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$, а $K_{И}=0,928$, что несколько ниже $K_{И}=0,955$ при идеальном сглаживании выпрямленного тока. Таким образом, повышенные пульсации выпрямленного тока негативно сказываются на значениях THD, T и $K_{И}$.

3. Трехфазный управляемый выпрямитель в режиме прерывистого тока

В настоящее время очень часто в комплекте электропривода сглаживающий дроссель отсутствует. При этом почти во всем диапазоне нагрузок на двигатель ток якоря является прерывистым и имеет большие пульсации. Далее на модели показывается, что режим прерывистого тока существенно ухудшает гармонический состав сетевого тока.

Схема модели аналогична пункту 2. Но для реализации режима прерывистого тока была уменьшена индуктивность в цепи выпрямленного тока ($L1$) и увеличено напряжение источника, имитирующего ЭДС в этой цепи (источник V16).

Диаграммы моделирования представлена на рис. 4.

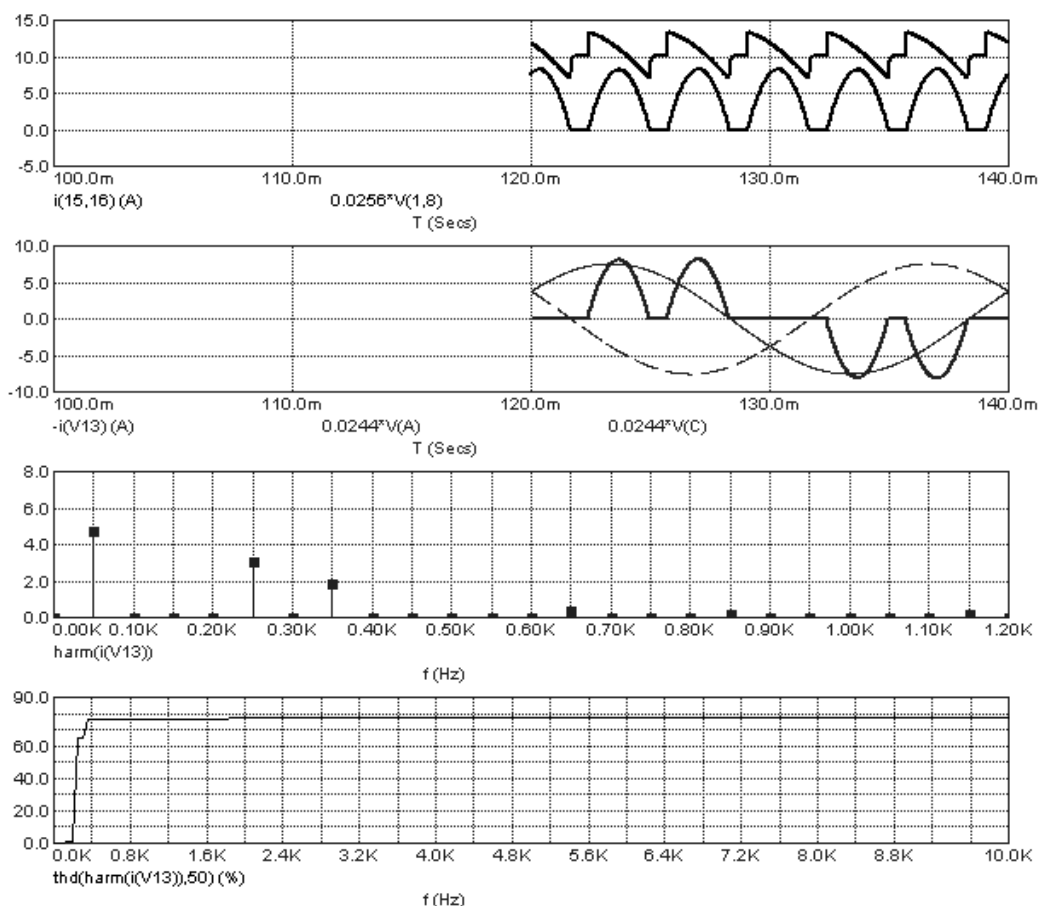


Рис. 4

В соответствии с результатами моделирования при таком режиме работы трехфазного управляемого выпрямителя $\text{THD}=77\%$, мощность искажения T составляет 77% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$, а $K_{\text{И}}=0,792$, что ниже величины $K_{\text{И}}$ при реальных пульсациях выпрямленного тока. Кроме того, при повышенных пульсациях выпрямленного тока в сильной степени возрастает нагрев якоря двигателя и ухудшается коммутация коллекторно-щеточного аппарата. Все это снижает использование электродвигателя по мощности. Это свидетельствует о целесообразности применения дополнительного сглаживающего дросселя.

4. ПЧ с однофазным выпрямителем на входе (маломощные ПЧ)

Схема модели представлена на рис. 5.

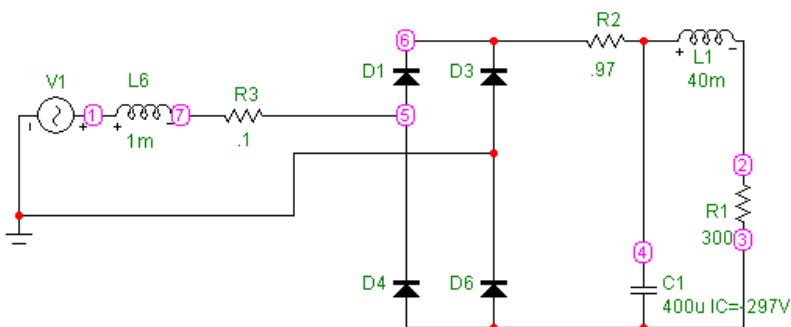


Рис. 5

Диаграммы моделирования показана на рис. 6.

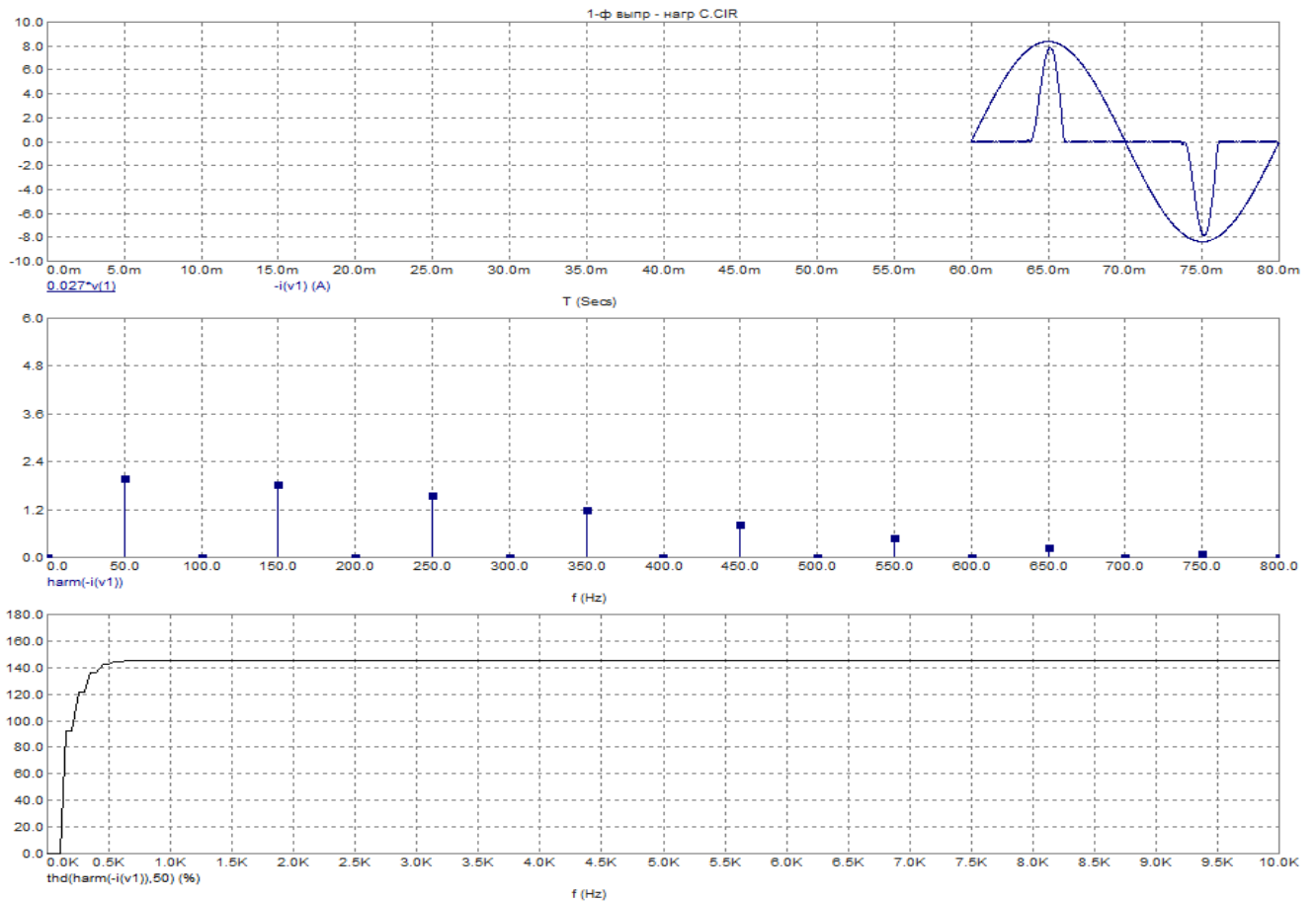


Рис. 6

Из диаграмм видно, что сетевой ток имеет форму узких импульсов, сильно отличается от синусоиды и содержит все нечетные гармоники, причем все ближайшие после первой гармоники имеют значительную величину. Однофазный выпрямитель, нагруженный на С, $THD=145\%$, поэтому мощность искажения T превышает даже полную мощность первой гармоники $S_{(1)}$ в 1,45 раз. При этом коэффициент искажения $K_{И}=0,567$, что является очень низкой величиной.

5. ПЧ с однофазным выпрямителем на входе при применении резонансного LC-фильтра

Схема модели показана на рис. 7.

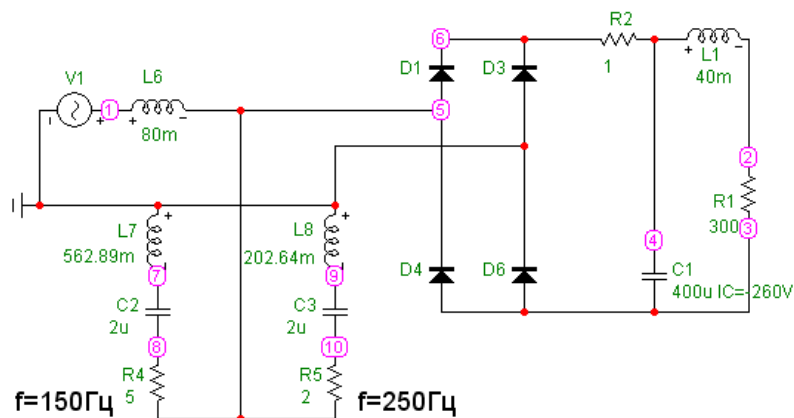


Рис. 7

Диаграммы моделирования показана на рис. 8.

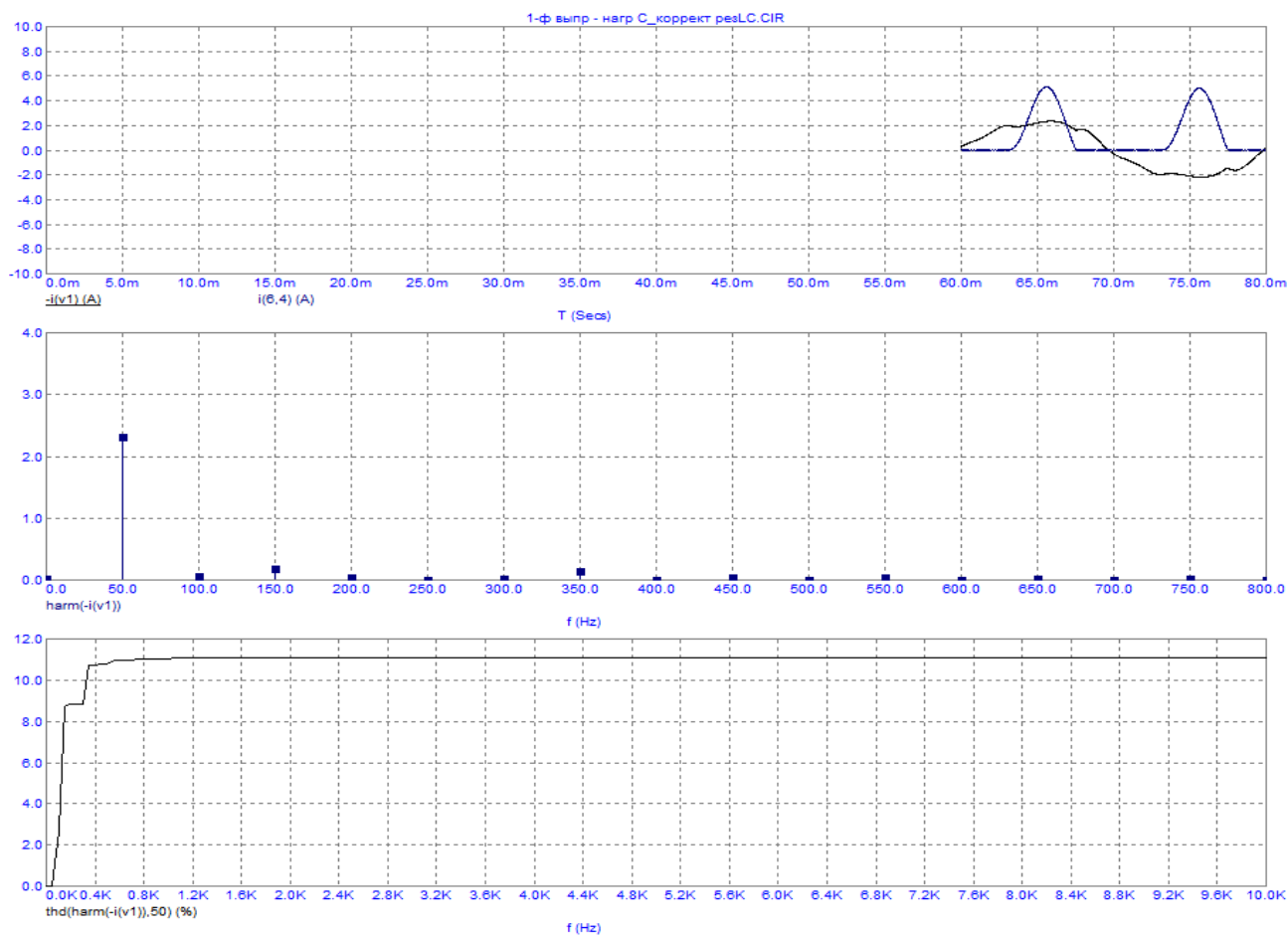


Рис. 8

Из диаграмм видно, что применение резонансного LC-фильтра на входе выпрямителя позволяет в значительной степени приблизить сетевой ток к синусоидальной форме, высшие гармоники при этом сильно подавляются. Значение $\text{THD}=11\%$, мощность искажения T составляет всего 11% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$. При этом $K_{\text{и}}=0,994$.

6. ПЧ с трехфазным выпрямителем на входе

Схема модели показана на рис. 9.

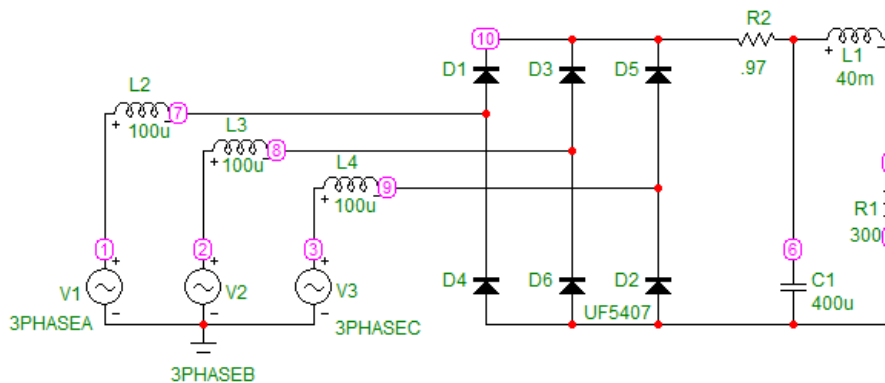


Рис. 9

Диаграммы моделирования представлена на рис. 10.

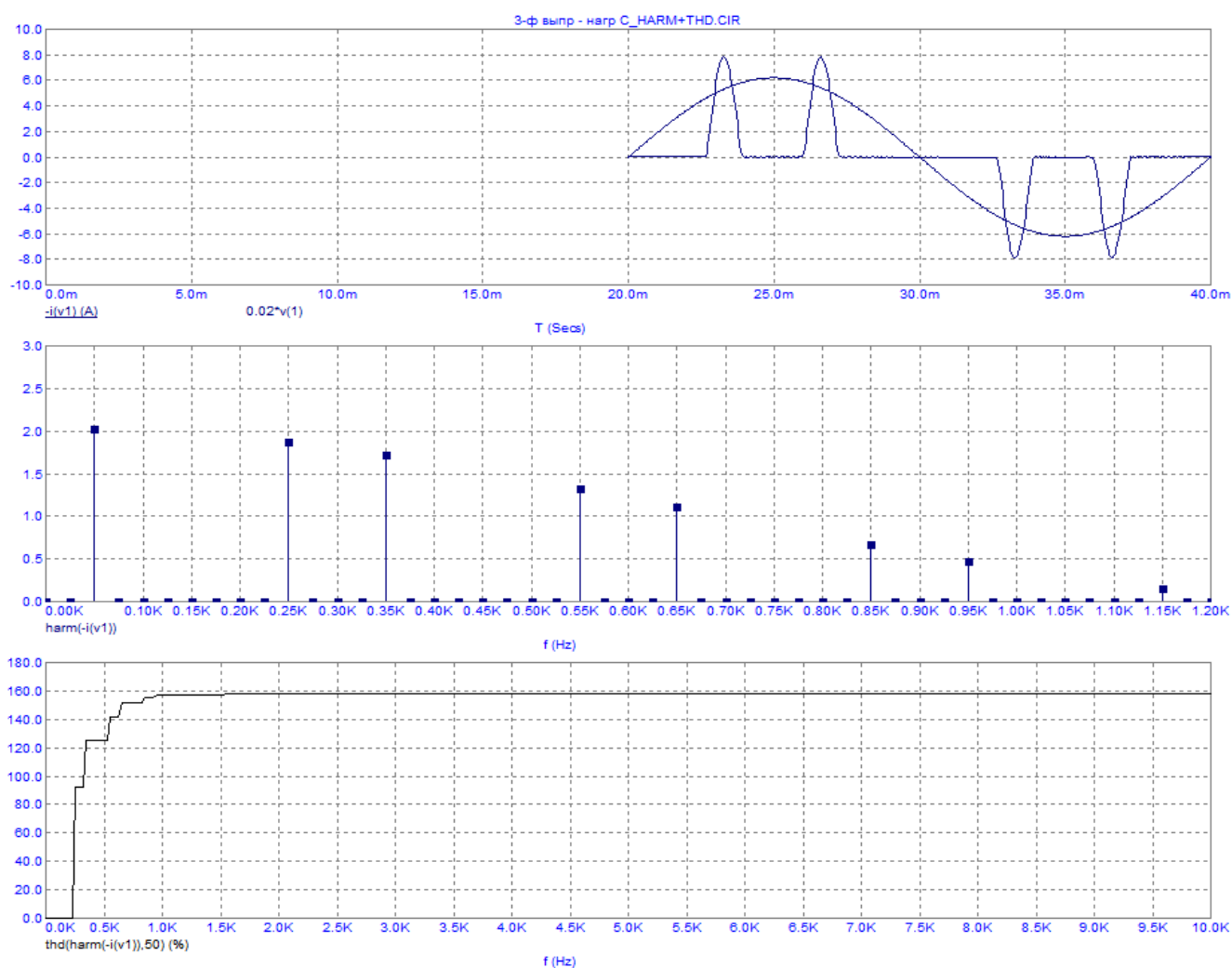


Рис. 10

Из диаграмм видно, что сетевой ток имеет форму сдвоенных узких импульсов и сильно отличается от синусоиды. Он содержит нечетные гармоники 1, 5, 7, 11 и т.д., и не содержит четных гармоник и кратных трем. Ближайшие к первой высшие гармоники имеют значительную величину. Значение THD=158%, что больше, чем даже у однофазного выпрямителя (см. пункт 4). При этом мощность искажения T превышает даже полную мощность первой гармоники $S_{(1)}$ в 1,58 раз, а коэффициент искажения $K_{И} = 0,535$, что ниже, чем у однофазного ПЧ.

Таким образом, гармонический состав сетевого тока 3-фазного ПЧ, хуже, чем у ПЧ с однофазным выпрямителем на входе.

7. ПЧ с трехфазным выпрямителем на входе при применении резонансного LC-фильтра

Схема модели показана на рис. 11.

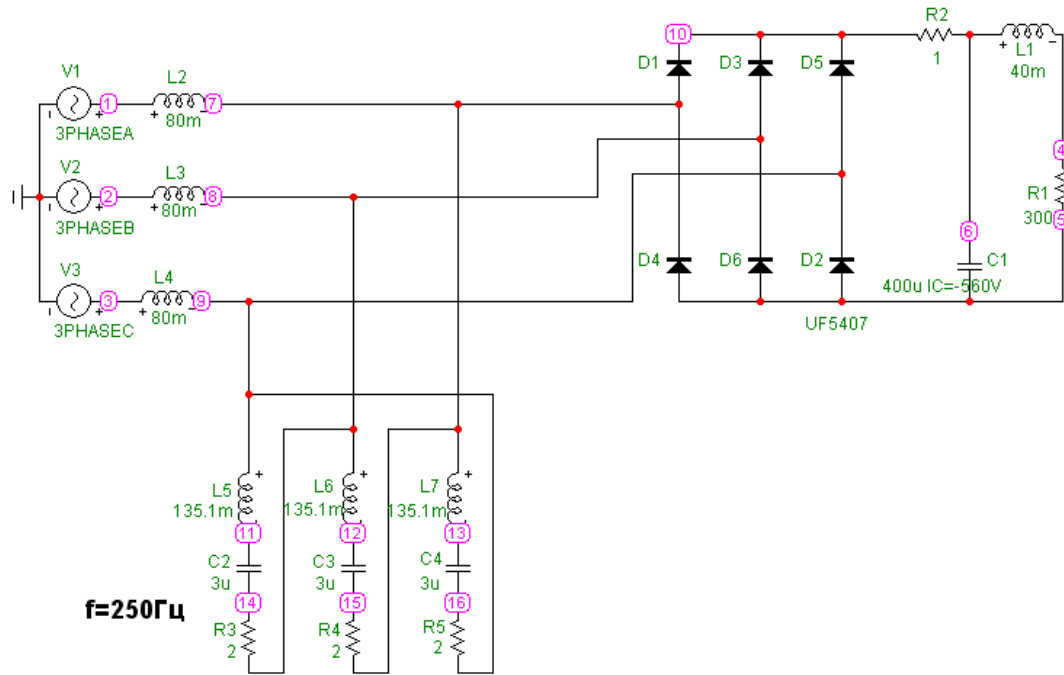


Рис. 11

Диаграммы моделирования представлена на рис. 12.

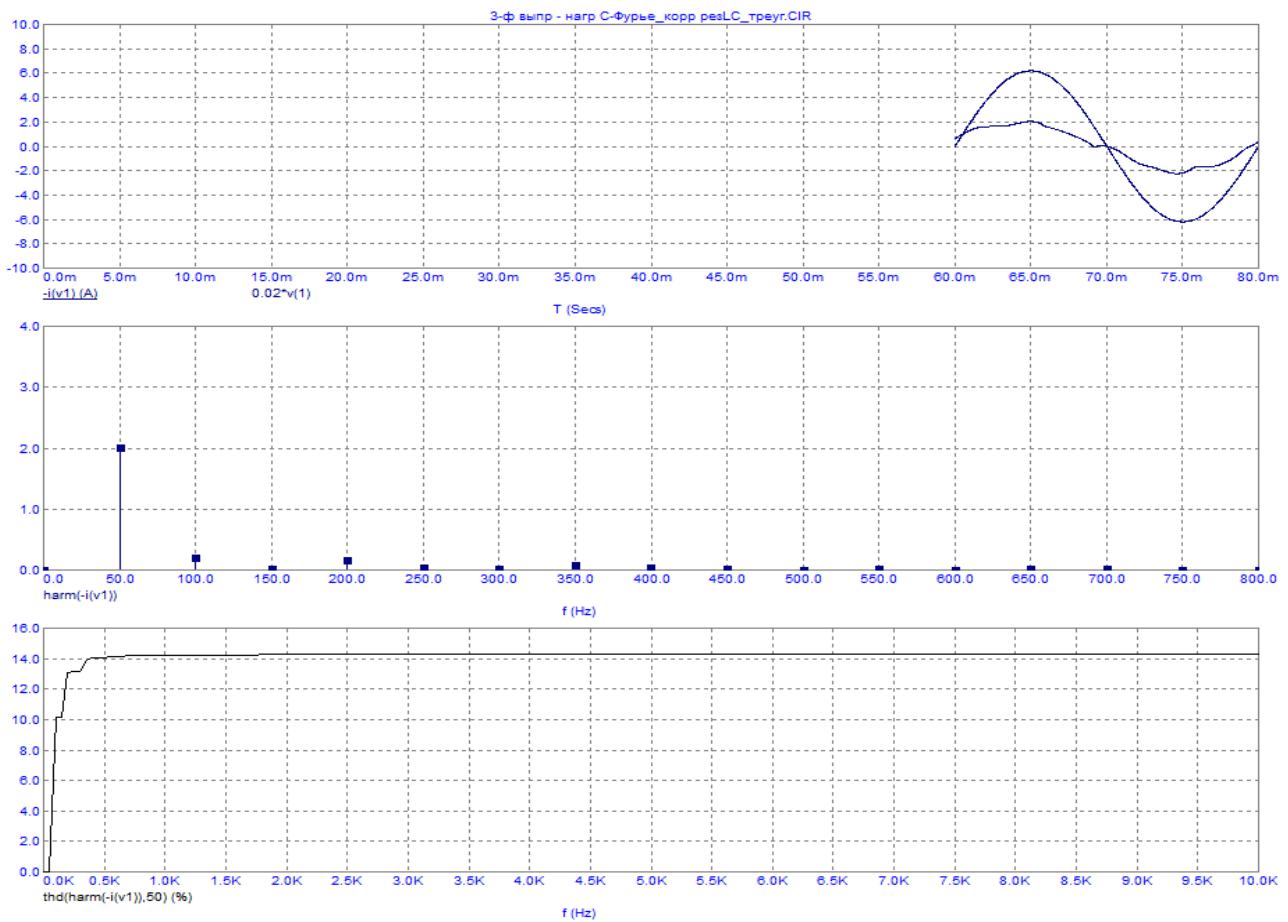


Рис. 12

Из диаграмм видно, что применение резонансного LC-фильтра на входе 3-фазного

выпрямителя ПЧ позволяет в значительной степени приблизить сетевой ток к синусоидальной форме. При этом $\text{THD}=14\%$, мощность искажения T составляет всего 14% от полной мощности первой гармоники $S_{(1)}$, а $K_{\text{и}}=0,99$.

Все полученные результаты сведены в табл. 1 в формате Excel, в которой коэффициенты THD брались из результатов моделирования в MicroCap, а коэффициент искажения $K_{\text{и}}$ вычислялся автоматически по формуле (1).

Таблица 1

Расчет коэффициента искажения $K_{\text{и}}$ по THD		
	THD	$K_{\text{и}}$
1) имит тока	0,30853	0,955553735
2) 3ф-упр+L	0,40123	0,928082534
3) 3ф-упр прер ток	0,76947	0,792532353
4) 1ф-C	1,45321	0,566882193
5) 1ф-C+LC	0,11085	0,993912186
6) 3ф-C	1,57882	0,535082887
7) 3ф-C+LC	0,14273	0,989967107

В этой таблице, чем меньше значение THD и больше значение $K_{\text{и}}$, тем лучше спектральный состав сетевого тока.

Результаты с положительной оценкой отмечены жирным шрифтом, с негативной оценкой – подчеркнутый курсив, приемлемые – обычный шрифт.

Наилучшие результаты с точки зрения значения THD, уровня мощности искажения T и значения $K_{\text{и}}$ имеют варианты 5) и 7). Эти варианты относятся к ПЧ, у которых $\cos\varphi = 1$, потребляется из сети наименьшая мощность искажения T , а хорошие результаты получены за счет применения резонансных LC-фильтров для фильтрации высших гармоник.

Без резонансных фильтров результаты у ПЧ получаются наихудшими (варианты 4) и 6)) среди всех проанализированных вариантов.

При известном токе нагрузки преобразователя значение $K_{\text{и}}$ определяет действующее значение полного тока сети $I_{\text{ф}}=I_{\text{ф}(1)}/K_{\text{и}}$. Поэтому, чем ниже $K_{\text{и}}$, тем больше $I_{\text{ф}}$, что приводит к необходимости повышения сечения первичных кабелей. Например, у ПЧ с трехфазным выпрямителем на входе, как видно из рис. 10, пики тока превышают амплитуду 1-й гармоники в четыре раза, а $I_{\text{ф}}$ превышает $I_{\text{ф}(1)}$ в $1/K_{\text{и}}=1,87$ раз. При этом $I_{\text{ф}(1)}$ определяется током нагрузки АД.

Отсутствие сглаживающего дросселя в цепи выпрямленного тока управляемых выпрямителей приводит к появлению достаточно широкой зоны прерывистых токов и существенному ухудшению показателей (вариант 3)). Кроме того, не следует забывать, что управляемые выпрямители потребляют значительную реактивную мощность из сети и имеют низкий $\cos\varphi$ при глубоком регулировании скорости электродвигателя за счет снижения выпрямленного напряжения на его якоре [1].

Выводы

В работе дан количественный сравнительный анализ гармонического состава сетевого тока управляемых выпрямителей и преобразователей частоты, применяемых в современном регулируемом электроприводе постоянного и переменного тока. Для анализа использовалось осциллографирование на реальном объекте (бумагоделательная машина, расположена в Нижегородской области) и моделирование с помощью компьютерной программы MicroCap.

На основе результатов анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Компенсации реактивной мощности и мощности искажения должно уделяться пристальное внимание на электропотребляющих предприятиях, иначе возможно появление дополнительных затрат, ухудшение качества и устойчивости электроснабжения, снижение надежности работы и срока службы электрооборудования.

2. При применении регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока необходимо обращать особое внимание на конфигурацию якорной цепи двигателя, обосновывать отказ от установки сглаживающего реактора. В режиме прерывистого тока, который возникает при недогрузке электродвигателя или при отсутствии сглаживающего дросселя и малой индуктивности якорной цепи, гармонический состав сетевого тока может оказаться очень неблагоприятным (сравнимым с гармоническим составом ПЧ без LC-фильтра на входе). В этом случае потребуются дополнительный сглаживающий дроссель или фильтрокомпенсирующее устройство. Последний вариант может решить проблему и с низким коэффициентом мощности при глубоком регулировании скорости двигателя постоянного тока.

3. При применении регулируемого электропривода переменного тока на основе ПЧ с асинхронным короткозамкнутым двигателем не требуется компенсации реактивной мощности, но особое внимание необходимо обращать на гармонический состав сетевого тока и при необходимости принимать меры по компенсации высших гармоник с помощью пассивных или активных фильтров высших гармоник.

4. Увеличение общего действующего значения сетевого тока при наличии высших гармоник приводит к увеличению потерь и перегреву всего оборудования питающей сети. Необходимо внимательно подходить к выбору сечения питающих кабелей при высоком уровне гармоник в потребляемом токе.

5. Высшие гармоники тока влияют на форму напряжения в системе электроснабжения, вызывая его несинусоидальность, которая отрицательно воздействует на изоляцию кабельных линий и может нарушить нормальную работу конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности и устройств автоматики. Оценка уровня гармоник напряжения может быть выполнена, например, с помощью анализатора качества электроэнергии РМ172ЕН [3].

Библиографический список

1. **Тихомиров, В.А.** Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока / В.А. Тихомиров, В.Г. Титов, С.В. Хватов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. 2010. №4 (83). С. 190–204.
2. **Руденко, В.С.** Преобразовательная техника / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – Киев: Вища школа, 1983. – 431 с.
3. Анализатор качества электроэнергии РМ172ЕН. http://www.epsa-spb.ru/shop/?mode=product&product_id=109851201

*Дата поступления
в редакцию 19.07.2011*

V.A. Tikhomirov, S.V. Hvatov

BENCHMARK ANALYSIS OF THE HARMONIC COMPOSITION OF THE NETWORK CURRENT OF THE CONTROLLED RECTIFIERS AND FREQUENCY CONVERTERS

For two the most wide-spread types of the modern controlled drive constant and alternating current explored negative consequences from circulation in supplying network of the high harmonicas. Recommendations are given on compensation of the power of the distortion. The Material is considered on example of the perennial usage semiconductor drives of the machine on production of the paper on one of the enterprise Balahny.

Key words: drive of the direct current, drive alternating current, $\cos\varphi$, high harmonicas, power of the distortion, compensation of the power of the distortion.

УДК 621.314.2

А.С. Плехов¹, М.Н. Охотников², В.Г. Титов³**ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ
ПРИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ
И АЛГОРИТМЫ ИХ РЕШЕНИЯ**ООО «Энергосбережение»¹,
ООО «Развитие»²,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

В целях компенсации реактивной мощности в распределительной сети электроснабжения, питающей электроприводы предприятия, рассматриваются алгоритмы вычислений соотношений углов управления группами вентилях компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока электропривода, соотношения между величинами угла управления компенсационным преобразователем и степенью широтно-импульсной модуляции выходного потока энергии инвертора тока. Решаются задачи оптимизации соотношения токов возбуждения в группе синхронных двигателей и относительной загрузки реактивной мощностью двигателей и преобразователей электроприводов. Обсуждаются подходы к реализации микропроцессорных идентифицирующих вычислительных и оптимизирующих устройств. Предложены вычислительные схемы устройств идентификации и оптимизации, которые реализуются на микроконтроллерах посредством программы, написанной на языке С и на языке структурированного текста ST в случае применения программируемых логических контроллеров. В качестве среды для проверки вычислительных разностных схем используется среда имитационного динамического моделирования VenSim.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности; энергосберегающее управление электроприводами; управление возбуждением синхронных электродвигателей для компенсации реактивной мощности; регулируемый электропривод с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока преобразователя частоты; относительная загрузка реактивной мощностью преобразователей электроприводов; алгоритмы вычислений; алгоритмы оптимизации.

В [1, 2, 3, 6, 7, 9] показано, что в целях компенсации реактивной мощности (КРМ) в узлах нагрузки систем электроснабжения, питающих электроприводы предприятий, имеются работоспособные технические решения для управления возбуждением синхронных двигателей и преобразователями электроприводов постоянного и переменного тока со свойствами компенсации реактивной мощности. Данная статья посвящена решению задач управления преобразователями, возникающих при использовании этих разработок. В теории управления можно выделить *две основные задачи*: 1) о программировании оптимальных траекторий движения, то есть изменения во времени переменных состояния системы, включающей в наш случай энергетическую и электромеханическую подсистемы; 2) о проектировании автоматических систем, реализующих движение (развитие) по найденным траекториям. Основной особенностью первой задачи является то, что программа управления и программное движение могут быть найдены до осуществления самого движения. Эта задача решается методами оптимального управления. Вторая задача решается в рамках теории автоматического управления объектами, которые являются реализациями технических решений производственных проблем.

Снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях до экономически обоснованного уровня является одним из важнейших направлений энергосбережения. Фактически установлено, что существенные изменения потребления мощности и энергии при изменении напряжения слабо связаны с выполнением дополнительной полезной работы. Поэтому оптимизация напряжения в сетях электропотребления посредством КРМ позволяет достичь экономии энергии, большей по сравнению с традиционными энергосберегающими мероприятиями.

Для распределительной сети – системы электроснабжения промышленного предприятия решается задача размещения устройств компенсации реактивной мощности (КУ), а именно, определения координат расположения, состава и величины шунтирующих емкостей и/или реакторов, наряду с другими средствами КРМ.

Электропривод входит как существенная составляющая в единый процесс производства, распределения и использования электрической энергии. Поскольку двигатель не всегда работает в номинальном режиме с максимальной производительностью, то имеется возможность использовать электрооборудование не только для выполнения технологического процесса, но и для генерации реактивной мощности в сеть. Такая возможность много десятилетий используется при эксплуатации синхронных двигателей (СД), способных генерировать реактивную мощность емкостного характера в режиме перевозбуждения в пределах, определенных по условиям температурного режима [1, 2].

Решения этих задач в зависимости от отрасли промышленности, к которой относится предприятие, от загрузки синхронных двигателей активной мощностью и конфигурации сети различны:

- компенсация реактивной мощности с помощью только синхронных двигателей, подключенных в узлах нагрузки;
- КРМ только конденсаторными батареями из-за нецелесообразности использования СД для генерации реактивной мощности;
- распределение требуемой реактивной мощности между двумя этими источниками в различных пропорциях.

Зависимость приведенных затрат от напряжения в распределительной сети электроснабжения промышленного предприятия складывается из потерь мощности в отдельных группах потребителей. Потери мощности в группе потребителей, в свою очередь, зависят от напряжения в узле сети, мощности конкретного потребителя и его нагрузки. В результате оптимизации на множестве значений токов возбуждения каждого из группы синхронных двигателей должны быть найдены такие значения реактивной мощности, генерируемой синхронными двигателями, при которых соотношение величин напряжения и реактивной мощности узла нагрузки будут соответствовать минимуму приведенных затрат. Авторами разработаны алгоритмы управления возбуждением группы СД для обеспечения заданных значений реактивной мощности или напряжения в узле нагрузки [2].

Существенным для практики является аспект не стационарности системы электроснабжения промышленного предприятия на периоде «проектирование – эксплуатация»: реальная система может не соответствовать проекту и исходной информации для расчета КУ. Важным обстоятельством использования компенсирующих конденсаторов в качестве КУ являются факторы, ограничивающие их применение и обуславливающие необходимость установки дополнительного оборудования [4]. В процессе эксплуатации системы электроснабжения изменения в схему часто не вносятся своевременно, что создает предпосылки для применения самонастраивающихся многофункциональных средств компенсации реактивной мощности. Например, частотно регулируемый электропривод с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока преобразователя частоты является таким средством компенсации реактивной мощности, устанавливаемым непосредственно у потребителя [3, 5, 7, 8]. Новые технические решения проблемы КРМ позволяют получить эффект от вновь выявленных факторов.

Стоимость выработанной СД реактивной энергии зависит от его мощности и системы возбуждения. Авторами предложено использовать компенсационный выпрямитель (КВ) для питания обмотки возбуждения СД и предложена методика для определения мощности компенсационного выпрямителя [5]. Для мостовой схемы компенсационного выпрямителя, наиболее приемлемой по пульсациям выпрямленного напряжения, определены внешние характеристики преобразователя и предельные значения углов управления. Генерируемая компенсационным выпрямителем реактивная мощность емкостного характера при питании

выпрямителя непосредственно от сети без согласующего трансформатора может превышать номинальную мощность возбуждения в 2,5–4 раза.

Большинство электроприводов в промышленности и в коммунальном хозяйстве используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Питание асинхронного двигателя от преобразователя частоты, в частности, двухзвенного (ДПЧ), открывает возможности не только регулирования производительности машины, но и одновременной компенсации реактивной мощности в питающей сети при плавном автоматическом регулировании ее уровня [6]. Возможность уменьшения потребляемой мощности индуктивного характера и генерации в питающую сеть реактивной мощности емкостного характера присущи и другим техническим решениям. Например, матричный преобразователь частоты [7], используемый в частотно-регулируемом электроприводе для регулирования трехфазного напряжения и частоты на обмотках двигателя, обеспечивает высокое качество регулирования в нижней части диапазона с возможностью установки любых значений коэффициента сдвига тока на сетевом входе. Такие же возможности предоставляют и корректоры коэффициента мощности на основе повышающего импульсного регулятора [8]. Обеспечивая активную коррекцию коэффициента мощности, они предотвращают отбор несинусоидального тока из питающей сети.

Не переходя к дискуссии о преимуществах и недостатках различных схем преобразователей частоты в целях настоящей статьи о расчете и оптимизации управляющих воздействий - общих проблемах применения всех упомянутых технических решений, рассмотрим из этого перечня наиболее мощные и практически применяемые электроприводы с двухзвенными преобразователями частоты.

При использовании асинхронного двигателя на 380/220 В возможно включение обмоток двигателя в «треугольник» и в «звезду» [6]. Первый способ подключения двигателя к выходу преобразователя частоты с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока позволяет компенсировать реактивную мощность распределительной сети в три раза большую, чем при питании двигателя с включением обмоток в «звезду». Однако значения одинаковых углов управления вентилями анодной и катодной групп активного компенсационного выпрямителя диктуются механической нагрузкой на электродвигатель, при этом компенсационный преобразователь генерирует реактивную мощность в сеть «по остаточному принципу».

Вместе с тем, уровень генерируемой в распределительную сеть реактивной мощности емкостного характера требует непрерывной коррекции из-за непрерывного изменения нагрузки электроприемников, включенных параллельно на эту сеть, о чем свидетельствуют изменения мгновенного значения напряжения в сети.

Авторами предложены два способа решения этой проблемы [6]:

- использовать раздельное управление углами α_e и α_n вентилях групп, работающих соответственно при естественной и принудительной коммутации;
- применять наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения на выходе посредством изменения угла управления α_n КВ также и регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), изменяя степень регулирования $\gamma_{\text{шим}}$.

Такие подходы позволяют решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя, и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Изменением управления - в координатах α_e и α_n в допустимой для них области можно обеспечить обоснованное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах, которые зависят от технологической загрузки двигателя и установленной мощности компенсационного выпрямителя.

Однако при таком управлении преобразователем проявляется отрицательный фактор – гармоники тока в сети, в том числе и четные. Применение активного фильтра гармоник позволяет улучшить качество электрической энергии [10]. Кроме того, фаза гармоник у не-

скольких параллельно подключенных компенсационных выпрямителей изменяется при изменении угла управления и они могут взаимно компенсироваться. Если же применять в качестве преобразователей частоты автономные инверторы напряжения, питаемые от неуправляемых выпрямителей, обеспечивающих $\cos \varphi = 1$ во всем диапазоне регулирования скорости, то фазы гармоник подключенных параллельно преобразователей останутся всегда постоянными, гармоники от разных преобразователей будут суммироваться, усугубляя ситуацию.

Другая использованная авторами возможность – регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора посредством изменения степени ШИМ $\gamma_{\text{оëì}}$ независимо от напряжения на входе инвертора, то есть независимо от напряжения на выходе КВ, изменяемого углом управления $\alpha_{\text{и}}$, – позволяет обеспечить как заданные момент и скорость вращения двигателя, так и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности.

Задача управления рассматриваемыми системами электроприводов – найти оптимальное соотношение между значениями углов управления $\alpha_{\text{е}}$ и $\alpha_{\text{и}}$, в первом случае, и угла управления $\alpha_{\text{и}}$ вентилями компенсационного выпрямителя и степенью широтно-импульсной модуляции тока инвертора $\gamma_{\text{оëì}}$, во втором случае, доставляющие

$$\min(\text{tg } \varphi_{\text{сети}}) = \min_{\alpha_{\text{е}}, \alpha_{\text{и}}} \left(\frac{Q_{\text{сети}} - Q_{\text{КВ}}}{P_{\text{КВ}}} \right), \quad \min(\text{tg } \varphi_{\text{сети}}) = \min_{\alpha_{\text{и}}, \gamma_{\text{ШИМ}}} \left(\frac{Q_{\text{сети}} - Q_{\text{КВ}}}{P_{\text{КВ}}} \right), \quad (1)$$

где $Q_{\text{КВ}}$ и $P_{\text{КВ}}$ – реактивная и активная мощность компенсационного выпрямителя. Под управлением устройства оптимизации обеспечивается достижение указанных целевых функций.

Компенсация реактивной мощности – является одной из форм влияния рассматриваемых преобразователей на сеть. Это влияние зависит от степени регулирования выпрямленного напряжения на выходе звена постоянного тока [9]. При этом полная мощность, потребляемая преобразователем из сети, коэффициент мощности преобразователя и активная мощность на входе КВ находятся в соотношениях:

$$S = m U_{\phi} I_{\phi}; \quad K_{\text{м}} = \frac{\sqrt{6}N}{2\pi K_{\phi}} C_p; \quad P_{(1)} = m U_{\phi} I_{\phi(1)} \cos \varphi,$$

где $m; U_{\phi}; I_{\phi}; N; K_{\phi} = I_{\phi} / I_d; C_p = U_d / U_{d0}; I_{\phi(1)}; \cos \varphi$ соответственно: число фаз сети; действующее значение фазного напряжения сети; действующее значение тока фазы сети; число трехфазных схем с нулевым выводом, на которые можно разложить преобразователь; коэффициент формы тока; степень регулирования выпрямленного напряжения; действующее значение первой гармонической сетевого тока; коэффициент сдвига первой гармонической сетевого тока относительно напряжения сети.

Отсюда следует, что коэффициент мощности зависит, с одной стороны, от степени регулирования выходного напряжения выпрямителя, а с другой – от коэффициента сдвига и коэффициента искажений сетевого тока:

$$K_{\text{м}} = \frac{\sqrt{6}N}{2\pi K_{\phi}} C_p = \frac{I_{\phi(1)}}{I_{\phi}} \cos \varphi = K_u \cos \varphi,$$

$$\text{где } K_u = \frac{I_{\phi(1)}}{I_{\phi}} = \frac{I_{\phi(1)}}{\sqrt{I_{\phi(1)}^2 + \sum_{\kappa=2}^{40} I_{\phi(\kappa)}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_{\text{о.е.}}^2}},$$

и, в свою очередь, $I_{\phi(\kappa)}$ – действующее значение κ -й гармоники тока; $THD_{\text{о.е.}}$ – общее гармоническое искажение, выраженное здесь в относительных единицах.

Мощность искажений, которая является составляющей полной мощности S при несинусоидальной форме тока [10]:

$$T = mU_{\phi} \sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_{\phi(k)}^2} = S_{(1)} \sqrt{\frac{1}{K_u^2} - 1} = S_{(1)} THD_{o.e.}, \quad (2)$$

где $S_{(1)} = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2}$ - полная мощность первой гармоники. Тогда полная мощность, потребляемая из сети, $S = mU_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2 + T^2}$.

Для схемы, предложенной авторами в [6], использующей раздельное управление углами вентилей групп, работающих при естественной и принудительной коммутации, мостовая схема может быть представлена соединением двух нулевых схем, а действующее значение выпрямленного напряжения может быть представлено как:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} U_c \sin \frac{\pi}{6} [\cos \alpha_u + \cos(\gamma - \alpha_e)] \approx \frac{U_{d0}}{2} \cos \alpha_u + \frac{U_{d0}}{2} \cos \alpha_e, \quad (3)$$

где U_{d0} – максимальное напряжение КВ, то есть напряжение промежуточного контура постоянного тока, значение которого приближается к амплитуде линейного напряжения питающей сети $U_{d0} \approx \sqrt{2} U_n$.

С другой стороны, от углов α_e и α_u зависит и величина потребляемой активной и реактивной мощности, мощность искажения.

Так, без учета потерь в автономном инверторе ДПЧ и в двигателе, полезная потребляемая приводом активная мощность

$$P_{(1)} = mU I_{1(1)} \cos \varphi_{(1)}, \quad (4)$$

где m – число фаз преобразователя; $\varphi_{(1)}$ – сдвиг по фазе между основными гармониками первичного напряжения и первичного тока.

Реактивная мощность, потребляемая из сети,

$$Q_{(1)} = mU I_{1(1)} \sin \varphi_{(1)}. \quad (5)$$

Мощность искажений определяется высшими гармоническими составляющими тока (2), должна быть учтена при нахождении допустимых величин активной и реактивной мощностей, потребляемых из сети, которые равны соответствующим мощностям на входе КВ.

В схеме КВ с искусственной коммутацией обеих групп вентилей сетевой ток может содержать существенные по величине 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю и 17-ю гармоники. Многие авторы, в том числе [10], отмечают, что мощность искажения есть всегда и мало зависит от угла управления преобразователем. Зависимости для коэффициента искажения тока как преобразователей с естественной, так и преобразователей с искусственной коммутацией вентилей известны, например, [9, 10]. Однако следует принять во внимание рекомендации А.А. Булгакова относительно мощности искажений: высшие гармонические составляющие трудно учитывать, они более подвержены влиянию случайных факторов из-за колебаний напряжения сети и нагрузки. Точное описание искажения тока регулярными функциями не имеет смысла и практически невозможно. Для характеристики качества преобразования тока достаточно грубых интегральных оценок.

По экспериментальным данным зависимости $THD_{o.e.}$ от углов управления разными группами вентилей α_e и α_u определены уравнения линейной регрессии, приведенные на рис.1, для линий тренда, соответствующих граничным значениям углов управления. При изменении отношения индуктивности питающей сети к индуктивности в звене постоянного тока на два десятичных порядка коэффициенты вариации параметров уравнений линейной регрессии не превышают 14%. Степень достоверности аппроксимации R^2 высокая. Однако при изменении угла управления в альтернативной группе вентилей коэффициент наклона линии тренда меняет не только величину, но и знак. Авторы предлагают использовать в алгоритмах микропроцессорного управления соотношениями α_e , α_u и $\alpha_u, \gamma_{\text{шим}}$ опорную таб-

лицу значений $THD_{o,e}$ в зависимости от углов управления разными группами вентиляей α_e и $\alpha_{и}$ или от переменных $\alpha_{и}, \gamma_{ШИМ}$, в зависимости от структуры преобразователя частоты, с последующей интерполяцией для вычисления мощности искажений при определении ограничений на величины переменных управления.

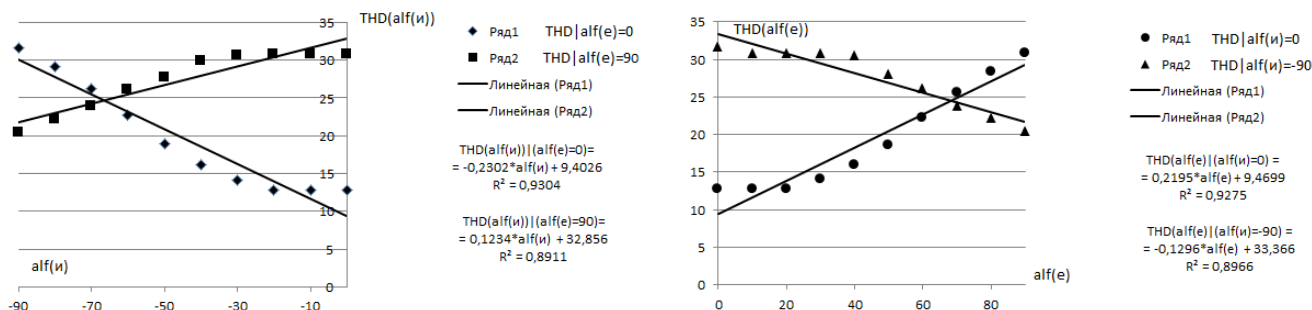


Рис. 1. Зависимости $THD_{i,d}$ от углов управления разными группами вентиляей α_e и $\alpha_{и}$

Поскольку $\cos\varphi = \cos(\alpha+\gamma/2)$, при допущении $\gamma/2 \cong 0$, можно считать, что $\varphi_{(1)} = \alpha$. Тогда реактивная мощность, генерируемая (потребляемая) КВ, будет:

$$Q_{КВ} = mU I_{1(1)} (\sin \alpha_e + \sin \alpha_u), \quad (6)$$

где $\alpha_{и} < 0$.

В этом случае требуется вычислить такие значения углов управления группами вентиляей α_e и $\alpha_{и}$, которые обеспечат как необходимое значение выпрямленного напряжения U_d , так и желаемую величину потребляемой или генерируемой в сеть реактивной мощности. Это достигается не только совместным решением уравнений (3) и (6). При вычислении углов необходимо исходить из резервов установленной мощности электрооборудования привода, принимая во внимание как мощность искажения, так и внешние характеристики КВ, определяющие необходимую величину U_d при заданной технологической мощности на валу двигателя.

Внешние характеристики преобразователя переменного тока в постоянный представляют собой зависимость среднего значения выпрямленного напряжения на нагрузке от среднего значения выпрямленного тока. Если допустить пренебрежимо малость активных сопротивлений сети и потерь в двигателе, тогда выражение для внешней характеристики трехфазной нулевой схемы, в которую собраны вентиляы, работающие с естественной коммутацией при угле управления α_e , примет вид:

$$U_{d\alpha e} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_{\phi} \cos \alpha_e - \frac{3}{2\pi} I_d x_s,$$

где x_s - индуктивное сопротивление сети.

Таким же будет уравнение внешней характеристики и для трехфазной нулевой схемы, в которую собрана группа вентиляей, работающих с опережающим углом управления α_u , если пренебречь вольтодобавкой, вносимой конденсатором коммутационного фильтра этой группы на интервале коммутации, которая компенсирует уменьшение выпрямленного напряжения за счет эффекта «перекрывтия».

На основании изложенного можно привести перечень задач идентификации (вычисления) и оптимизации в энергосберегающем управлении электроприводами:

1) распределение генерируемой реактивной мощности между имеющимися в узле нагрузки «классическими» средствами ее компенсации: конденсаторными батареями, фильтрокомпенсирующими установками, синхронными двигателями;

2) управление токами возбуждения СД, входящими в группу электроприводов, питаемых от единого узла нагрузки;

3) распределение генерируемой реактивной мощности между статорной обмоткой СД и компенсационным выпрямителем в цепи возбудителя;

4) распределение установленной мощности компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты электропривода переменного тока между технологической нагрузкой и реактивной нагрузкой, компенсирующей реактивную мощность в распределительной сети. При этом должны быть осуществлены вычисления мощности искажений, а также необходимой величины напряжения на выходе КВ с учетом внешней характеристики;

5) распределение генерируемой реактивной мощности между всеми имеющимися в узле нагрузки средствами ее компенсации.

Из перечисленных задач только 1), 2), 3) и 5) могут быть сведены к задачам математического программирования, алгоритмы решения которых приведены в [2, 11].

В основе предлагаемых алгоритмов решения задач идентификации и оптимизации лежит способ решения уравнений при помощи итераций. Известно, что при этом уравнение, записанное в неявной форме $F(x) = 0$, заменяется уравнением вида $x = f(x)$, равносильным данному. Это можно всегда сделать, и притом многими способами. Затем при грубом приближенном значении корня находится значение функции $f(x)$ при этом значении – первое приближение, которое подставляется в правую часть уравнения. Этот процесс можно продолжать неограниченно, получая числовую последовательность, члены которой с возрастанием номера будут приближаться к истинному значению искомого корня.

Решение нелинейных и нестационарных уравнений целесообразно осуществлять с использованием рекуррентных методов, которые, по сути, эквивалентны итерационным методам. В основе этого подхода лежит использование штрафной функции. С одной стороны, такая штрафная функция D принимается равной разности правой и левой части эквивалентного исходному нелинейного уравнения $D = f(x) - x = dx/dt$.

С другой стороны, штрафная функция используется в роли производной неизвестной (искомой) переменной, после интегрирования которой её текущие значения « x » подставляются в выражение, формирующее штрафную функцию.

Значение получаемой таким образом штрафной функции с течением времени уменьшается, а нелинейная система приходит в равновесие. В описанной процедуре несложно разглядеть принцип регулирования выходной переменной некоторого объекта с использованием интегрального регулятора.

Для моделирования непрерывных процессов используются языки Динамо, CSMP, Midas. Наиболее удобна для иллюстрации предложенных методов моделирования программа VenSim, широко используемая в Гарвардском университете и представляющая собой усовершенствованный язык Динамо [12]. Эта среда программирования предпочтительнее программного комплекса MATLAB Simulink благодаря своей универсальности, возможности производить как структурный, так и динамический анализ моделей, получать текстовую копию сконструированной структурной модели, фиксировать без дополнительного программирования результаты различных сценариев вычислительного эксперимента. На рис.2 приведена непрерывная вычислительная схема решения нелинейных и нестационарных уравнений математической модели системы управления электроприводом, выполненная в программе VenSim.

Следует отметить, что при использовании «неинтегральных» способов вычисления корня, процесс вычислений должен прерываться заранее предусмотренной процедурой, например, при достижении заданной точности [11]. Предложенный метод снимает проблему остановки вычислений, которые непрерывно производятся в процессе регулирования переменных состояния объекта.

На рис. 3 показана вычислительная схема (математическая модель процесса) решения,

реализующая алгоритм, предложенный ранее, и позволяющая решить комплексную задачу энергосбережения. Под управлением оптимизирующего устройства обеспечивается решение уравнений (3) и (6), а также достижение целевой функции

$$\min(\operatorname{tg} \varphi_{\text{сети}}) = \min_{\alpha_e, \alpha_u} \left(\frac{Q_{\text{сети}} - Q_{\text{КВ}}}{P_{\text{КВ}}} \right),$$

где $Q_{\text{сети}}$ – реактивная мощность, циркулирующая в распределительной сети и подлежащая компенсации; $\alpha_e = \alpha_1$, $\alpha_u = \alpha_2$.

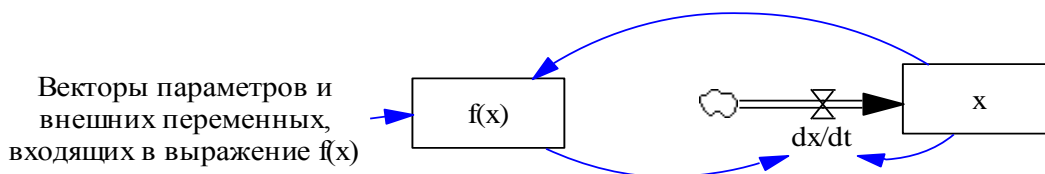


Рис. 2. Непрерывная вычислительная схема решения нелинейных и нестационарных уравнений математической модели системы управления электроприводом

Модель идентификации значений углов управления группами вентилей активного компенсационного выпрямителя

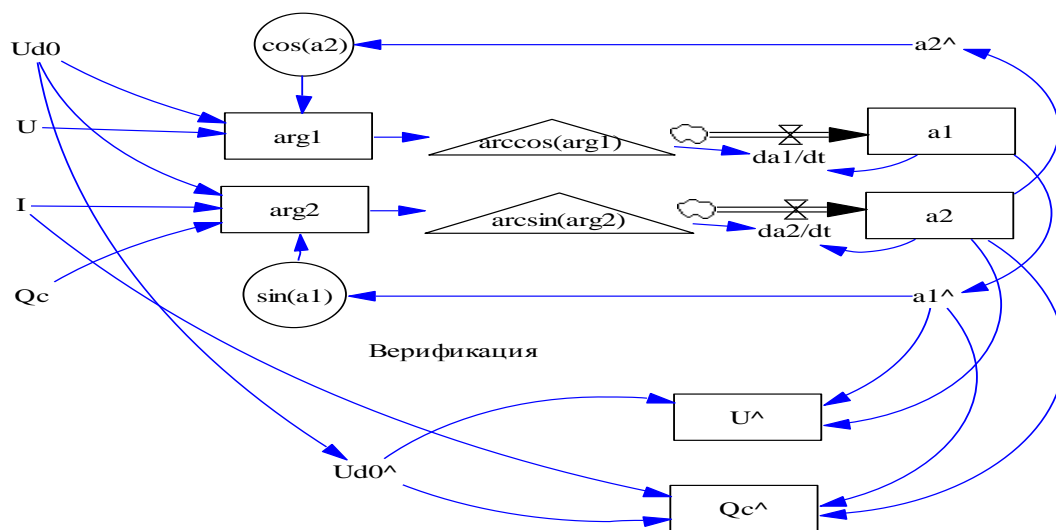


Рис. 3. Вычислительная схема (математическая модель процесса) решения нелинейных и нестационарных уравнений (3) и (6)

Выполнение указанных вычислений в системе управления электроприводом производится при помощи встроенных микроконтроллеров (МК) или программируемых логических контроллеров (ПЛК). Для реализации предложенной нелинейной схемы вычисления численными методами произведена дискретизация производной искомой величины по методу Эйлера:

$$D = \frac{dx}{dt} \cong \frac{\Delta x}{T_i} = (x_{i+1} - x_i) / T_i. \tag{7}$$

Тогда искомая переменная вычисляется рекуррентным разностным методом согласно выражению: $x_{i+1} = x_i + DT_i$. Определить аналитическим путем максимально допустимое значение T_i , не нарушающее сходимости решения в общем случае, не удастся из-за сложности исходной зависимости, однако это значение, принимаемое неизменным в пределах 0.02 - 0.1 от величины минимальной постоянной времени управляемого объекта, легко подбирается, обеспечивая быстрое решение согласно схеме на рис. 4.

Элемент задержки z^{-1} позволяет сделать необходимые подстановки значений x_i в $f(x)$ для получения величины x_{i+1} . Целесообразность использования рекуррентных разностных методов объясняется не только тем, что реализуются они в составе микропроцессорной системы, но и тем, что классические методы численного интегрирования при той же точности по объемам вычислений менее эффективны и не обладают той физической наглядностью, которую имеют методы цифрового моделирования.

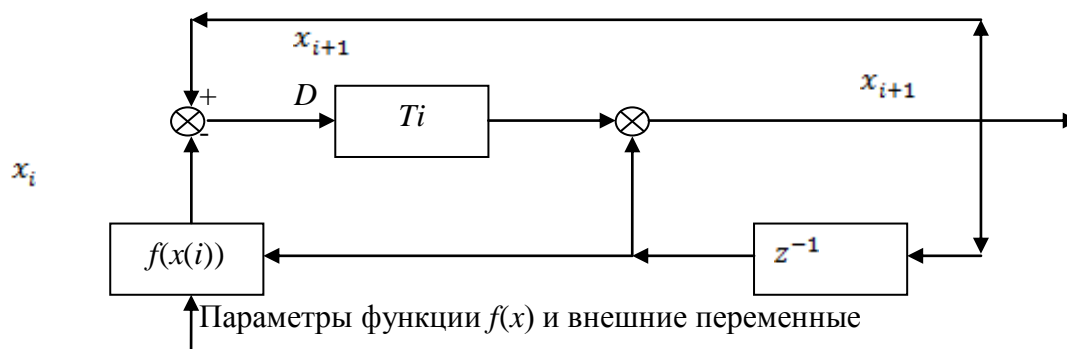


Рис. 4. Дискретная вычислительная схема решения нелинейных и нестационарных уравнений математической модели системы управления электроприводом

Лабораторные испытания дискретных вычислительных схем были произведены с применением микроконтроллера ATmega168 на платформе Arduino [13]. Программирование на языке С не только позволяет сосредоточиться на программировании одной лишь логики, не заботясь о машинном коде, не только может использоваться для программирования любого микропроцессора, но в наших целях это единственно возможный подход из-за необходимости использования библиотеки математических функций `<math.h>`. Однако на практике разработчики вынуждены применять ПЛК, как конструктивно законченное изделие, способное работать в тяжелых цеховых условиях при загрязненном воздухе, вибрациях, электрических помехах, осуществлять связи с ЭВМ верхнего уровня. Благодаря наличию языка структурированного текста ST, основой программ на котором служат выражения, алгоритмы были реализованы и на ПЛК S7-300.

Выводы

1. На основании изложенного сформирован перечень задач идентификации (вычисления) и оптимизации в энергосберегающем управлении электроприводами.
2. Для комплексной системы управления группой СД, обеспечивающей компенсацию реактивной мощности в распределительной сети. Авторами предложено использовать компенсационный выпрямитель для питания обмотки возбуждения СД и предложена методика для определения мощности компенсационного выпрямителя, разработан алгоритм численного моделирования процесса оптимизации режима работы системы, идентификации ее параметров и вычисления выходных переменных.
3. Частотно регулируемый электропривод переменного тока с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока преобразователя частоты является новым средством компенсации реактивной мощности, устанавливаемым непосредственно у потребителя. Он улучшает технико-экономические показатели системы электроснабжения, благодаря уменьшению потоков реактивной мощности во всех элементах сети от источников питания до потребителей. Это, в свою очередь, приводит к снижению потерь электроэнергии и к уменьшению затрат на их возмещение в структуре баланса.
4. В активном компенсационном выпрямителе звена постоянного тока частотно-управляемого электропривода авторами предложено использовать раздельное управление

углами вентилях групп, работающих при естественной и принудительной коммутации. При вычислении углов необходимо исходить из резервов установленной мощности электрооборудования привода, принимая во внимание как мощность искажения, так и внешние характеристики КВ, определяющие необходимую величину U_d при заданной технологической мощности на валу двигателя. Такой подход позволяет решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя, и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Под управлением оптимизирующего устройства обеспечивается либо достижение целевой функции – максимизации коэффициента мощности питающей сети, либо ограничение перенапряжений в узле нагрузки.

5. В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева предложено применять наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения на выходе КВ регулирование напряжения двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством широтно-импульсной модуляции. Изменением управления в координатах α_i и $\gamma_{\phi i}$ можно обеспечить обоснованное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах, которые зависят от технологической загрузки двигателя и установленной мощности компенсационного выпрямителя.

6. Идентифицирующие и оптимизирующие устройства, алгоритмы работы которых синтезированы на основе метода системной динамики, реализованы программно на языке С применительно к микроконтроллерам и на языке структурированного текста ST (МЭК) применительно к промышленным программируемым контроллерам.

7. В качестве программной среды для проверки вычислительных итерационных схем на работоспособность, устойчивость и быстродействие, а также для имитационного динамического моделирования электромагнитных процессов в электроприводе рекомендована программа VenSim.

Библиографический список

1. **Титов, В.Г.** Анализ использования синхронных двигателей в качестве компенсаторов реактивной мощности / В.Г.Титов, А.С. Плехов // Электрооборудование промышленных установок: труды Нижегород. гос. техн. ун-та / НГТУ. – Нижний Новгород, 2005. С. 5–7.
2. **Титов, В.Г.** Оптимизация электропотребления посредством управления возбуждением группы синхронных двигателей / А.С. Плехов, В.Г. Титов, М.Н. Охотников // V Международная (XVI Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводе АЭП-2007 / Санкт-Петербург, 2007.
3. Пат. на полезную модель № 78018. Полупроводниковый компенсатор реактивной мощности / А.И. Зайцев, А.С. Плехов. 2008.
4. **Вагин, Г.Я.** Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с нелинейными нагрузками / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Нижний Новгород, 2010. С. 93–97.
5. **Зайцев, А.И.** Применение компенсационных преобразователей в качестве источников реактивной мощности / А.И. Зайцев, А.С. Плехов, В.И. Рудницкий // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Нижний Новгород, 2008. С. 11–15.
6. **Плехов, А.С.** Технология энергосбережения в электроприводе / А.С. Плехов, М.Н. Охотников, В.Г. Титов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 1(86). С. 193–203.
7. Пат. на изобретение № RU 2395891 С1. Способ скалярного управления матричным преобразователем частоты / С.Н. Сидоров. 2009.
8. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
9. **Тихомиров, В.А.** Исследование и разработка компенсированного тиристорного преобразователя для электропривода постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук / В.А. Тихомиров. Горький, 1974.

10. **Тихомиров, В.А.** Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока / В.А. Тихомиров, В.Г. Титов, С.В. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2010. № 4(83). С. 190–204.
11. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978.
12. Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи / В.Н. Волкова [и др.]. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.
13. **Кашканов, А.О.** Разработка микропроцессорной платформы для управления компенсационным преобразователем / А.О. Кашканов, А.С. Плехов // Будущее технической науки: сб. мат. X междунар. молодеж. научно-техн. конф. / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. С. 88.

*Дата поступления
в редакцию 19.07.2011*

A.S. Plehov, M.N. Ohotnikov, V.G. Titov

PROBLEMS TO IDENTIFICATIONS AND OPTIMIZATION UNDER ECONOMY CONTROL OF ELECTRIC DRIVE AND ALGORITHMS OF THEIR DECISION

In purpose of the compensations to reactive power in distributing network of supply of the enterprise are considered calculations of the correlations angle control group valves of the compensation rectifier in section of the direct current electric drive, correlations between value of the corner of compensation converter control and degree to width-pulse inflexion of the output flow to energy of the inverter of the current. Dare the problems to optimization of the correlation current excitation in group of the synchronous engines and relative loading by reactive power of the engines and converters electric drives. The approaches are discussed to realization microprocessor identifying computing and optimizing device. They are offered computing schemes device to identifications and optimization, which are realized on microcontroller by means of program, written on language C and on language of the outline text ST in the event of using programmed logical controller. As ambiances for checking computing разностных schemes is used ambience of simulation dynamic modeling VenSim.

Key words: compensation to reactive power; энергосберегающее control electric drive; excitation control synchronous electric motors for compensation of the reactive power; controlled electric drive with compensation rectifier in section of the direct current of the converter of the frequency; relative boot by reactive power of the converters electric drive; the algorithms of the calculations; the algorithms to optimization.

УДК 621.039.533; 621.81-25.001.4

И.В. Друмов

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ РОТОРА ТУРБОМАШИНЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

ОАО «ОКБМ им. И.И. Африкантова»,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен расчет микропроцессорной системы управления положением ротора макета турбомашин ядерной энергетической установки. Найден оптимальный вариант структуры системы, обеспечивающий возможность управления положением ротором по заданным алгоритмам с достаточным быстродействием. Описанный метод может применяться для расчета микропроцессорных систем управления, предназначенных для регулирования.

Ключевые слова: микропроцессор, контроллер, система управления, ротор, турбомашин, ядерная энергетическая установка.

1. Постановка задачи

Для изучения принципиальных вопросов динамики ротора турбомашин ядерной энергетической установки был создан макет турбомашин [1], частично моделирующий условия эксплуатации натурной турбомашин. Микропроцессорные контроллеры являются основной логической частью системы управления положением ротора турбомашин ядерной энергетической установки [1, 2, 3]. Их основной задачей является обеспечение стабилизации ротора в центральном положении в соответствии с заданными алгоритмами и законами управления. Для выполнения этих функций контроллеры должны обладать достаточным быстродействием, возможностями по вводу сигналов от датчиков (положения ротора, частоты вращения) и выводу сигналов управления на исполнительные устройства (обмотки электромагнитов). Эти характеристики являются определяющими для структуры системы, построенной на базе микропроцессорных контроллеров. Таким образом, задача выбора структуры и состава контроллеров сводится к последовательному решению следующих задач:

- определение состава функций, возлагаемых на контроллеры;
- расчет быстродействия различных вариантов построения системы;
- выбор оптимальной структуры и состава компонентов.

Далее представлено последовательное решение этих задач.

2. Анализ функциональной нагрузки

Управление положением ротора путем формирования сигналов управления токами в обмотках электромагнитов в режиме реального времени производится по сигналам, получаемым от преобразователей датчиков осевого и радиального смещения, углового положения и частоты вращения ротора. Алгоритмы и законы управления положением ротора реализуются в программном обеспечении контроллера, устанавливаемом в его дисковую память и функционирующем в его оперативной памяти. Сформированные сигналы управления подаются во входные цепи управления регуляторов тока в обмотках электромагнитов.

Для реализации управления положением ротора контроллеры должны обеспечивать выполнение следующих функций [2]:

- аналого-цифровое преобразование электрических сигналов, получаемых от преобразователей датчиков осевого и радиального смещения, углового положения и частоты вращения ротора в форме напряжения в диапазоне от минус 5 до 5 В;

- масштабирование принятых значений сигналов в соответствии с измерительными характеристиками измерительных каналов (датчик – преобразователь датчика);
- регулирование положения ротора по пропорционально-интегрально-дифференциальному закону;
- формирование вектора виртуальных сил;
- формирование сигналов управления токами в обмотках электромагнитов;
- цифро-аналоговое преобразование сигналов управления для подачи во входные цепи управления регуляторов тока в обмотках электромагнитов.

В составе системы управления выделяются отдельные каналы, каждый из которых должен обеспечить управление положением ротора по одной координате. Количество таких каналов определяется количеством координат и для рассматриваемой системы [2] равно девяти.

Аналогово-цифровое преобразование представляет собой преобразование аналогового сигнала датчика (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от минус 5 до 5 В) в n -разрядное двоичное число. Количество разрядов числа (n) определяется требованиями к точности измерения сигнала. В состав преобразуемых сигналов входят сигналы смещения ротора по всем осям всех подшипников, а также частота вращения ротора и его угловое положение. Общее количество входных сигналов для обеспечения управления положением ротора составляет 11 шт.

Масштабирование принятых значений сигналов представляет собой пересчет полученных значений входных сигналов в форме n -разрядных двоичных чисел в значения переменных, имеющих размерность и масштаб измеряемых физических величин в соответствии с измерительными характеристиками измерительных каналов "датчик – преобразователь датчика". Измерительная характеристика представляет собой зависимость значения физической величины от значения входного сигнала и в общем случае является нелинейной. Масштабирование производится путем интерполяции (кусочно-линейной или полиномиальной) принятого значения сигнала в границах допустимого диапазона значений входных сигналов.

Регулирование положения ротора по пропорционально – интегрально - дифференциальному закону представляет собой вычисление значения тока I_{reg} в текущий момент времени t по формуле:

$$I_{reg}(t) = K_p S(t) + K_d \frac{S(t) - S(t - \Delta t)}{\Delta t} + K_i S(t) \Delta t + K_i \Delta t \sum_{i=1}^n S(t - i \Delta t), \quad (1)$$

где t – время, с; K_p – коэффициент пропорциональности регулятора, А/мм; $S(t)$ - смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени t , мм; K_d – коэффициент дифференцирования регулятора, А·мм/с; Δt – время цикла работы управляющего контроллера, с; $S(t - \Delta t)$ – смещение ротора по регулируемой координате относительно центрального положения в момент времени $t - \Delta t$, мм; K_i – коэффициент интегрирования регулятора, А/(мм·с); n – количество циклов работы контроллера с момента включения регулятора; i – номер цикла контроллера.

Формирование вектора виртуальных сил представляет собой вычисление значения тока коррекции I_c по формуле:

$$I_c = I_a \cdot \sin(\alpha + \varphi), \quad (2)$$

где I_a – величина вектора виртуальных сил, А; α – угловое положение ротора, рад; φ – угловое направление вектора виртуальных сил по оси I , рад;

При этом формирование вектора производится не постоянно, а только при определенных значениях частоты вращения ротора f (когда это значение находится в пределах одного из диапазонов резонансных частот ротора турбомашин).

Значения величины I_a и α могут быть заданы двумя способами:

- по результатам экспериментального подбора значений, обеспечивающих приемлемую амплитуду колебаний ротора в рамках установленных резонансных частот ротора;
- путем оценки амплитуды колебаний ротора и фазы колебаний ротора относительно регулируемой координаты по методу дискретного преобразования Фурье для выбранной частоты (примем к рассмотрению этот вариант, как требующий наибольшего количества вычислений).

Формирование сигналов управления токами в обмотках электромагнитов представляет собой вычисление значений выходных напряжений контроллера для управления двумя противоположными обмотками электромагнитов по управляемой координате. Обмотки электромагнита условно обозначим как «левую» и «правую». Выбор осуществляется в зависимости от настройки датчика смещения ротора: если прижать ротор к «левой» обмотке, то смещение ротора будет отрицательным, если прижать ротор к «правой» обмотке то смещение ротора будет положительным. Далее представлены формулы, по которым формируется выходной сигнал регулятора положения вала:

$$U_L = 5 \cdot \frac{I_{ref_L} - I_{reg}}{I_{max}} \quad (3)$$

и

$$U_R = 5 \cdot \frac{I_{ref_R} - I_{reg}}{I_{max}}, \quad (4)$$

где U_L и U_R – напряжения на выходах контроллера, подаваемые на усилители мощности "левой" и "правой" обмоток электромагнитов, В; I_{max} – предельное максимальное значение тока в обмотке электромагнита, которое может сформировать усилитель мощности, А; I_{ref_L} и I_{ref_R} – токи смещения "левой" и "правой" обмоток электромагнита, т.е. постоянные составляющие, добавляемые в сигнал управления обмоток электромагнита совместно с переменной составляющей (током выхода регулятора), А; I_{reg} – значение тока, формируемое регулятором в момент времени t в зависимости от положения ротора по формуле (1), А.

Далее полученные значения выходных напряжений контроллера U_L и U_R необходимо привести в соответствие с диапазоном входного сигнала регуляторов тока (напряжение от 0 до 5 В) следующим образом:

- если полученное значение выходного напряжения контроллера меньше 0 В, то на выход подается 0 В;
- если полученное значение выходного напряжения контроллера больше 5 В, то на выход подается 5 В;
- если полученное значение выходного напряжения контроллера находится в пределах от 0 до 5 В, то на выход оно подается без изменений.

Цифро-аналоговое преобразование представляет собой преобразование n -разрядного двоичного числа в аналоговый сигнал (в данном случае в форме напряжения в диапазоне от 0 до 5 В). Количество разрядов числа (n) определяется требованиями к точности выдачи сигнала. В состав преобразуемых сигналов входят выходные напряжения для управления токами во всех полюсах всех радиальных и осевого подшипников. Общее количество выходных сигналов для обеспечения управления положением ротора составляет 18.

3. Расчет быстродействия и выбор оптимальной структуры

Для реализации заданных функций в составе средств вычислительной техники системы управления предусматриваются:

- ПЭВМ пульта управления;

- контроллеры управляющие согласующие;
- контроллеры управляющие;
- локальные вычислительные сети.

Основной функцией системы управления, требующей высокого быстродействия, является управление положением ротора по всем координатам, реализуемое управляющими контроллерами. Для построения контроллера предусматривается промышленный микропроцессорный контроллер, обеспечивающий реализацию назначенных функций. Далее рассмотрим их структуру.

Выполнение этих функций предусматривает реализацию девяти независимых регуляторов положения ротора. Выполнение этих функций может быть реализовано последовательно на одном контроллере или параллельно на нескольких контроллерах. Увеличение количества контроллеров позволяет увеличить быстродействие системы. Низкое быстродействие, вызванное уменьшением количества контроллеров, снижает возможности системы управления по отработке внешних возмущений на высоких частотах, вызываемых вращением ротора, резонансными эффектами и другими внешними силами, прилагаемыми к ротору.

Требования в части быстродействия к системе управления в целом и к структуре управляющих контроллеров, в частности, сводятся к выбору и обоснованию постоянной времени для каждого компонента системы. Состав и структура управляющих контроллеров должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить значение постоянной времени контроллера, которое не превышает требуемого значения. К настоящему времени это значение не выбрано, однако ранее проведенные экспериментальные проработки показали обоснованность выбора постоянной времени на основе сравнения быстродействия разных вариантов структуры управляющих контроллеров с показателями динамики ротора в рабочем диапазоне частот. Далее представлен расчет быстродействия системы при различном количестве контроллеров.

Оценка постоянной времени контроллера производится следующим образом:

- на основании анализа алгоритмов управления и других функциональных требований оценивается количество вычислительных и других операций различных типов (элементарных операций), выполнение которых возложено на контроллер;
- на основании экспериментальных данных оценивается время выполнения элементарных операций всех типов контроллерами различной вычислительной мощности;
- оценивается время выполнения набора операций, требуемого для реализации всех функций контроллера для различных вариантов структуры и вычислительной мощности контроллера.

Таблица 1

Количество операций по типам, требуемых для реализации одного независимого регулятора положения ротора

Функция, реализуемая в составе регулятора	Количество операций по типам							
	×	÷	+	-	≥	=	АЦП (опер.)	ЦАП (опер.)
1. Аналого-цифровое преобразование (функция)	0	0	0	0	0	0	3	0
2. Масштабирование	9	0	5	0	0	0	0	0
3. Регулирование	2	1	1	1	0	1	0	0
4. Формирование вектора виртуальных сил	16	0	9	0	0	0	0	0
5. Формирование сигналов управления	6	2	1	1	4	4	0	0
6. Цифро-аналоговое преобразование (функция)	0	0	0	0	0	0	0	2
ИТОГО	33	3	16	2	4	5	3	2

Далее производится расчет угла, на который успеет повернуться ротор за время, эквивалентное постоянной времени контроллера. На основании значений этих углов производится выбор оптимальной структуры контроллеров, обеспечивающей достаточно малый угол поворота ротора на частоте вращения, соответствующей верхней границе рабочего диапазона частот.

Количество операций по типам, требуемых для реализации одного независимого регулятора положения ротора, представлено в табл. 1.

Общее время выполнения всех операций, требуемых для реализации одного независимого регулятора положения ротора в данном случае, будет вычисляться по формуле:

$$t_{\text{общее}} = 33 \cdot t_{\text{умножения}} + 3 \cdot t_{\text{деления}} + 16 \cdot t_{\text{сложения}} + 2 \cdot t_{\text{вычитания}} + 4 \cdot t_{\text{сравнения}} + 5 \cdot t_{\text{присвоения}} + 3 \cdot t_{\text{ацп}} + 2 \cdot t_{\text{цап}}, \quad (5)$$

где t – время выполнения одной операции каждого типа.

Необходимо отметить, что при расчете учтены только алгоритмы, экспериментально отработанные на имеющемся стенде [1]. Другие алгоритмы управления, такие как фильтрация, компенсация нелинейности силовой характеристики магнитов также могут быть учтены с использованием описанной методики путем добавления в формулу времени выполнения этих функций.

Для получения данных о времени выполнения элементарных операций проведены экспериментальные оценки по результатам выполнения 10 млн операций каждого типа контроллеров трех типов (по вычислительной мощности). Технические характеристики контроллеров представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики контроллеров различной вычислительной мощности, использовавшиеся для выполнения оценки

Вариант	А	Б	В
Тип микроконтроллера	6040	5066	CPU686
Системная шина	ISA 8-разр.	ISA 8-разр.	ISA 8-разр.
Процессор	Intel 386SX 25 МГц	AMD 5x86 133МГц	Geode GXLV 200МГц
Сопроцессор	Нет	Есть	Есть
Память ОЗУ, Мбайт	2	32	32
Каналы аналогового ввода	Встроенные в плату – 8	Плата АП16-5А-1 – 8 дифференциальных	Плата АП16-5А-1 – 8 дифференциальных
Каналы аналогового вывода	Встроенные в плату – 2	Плата А016-V16 – 16	Плата А016-V16 – 16

Для проведения экспериментов выбраны имеющиеся в наличии платы, что не исключает использования в дальнейшем более дешевых плат, обладающих аналогичными показателями, но изготовленных другими производителями или плат с более высокими показателями.

Время выполнения элементарных операций по типам для различных вариантов вычислительной мощности контроллера представлено в табл. 3.

Различные варианты построения структуры управляющего контроллера представлены в табл. 4. Рассчитанное значение постоянной времени для этих вариантов структуры КУ представлено на рис. 1.

Таблица 3

Время выполнения элементарных операций по типам для различных вариантов вычислительной мощности, $\cdot 10^{-9}$ с

Операция	Вариант		
	а	б	В
	6040	5066	CPU686
АЦП	15000	15000	15000
Умножение	16560	167	45
Деление	37180	636	195
Сложение	5381	144	45
Вычитание	5806	144	45
Сравнение	3164	129	80
Присвоение	8581	334	55
ЦАП	15000	15000	15000

Таблица 4

Различные варианты построения структуры контроллера

Номер варианта структуры	Количество контроллеров	Количество регуляторов положения ротора в одном контроллере максимальное
1	1	9
2	2	5
3	3	3
4	5	2
5	9	1

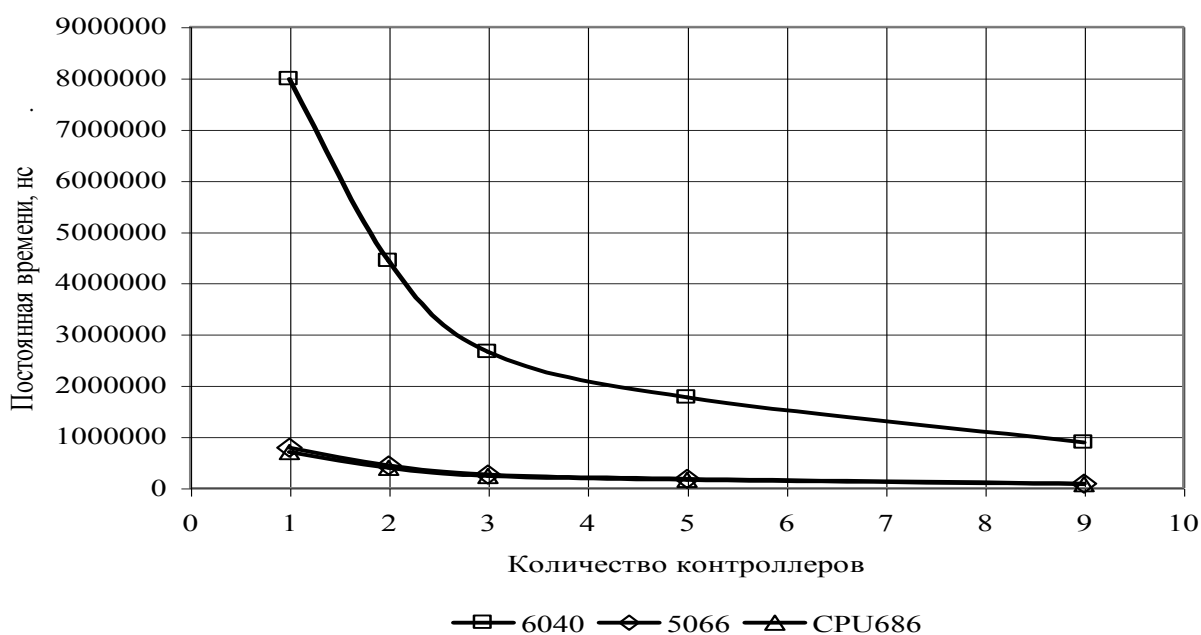


Рис. 1. Рассчитанное значение постоянной времени для различных вариантов структуры контроллеров и вычислительной мощности

Из графика видно, что постоянная времени контроллеров 6040 достаточно велика и составляет от 0,9 до $8 \cdot 10^{-3}$ с в зависимости от количества контроллеров. Постоянная времени контроллеров 5066 и CPU686 значительно меньше постоянной времени контроллеров 6040 и составляет от 0,08 до $0,8 \cdot 10^{-3}$ с. Такое различие (в ~ 10 раз) объясняется отсутствием математического сопроцессора в контроллере 6040 и низкой тактовой частотой (25 Гц).

Далее рассчитаем угол α , на который успеет повернуться ротор за время, эквивалентное постоянной времени контроллеров. Верхняя граница рабочего диапазона частот составляет $60 \cdot \text{с}^{-1}$. Время T , за которое ротор совершает один оборот на 360° , составляет $0,0166 \text{ с}$ – период вращения ротора. Угол α вычисляется по формуле:

$$\alpha = 360 \cdot \frac{t_{\text{общее}}}{T}, \quad (6)$$

где $t_{\text{общее}}$ – постоянная времени контроллеров; T – период вращения ротора.

Рассчитанные значения углов α для рассматриваемых вариантов структуры контроллеров и их вычислительной мощности контроллеров представлены на рис. 2.

Как видно из графика, угол α , получаемый при использовании одного контроллера 6040, достигает почти 180° , что представляется недопустимым, так как в этом случае входное воздействие на контроллер не компенсируется регулятором, а наоборот усиливается, и в результате возникают биения ротора о страховочные подшипники.

По результатам экспериментальных проработок на макете ротора значение угла α , равное 15° , обеспечивает амплитуду колебаний ротора до 150 мкм при частоте вращения до 95 с^{-1} . Исходя из консервативных предпосылок, принимаем, что предельное значение угла α для рассчитываемой системы должно быть менее 5° .

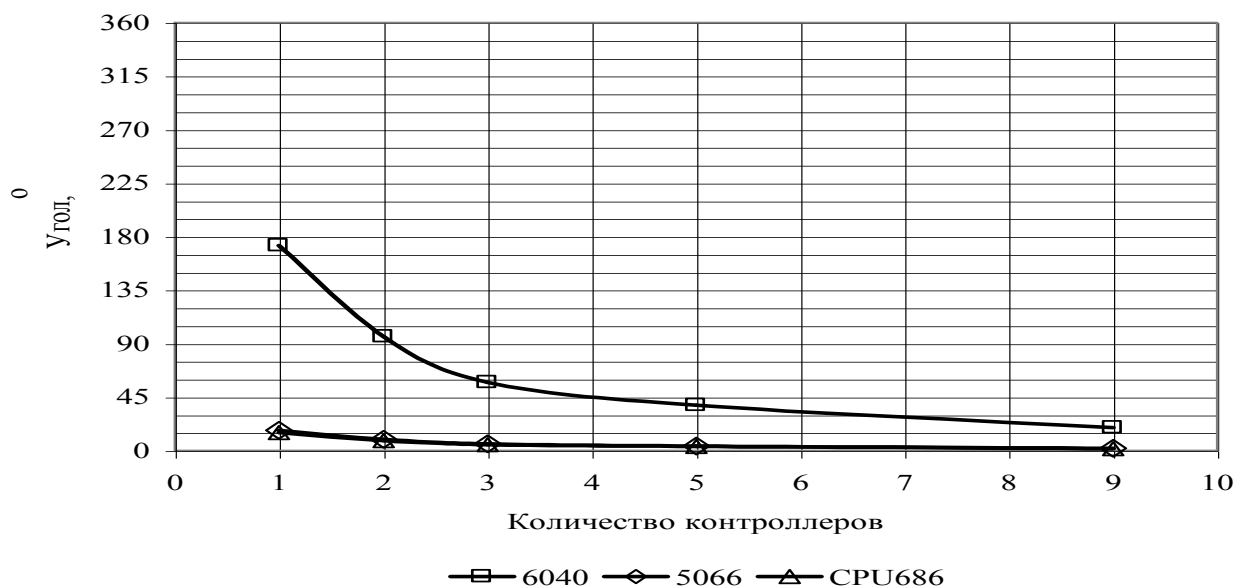


Рис. 2. Рассчитанные значения углов α для рассматриваемых вариантов структуры КУ и вычислительной мощности контроллеров

Таким образом, из рассмотрения исключаются все варианты с контроллером 6040, а также варианты с контроллерами 5066 и CPU686 с 1, 2 и 3 контроллерами. Структура контроллера в рамках рассматриваемой системы управления может быть построена на базе пяти или девяти контроллеров. В первом случае каждый контроллер обслуживает две оси регули-

рования. Во втором случае каждый контроллер обслуживает одну ось регулирования. Для дальнейшей проработки принимается вариант с пятью контроллерами, так как он обеспечивает более полные возможности по модернизации алгоритмов управления в части взаимосвязей осей регулирования.

Контроллер CPU686 обеспечивает лучшие скоростные показатели по сравнению с 5066 за счет повышенной тактовой частоты, поэтому для построения управляющего контроллера принимается этот вариант. Постоянная времени контроллера для выбранного варианта составляет 156950 нс, быстродействие (частота дискретизации), соответственно 6371 с^{-1} .

В настоящее время на рынке промышленных контроллеров уже появились процессорные платы, оснащенные процессорами с тактовой частотой 800 МГц и более. В дальнейшем возможно увеличение этого показателя и соответственно увеличение быстродействия.

На рис. 3 приведена оценка значения угла α выбранного варианта для рабочего диапазона частот и выше, что позволит оценить выбранный вариант построения системы управления с точки зрения модернизации в случае изменения требований по рабочему диапазону частот.

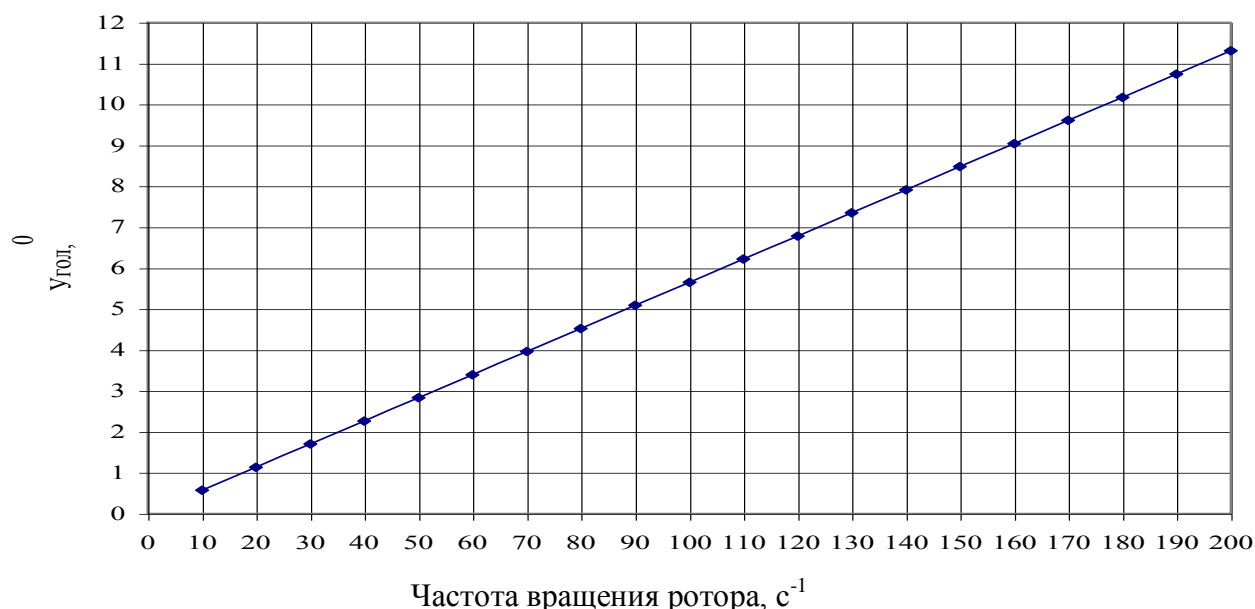


Рис. 3. Оценка значения угла α выбранного варианта для рабочего диапазона частот и выше

Вывод

Описанный метод расчета отработан при создании системы управления макетом ротора турбомшины [1, 2, 3] и может применяться для расчета микропроцессорных систем управления, предназначенных для регулирования.

Библиографический список

1. **Kodochigov, N.G.** Control system of electromagnetic bearing / N.G. Kodochigov [at al.] // 5. Workshop Magnetlagertechnik. Tagungsband. September 2001. Zittau-Kassel. ФРГ. Р. 59–68.
2. **Kodochigov, N.G.** Calculation and substantiation of the structure and composition of microprocessor controllers in the digital control system of electromagnetic suspension multisupport system /

- N.G. Kodochigov [at al.] // 6. Workshop Magnetlagertechnik. Tagungsband. September 2003. Kassel. Germany. P. 161–169.
3. **Mitenkov, F.M.** Electromagnetic Suspension of Vertical Turbomachine For Nuclear Power Plant / F.M. Mitenkov [at al.] Khodykin // Proceedings of conference "PHYSICON2003" Sanct -Peterburg, Russia, 2003. С. 146–151.

*Дата поступления
в редакцию 19. 07.2011*

I.V. Drumov

MICROPROCESSOR-BASED POSITION CONTROL SYSTEM OF A TURBOMACHINE ROTOR FOR NUCLEAR POWER PLANT

A calculation of microprocerssor-based position control system of a turbomachine rotor for nuclear power plant is presented. Optimum alternative of system structure is found, it provide a possibility to control of rotor position according to specified algorithms with sufficient operating speed. Described method may be used for calculation of microprocerssor-based control system, aimed for regulation.

Key words: microprocessor, controller, control system, rotor, turbomachine, nuclear power plant.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620(186.4+179.16)

А.В. Гончар, В.В. Мишакин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 15ЮТА НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ КОНТРОЛЯ

Нижегородский филиал института машиноведения РАН

Исследуется процесс развития микропластических деформаций зерна и образования полос скольжения, а также изменение скорости распространения упругих волн при усталостном разрушении стали 15ЮТА. Получена высокая корреляционная связь, близкая к линейной, между концентрацией грубых полос скольжения и величиной микропластической деформации при различных значениях амплитуды нагружения (от 275 до 336 МПа). Интенсивность изменения микропластической деформации в зависимости от концентрации полос скольжения предлагается использовать в качестве диагностического параметра для прогнозирования количества циклов нагружения, соответствующего появлению макротрещины. Исследования показали неоднозначное поведение скорости распространения упругих волн по мере исчерпания ресурса материала, что можно объяснить двумя факторами: накоплением микроповреждений и влиянием изменения кристаллографической текстуры в процессе упругопластического циклического деформирования.

Ключевые слова: неразрушающий метод контроля, усталостное разрушение, металлография, полосы скольжения, циклическое нагружение, ультразвук, оптический метод.

Одним из самых опасных видов разрушения является усталостное. Так, из акта технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС, по результатам комплексных исследований выявлено, что основной причиной аварии, а именно разрушения шпилек, является развитие усталостной поврежденности [1].

Множество стальных конструкций и деталей машин подвергаются многократным нагрузкам, напряжения которых лежат ниже макроскопического предела текучести. Тем не менее, в отдельных микрообластях материала наблюдаются микропластические деформации, где и происходит процесс накопления рассеянных микроповреждений, что, в конечном итоге, приводит к появлению макротрещин и окончательному разрушению материала [2].

Появление пластических микродеформаций при упругих макродеформациях обусловлено неоднородностью свойств, напряжений и деформаций второго рода.

В соответствии с критериями пластичности при сложном напряжённом состоянии пластические микродеформации возникают в так называемых “слабых” зонах [2], где интенсивность напряжения превышает предел текучести. В работе [3] показано, что при любой схеме напряженного состояния показатели относительной неоднородности поля интенсивностей напряжений и деформаций в кубических поликристаллах зависят только от свойств материала, т.е. пропорциональны анизотропии упругих свойств зерен, а в материалах с гексагональной и тетрагональной решеткой зерен – от величины напряжений, деформаций и схемы напряжённого состояния.

Известно, что по мере циклирования, как правило, в зернах феррита поликристаллического материала образуются линии скольжения часто по двум пересекающимся плоско-

стям. В зернах, где действует в основном одна из систем скольжения, образуются более грубые полосы скольжения, из которых по мере циклирования образуются глубокие устойчивые полосы скольжения [4]. В поликристаллических материалах размеры полос скольжения ограничены размерами зерен.

Рельеф полос скольжения представляет собой чередующиеся выступы (экструзии) и впадины (интрузии). Интрузии представляют собой промежуток между двумя соседними экструзиями и даже не достигают уровня недеформированной поверхности. Скорость роста интрузий составляет от 1 до 10 нм/цикл [4].

Исследования показывают, что между поверхностью материала и экструзией возникает концентратор напряжения, который может привести к зарождению усталостной трещины. Согласно такой модели, трещины должны образовываться в местах сильной концентрации скольжения, т.е. в основаниях интрузий [4].

Экспериментально установлено, что локальная амплитуда пластической деформации в УПС постоянна и в 100 раз выше, чем в окружающей матрице.

Установлено, что при циклическом деформировании устойчивые полосы скольжения являются главными носителями пластической деформаций [4]. Исследования показали, что усталостное разрушение сопровождается изменением характеристик распределения микропластических деформаций [3].

Как правило, микропластические деформации измеряются методом сеток, размер которых больше или соизмерим с размером зерна [5].

Исследование связи деформаций на уровне зерна и процесса локализации деформации в виде полос скольжения внутри зерна является актуальной задачей, так как эти процессы играют важную роль при усталостном разрушении металлов.

Исследования показывают, что период накопления рассеянной микроповрежденности составляет более 80% от общей долговечности материалов [4].

Важным является также то, что структурные изменения позволяют использовать методы неразрушающего контроля (НК) для диагностики состояния материалов. Процесс развития микропластических деформаций и формирования полос скольжения можно контролировать оптическим методом как в лабораторных условиях, так и непосредственно на конструкции, например, с помощью переносной оптической установки СПЕКТР МЕТ [6].

Однако необходим контроль деградации материала не только на поверхности изделия, но и во всём объёме. Среди методов неразрушающего контроля, кроме оптического, можно выделить акустический метод исследования.

Целью данной работы является изучение связи усталостного разрушения с развитием микропластических деформаций и формированием полос скольжения на примере низкоуглеродистой стали 15ЮТА, а также влияния усталостного нагружения на акустические параметры.

Сложные преобразования структуры при деформировании сплавов не дают возможности построить единую теорию, связывающую структурные изменения с параметрами распространения упругих волн.

При усталостном нагружении в отсутствии аллотропических изменений на скорости распространения упругих волн (СР УВ) могут влиять, по крайней мере, два фактора – формирование кристаллографической текстуры, которая приводит к анизотропии упругих свойств материала [7], и накопление микроповреждений, в том числе микропор, микротрещин.

Влияние разрыхления материала, которое происходит при образовании микропор, микротрещин, на СР УВ в текстурированных материалах можно учесть, используя аналитические зависимости модулей упругости от концентрации и среднего размера трещин, приведенные в [8]. Учитывая выводы этих работ, можно записать:

$$K = K_0 + k_1\psi; \quad \mu = \mu_0 + k_2\psi; \quad (1)$$

где K_0 , K – модули объемного сжатия до и после образования несплошностей; μ_0 , μ – модули сдвига до и после образования пор; k_1, k_2 – коэффициенты; ψ – структурная поврежденность, связанная с разуплотнением материала:

$$\psi = (\rho_0 - \rho) / \rho_0, \quad (2)$$

ρ_0 и ρ – плотности материала до и после образования пор.

Связь скоростей объемных волн с характеристиками кристаллографической текстуры приведена в [7]. Учитывая выражения (1)-(2), а также зависимости скоростей объемных УВ от коэффициентов функции распределения ориентировок, можно записать:

$$V_{zx}^2 = \mu(\psi) / \rho(\psi) - c(\psi) \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_4^{00} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_4^{20} \right) \frac{1}{\rho(\psi)}; \quad (3)$$

$$V_{zy}^2 = \mu(\psi) / \rho(\psi) - c(\psi) \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_4^{00} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_4^{20} \right) \frac{1}{\rho(\psi)}; \quad (4)$$

$$V_{zz}^2 = \left(K(\psi) + \frac{4\mu(\psi)}{3} \right) / \rho(\psi) + \frac{32}{35} \sqrt{2} \pi^2 W_4^{00} c(\psi) / \rho(\psi), \quad (5)$$

где W_4^{20} , W_4^{00} – коэффициенты функции распределения ориентировок (ФРО); V_{zx} и V_{zy} – скорости поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката и распространяющихся перпендикулярно поверхности; V_{zz} – скорость продольных волн, распространяющихся в том же направлении, $c = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}$; c_{ij} – модули упругости монокристаллов в поликристаллическом материале.

Для исследования влияния усталостного разрушения на структуру и акустические свойства материала использовались образцы, вырезанные вдоль направления проката из листовой горячекатаной стали 15ЮТА. Образцы подвергались симметричному циклическому нагружению по схеме консольного изгиба с частотой 9 Гц. Химический состав стали 15ЮТА: С 0,09-0,15 %; Si 0,5-0,8 %; Mn 0,8-1,2 %; Cr, Ni, Cu не более 0,3%; Al и Ti не более 1,5%. Геометрические размеры образцов – 120x20x3 мм. В середине образцов был выполнен концентратор напряжения полукруглой формы для локализации упругопластической деформации. Каждая серия испытаний включала 10-15 тысяч циклов. Испытания проводились при нормальных условиях до появления макротрещины. После каждой серии испытаний проводились ультразвуковые измерения и металлографические исследования.

Изучение микроструктуры материала проводилось оптическим методом с помощью переносного металлографического комплекса СПЕКТР.

Фотографии микроструктуры, исследуемой в зоне концентратора, приведены на рис. 1, а-в (для материала в исходном состоянии рис. 1, а, после 100 000 циклов нагружения рис. 1, б и после образования усталостной макротрещины (222 000 циклов) рис. 1, в). Структура исследуемой стали состоит из перлита и феррита. Средний размер диаметра зерна составил 8 мкм. Как видно из фотографий поверхности микрошлифов, после первой серии усталостных испытаний в некоторых зернах появляются полосы скольжения в виде тонких линий. После нескольких серий эксперимента наблюдается как увеличение длины и ширины полос скольжения, так и образование новых, появляются темные пятна – что связано со стесненным поворотом и фрагментацией зерен в процессе разрушения материала, которое приводит к изменению условий отражения света (угла отражения и коэффициента отражения) от поверхности материала.

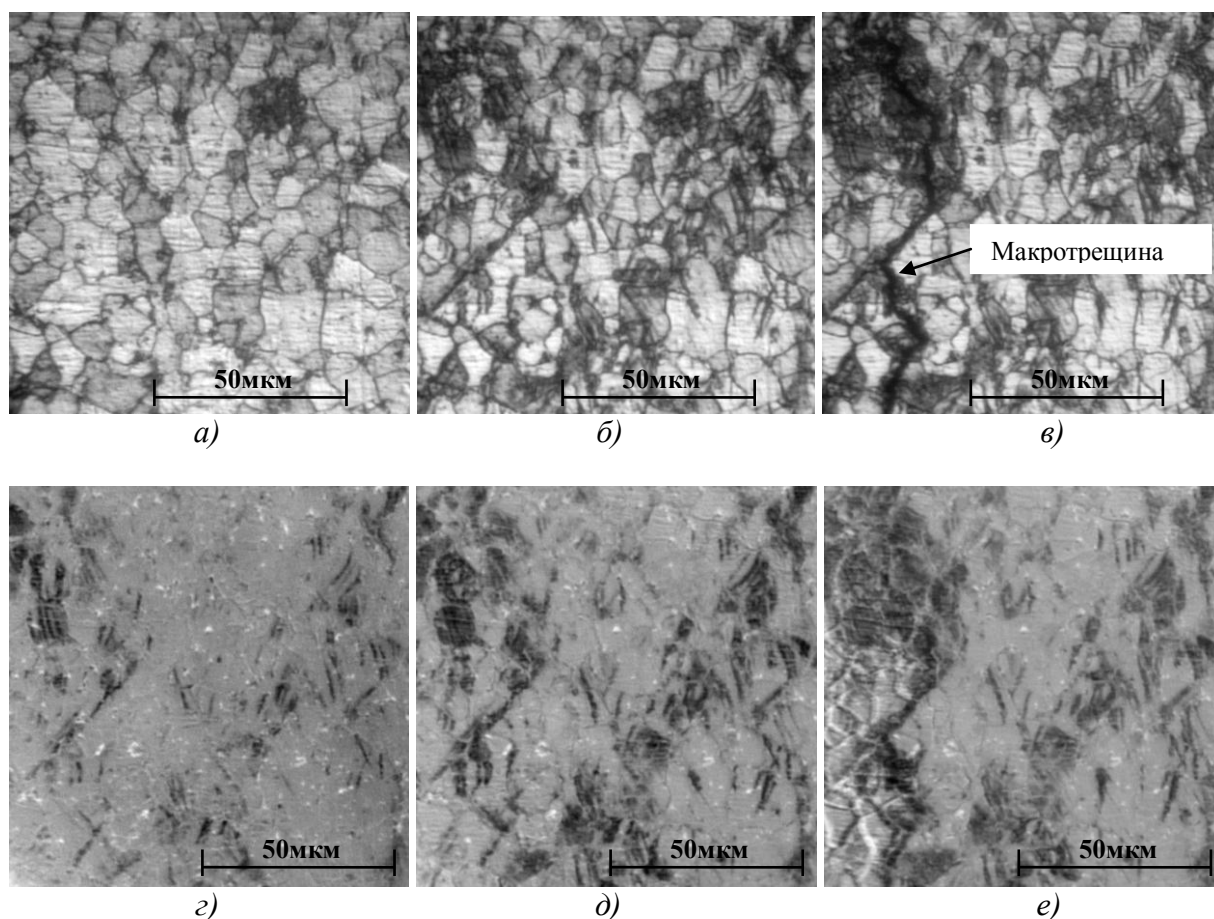


Рис. 1. Фотографии поверхности микрошлифа стали 15ЮТА одной и той же области исследования:

a – исходное состояние материала до нагружения; *б* – после 100 тыс. циклов нагружения; *в* – после образования макротрещины; изменение яркости поверхности микрошлифа; *г* – после первой серии испытаний (23000 циклов); *д* – после 100 000 циклов; *е* – после образования усталостной трещины (222 000 циклов)

С увеличением числа циклов при заданной амплитуде напряжения, пластическая деформация охватывает и ряд других зерен. На рис. 1, *в* представлено изменение структуры после образования макротрещины.

Для характеристики структурных изменений, связанных как с деформацией на уровне зерна, так и с появлением полос скольжения, использовался следующий подход. Фотографии микроструктуры (рис. 1, *a-в*) были отмасштабированы и повернуты относительно начальной (соответствующей начальному состоянию материала). Масштабирование и поворот проводился до появления максимального контраста текущего изображения с исходным. В программе Mathcad отредактированные изображения были преобразованы в двумерный массив данных, каждый элемент которого соответствовал величине интенсивности (яркости) пикселя на фото, которая может принимать значения от 0 до 255. Для выявления структурных изменений проводилось вычитание значений элементов последующих двумерных массивов значений интенсивности для различных серий нагружения из матрицы, соответствующей начальному состоянию материала. В результате вычитания получены массивы данных. Для их визуализации они были преобразованы обратно в фотографии рис. 1, *г-е*. Анализ рисунков изменения структуры в области образования трещины даёт повод предположить о кластерном механизме образования трещины, когда наиболее протяжённые повреждённые фрагменты материала сливаются, образуя макроскопическую трещину.

Изменение интенсивности каждой точки поверхности для каждой серии усталостного нагружения вычислялось по формуле:

$$\Delta I_{i,j} = I_{i,j} - I_{i,j}^0, \quad (6)$$

где $I_{i,j}^0$ - значение интенсивности точки поверхности, соответствующей начальному состоянию материала; $I_{i,j}$ - значение интенсивности точки поверхности, соответствующей состоянию материала после одной из серии усталостного нагружения. Для количественной оценки общей величины структурных изменений поверхности среднее значение изменения затемнения (параметр S) определялось по формуле:

$$S = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta I_{i,j}, \quad (7)$$

где n и m количество точек поверхности по горизонтали и вертикали соответственно.

Относительное изменения параметра S определялось как:

$$S_{отн} = S/S^*,$$

где S^* - значение параметра S , соответствующего моменту образования макротрещины.

С помощью комплекса СПЕКТР-МЕТ были проведены измерения расстояний между точками пересечения опорной линии с границами зерен. Эти расстояния использовались в дальнейшем для определения характеристик микропластических деформаций. Величина деформации в i -м зерне определялась как

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - l_{i0}}{l_{i0}} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где l_{i0} – начальное расстояние между точками; l_i – расстояние между точками после циклического нагружения. Среднее по модулю значение микропластической деформации, измеряемой вдоль и поперек проката, определялось как:

$$\bar{\varepsilon}_{x,y} = \frac{1}{m} \sum_i^m |\varepsilon_i^{x,y}|, \quad (9)$$

где m – количество зерен, по которым проводились вычисления, $|\varepsilon_i^{x,y}|$ - абсолютное значение деформации в i -м зерне вдоль и поперек оси нагружения. Погрешность измерения величины микропластической деформации составила не более 0,5 %. Погрешность измерения длины и ширины грубых полос скольжения – 0,1 и 1 мкм соответственно.

На рис. 2, а дана зависимость $S_{отн}$ от количества циклов нагружения N , на рис. 2, б приведена зависимость микропластической деформации от N .

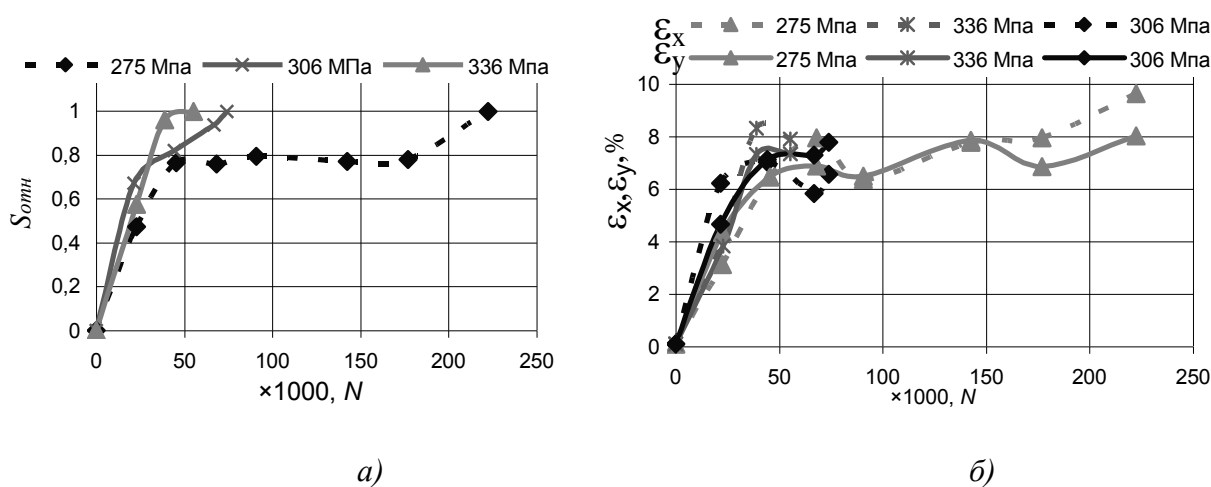


Рис. 2. Зависимость $S_{отн}$ от количества циклов нагружения (а) и величина микропластической деформации от количества циклов нагружения (б)

Среднее по абсолютному значению величины микропластической деформации не превышало 9%.

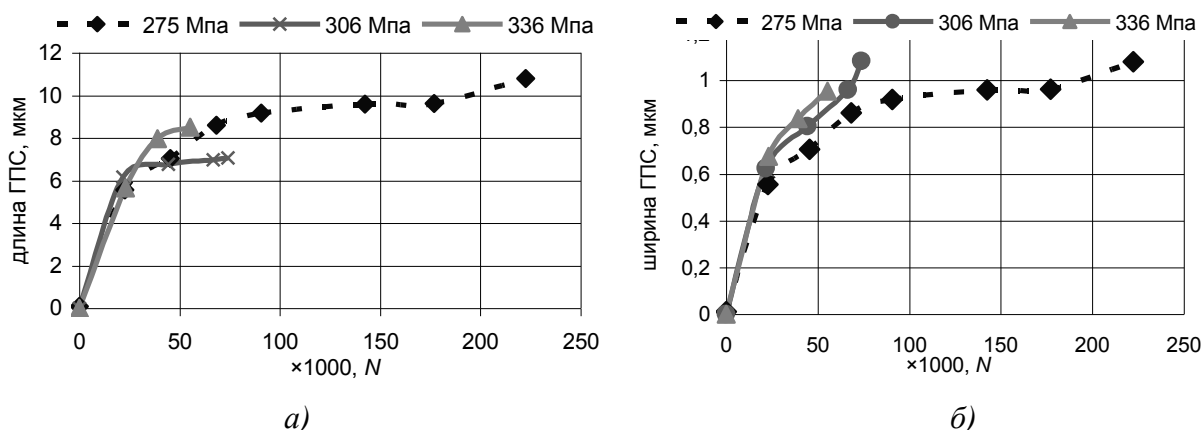


Рис. 3. График зависимости длины (а) и ширины (б) грубых полос скольжения от количества циклов нагружения

Графики зависимости длины и ширины грубых полос скольжения (ГПС) от количества циклов нагружения представлены на рис. 3, а, б.

График зависимости концентрации ГПС от относительного значения количества циклов нагружения N/N^* , где N^* - критическое значение количества циклов нагружения, соответствующее появлению макротрещины, представлен на рис. 4, а.

Длина и ширина полос скольжения при критическом значении циклов нагружения для разных амплитуд нагружения отличалась не существенно и достигала 7-10 мкм и 1 мкм соответственно. Концентрация полос скольжения в момент появления макротрещины для различных амплитуд нагружения значительно отличались от $2,5 \times 10^9$ до 25×10^9 полос на m^2 .

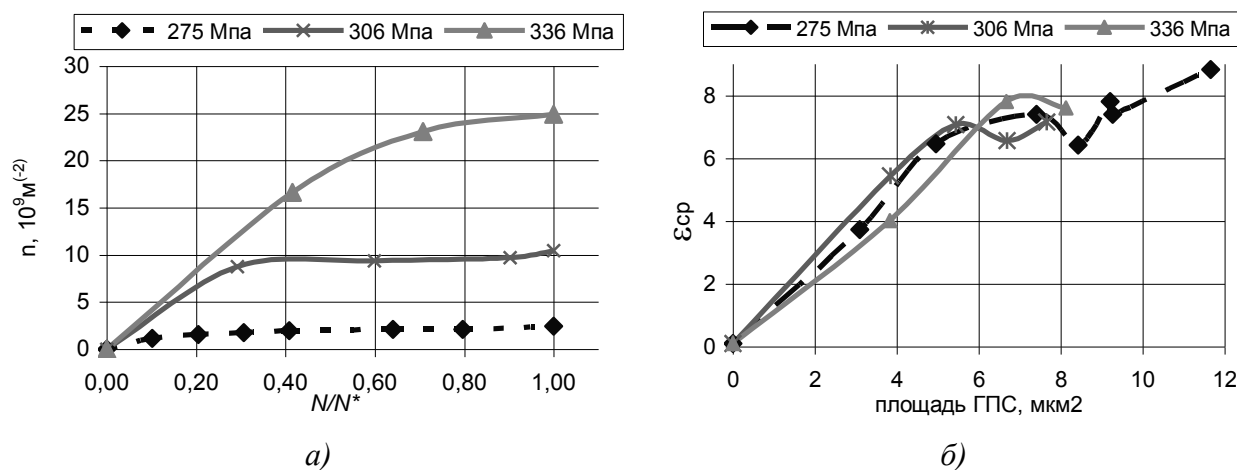


Рис. 4. Зависимости:
а - концентрации грубых ПС от количества циклов нагружения;
б - величины микропластической деформации от площади грубых ПС

Зависимость среднего значения микропластических деформаций вдоль и поперек проката $\varepsilon_{cp} = (\bar{\varepsilon}_x + \bar{\varepsilon}_y)/2$ от среднего значения площади ГПС представлен на рис. 4, б. Как видно из рис. 2, б имеется два характерных участка. На начальном этапе нагружения происходит наиболее интенсивное развитие микропластических деформаций, а затем её замедление и стабилизация на уровне 7%. Стабилизацию микропластической деформации можно

объяснить появлением микропор, микротрещин в полосах скольжения, способствующих релаксации микронапряжений в очагах микропластической деформации. Для амплитуд нагружения 275–336 МПа стабилизация значения микропластических деформаций происходит в районе 40000 циклов.

Получена зависимость величины микропластических деформации ε_x и ε_y от концентрации грубых полос скольжения рис. 5, а, б, из которых видно, что произошло разделение в соответствии с амплитудами нагружения. Аппроксимируя связь концентрации грубых ПС от величины микропластической деформации линейной зависимостью и вычислив тангенс угла наклона Q этих кривых, получим график зависимости N^* от Q рис. 6, а. Зависимость $N^*(Q)$ определяется выражением:

$$N^* = 39 + 51 * Q. \tag{10}$$

Таким образом, связь критического значения количества циклов N^* с Q можно использовать для прогнозирования появления макротрещины.

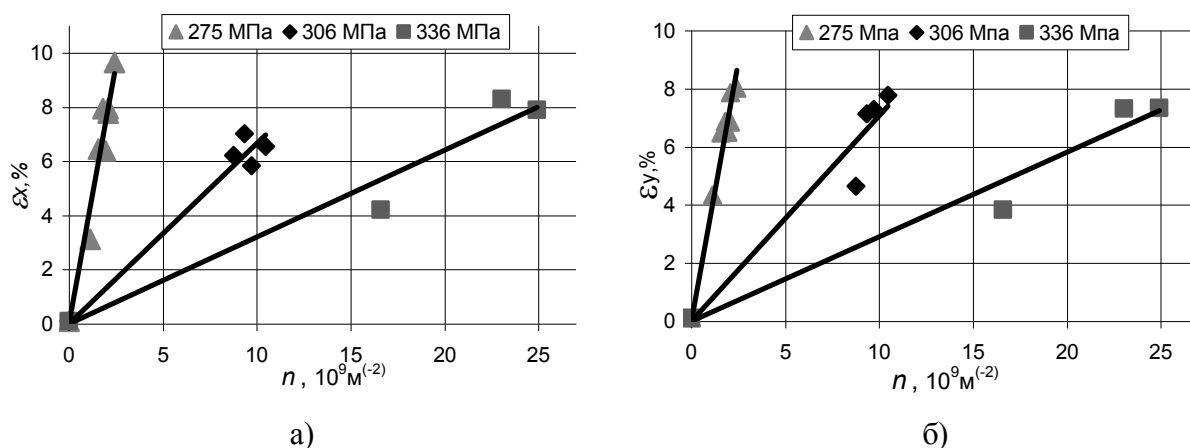


Рис. 5. Зависимость величины микропластических деформаций от концентрации грубых полос скольжения

В результате акустических исследований получена неоднозначная зависимость изменения скорости распространения продольных УВ от относительного значения количества циклов нагружения N/N^* (рис. 6, б).

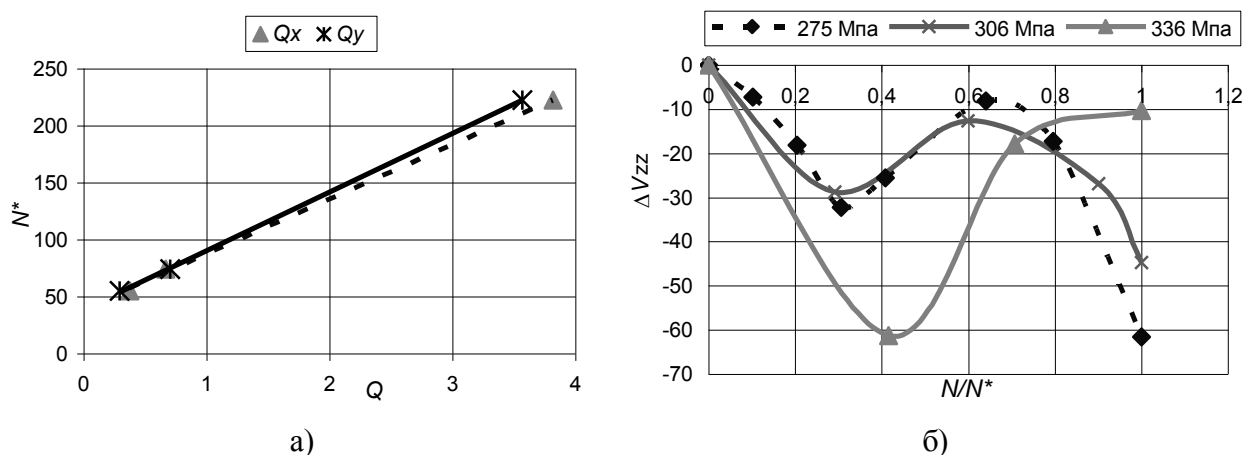


Рис. 6. Зависимость (а) критического значения количества циклов нагружения от коэффициента Q ; зависимость (б) изменения скорости распространения продольных волн от количества циклов нагружения N/N^*

Из графика видно, что на начальном этапе циклического деформирования до значений $N/N^* = 0,3-0,4$ происходит уменьшение скорости распространения продольных УВ. Снижение скорости распространения УВ на этой стадии можно объяснить уменьшением упругих модулей вследствие накопления микроповрежденности.

При дальнейшем нагружении ($N/N^* = 0,4-0,7$) наблюдается увеличение СР УВ. Можно предположить, что на этой стадии происходит изменение условий формирования кристаллографической текстуры при появлении микропор, микротрещин, что ведет к изменению текстуры и увеличению скорости УВ.

Стадийность разрушения металла при упруго-пластическом деформировании приводит к аналогичному поведению графиков $\Delta V_{zz}(N/N^*)$ при различных амплитудах нагружения.

Вывод

Получено, что в процессе усталостного разрушения происходит локализация и закрепление очагов микропластических деформаций. Развитие микропластических деформаций характеризуется двумя участками. На начальном этапе нагружения наблюдается наиболее интенсивное развитие микропластических деформаций, а затем её замедление и стабилизация по мере исчерпания ресурса материала. Стабилизацию микропластической деформации можно объяснить появлением микропор, микротрещин в полосах скольжения, способствующих релаксации микронапряжений в очагах микропластической деформации. Получена высокая корреляционная связь, близкая к линейной, между концентрацией грубых полос скольжения и величиной микропластической деформации при различных значениях амплитуды нагружения (от 275 до 336 МПа). Предлагается использовать интенсивность изменения микропластической деформации в зависимости от концентрации полос скольжения в качестве диагностического параметра для прогнозирования критического значения количества циклов нагружения, соответствующего появлению макротрещины. В результате акустических исследований получена неоднозначная зависимость изменения скорости распространения продольных упругих волн от количества циклов нагружения, которую можно объяснить влиянием двух факторов - накоплением микроповреждений и формированием кристаллографической текстуры при усталостном разрушении.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-08-00892 и грант 09-08-00827).

Библиографический список

1. Акт технического расследования причин аварии, происшедшей 17 августа 2009 года в филиале ОАО «РусГидро» - «Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного» от 04.10.2009.
2. **Гурьев, А.В.** Роль микропластических деформаций в формировании частотной зависимости / А.В. Гурьев, А.П. Карпов // Проблемы прочности. 1986. №4. С. 24–27.
3. **Вайнштейн, А.А.** Развитие пластических микродеформаций при упругих макродеформациях // Проблемы прочности. 1985. №7(90-92).
4. **Терентьев, В.Ф.** Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
5. **Кукса, Л.В.** Общие закономерности и особенности микронеоднородной деформации в поликристаллах при различных видах напряженного состояния и температурах испытания // Проблемы прочности, 1990. №8. С. 58–64.
6. **Митенков, Ф.М.** Использование оптического и акустического методов контроля для оценки поврежденности сталей на ранних стадиях усталостного разрушения / Ф.М. Митенков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. №12. С. 40–45.

7. **Allen, D.R.** The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique / D.R. Allen, C.M. Sayers // Ultrasonics, 1984. - V. 22. No.4. P. 179–188.
8. **Вавакин, А.С.** Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями / А.С. Вавакин, Р.Л. Салганик // Механика твердого тела. 1975. № 3. С. 65–76.

*Дата поступления
в редакцию 17. 06.2011*

A.V. Gonchar, V.V. Mishakin

THE DAMAGE INVESTIGATING OF 1015 STEEL IN THE EARLY STAGES OF FATIGUE LOADING USING NONDESTRUCTIVE METHODS

We studied the development process of grain's microplastic strains and the slip bands formation, as well as change in the speed of elastic waves propagation under fatigue loading of 1015 steel. High correlation that is nearly to linear, between the concentration of slip bands and the microplastic strain for different values of the loading amplitudes (from 275 to 336 MPa) was obtained. The changes of microplastic strain depending on the slip bands concentration are encouraged to use as a diagnostic parameter for predicting the number of critical loading cycles. The nonmonotonic behavior of the velocity elastic waves of propagation as a function of exhaustion of the resource material has been shown.

Key words: nondestructive testing, fatigue damage, metallography, slip bands, cycle fatigue, ultrasonic, optical method.

УДК 669.017:669.14

И.В. Ряпосов, Л.М. Клейнер, А.А. Шацов, П.А. Закревская

**СТРОЕНИЕ РЕЕЧНОГО МАРТЕНСИТА ГОРЯЧЕКАТАНОЙ
НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ 15X2Г2НМФБ**

Пермский государственный технический университет

Аннотация: изучены особенности пакетно-реечного мартенсита низкоуглеродистой мартенситной стали (НМС) после охлаждения с прокатного нагрева. Установлено, что распределение реек по ширине описывается логарифмически нормальным законом. Дано статистическое описание тонкой структуры НМС.

Ключевые слова: низкоуглеродистый мартенсит, рейки, пакеты, фрагменты, ячейки, карбиды.

Введение

В начале второй половины XX века было обнаружено «восстановление» предела текучести и твердости деформированных металлов при «непрерывном отжиге», обусловленное образованием ячеистой структуры [1]. При отжиге количество дислокаций внутри ячеек уменьшалось, поэтому предположение об определяющей роли плотности дислокаций, а не размера ячейки не всегда обоснованно. С.Г. Болл на сплавах алюминия впервые показал выполнение соотношения петчевского вида между размером ячеек и пределом текучести. Позже Д.Г. Уорингтон на железе экспериментально доказал выполнение соотношения подобного уравнению Холла–Петча между пределом текучести и размером субзерен (ячеек). На основании работ перечисленных авторов и др. Р.У. Кан сделал заключение о том, что прочность материалов с ячеистой субструктурой определяют плоские скопления и стенки дислокаций, если только между ячейками не слишком малые углы разориентировки.

У материалов с пакетной структурой вклад в прочность границ реек на 1–2 порядка выше, чем границ пакетов, имеющих большеугловые границы [2], поэтому фрагментирование реек должно существенно повлиять на свойства низкоуглеродистых мартенситных сталей (НМС).

Цель работы

Изучение строения низкоуглеродистого мартенсита горячекатаной НМС марки 15X2Г2НМФБ с пределом прочности σ_b - более 1400 МПа, пределом текучести $\sigma_{0,2}$ - более 1100 МПа, ударной вязкостью KCV - более 0,8 МДж/м².

Результаты и их обсуждение

Исследованная сталь, кроме традиционного для НМС легирования, содержит сильные карбидообразующие элементы (табл. 1); критические температуры, средний размер зерна аустенита и твердость в горячекатаном состоянии представлены в табл. 2.

Определенное сочетание углерода и легирующих элементов НМС обеспечивает высокую устойчивость переохлажденного аустенита и большую прокаливаемость, а легирование стали 15X2Г2НМФБ сильными карбидообразующими элементами (ванадием и ниобием) позволяет сохранить при нагреве мелкое зерно и увеличить отпускостойчивость.

Для изучения структуры использовали образцы диаметром 19 мм высотой 10 мм из прутков горячекатаной стали 15X2Г2НМФ.

Тонкую структуру и морфологию фаз изучали при помощи просвечивающей и растровой электронной микроскопии.

Для просвечивающей микроскопии использовали фольги, полученные методом электрополировки. Образцы предварительно нарезали электроэрозионным станком на пластины размером 10x4 мм толщиной 0,2–0,3 мм. Далее проводили двухстороннее утонение на

наждачных бумагах до толщины 0,05–0,06 мм. Электрополировку проводили при температурах близких к 0 °С, в электролите состава 80 % ледяной уксусной кислоты, 20% хлорной кислоты [6]. Тонкую структуру просматривали на микроскопах JEM 200СХ и СМ 30 при ускоряющем напряжении до 200 кВ.

Таблица 1

Химический состав стали 15Х2Г2НМФБ

Содержание элементов, % (по массе)									
С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Nb	S	P
0,15	0,25	1,87	1,92	1,07	0,46	0,14	0,16	0,008	0,011

Таблица 2

Критические температуры (°С), размер исходного зерна аустенита и твердость НМС 15Х2Г2НМФБ

A _{C1}	A _{C3}	Mn	M _к	Размер зерна <i>d</i> ср., мкм	Твердость, HRC
710	840	340	170	13	42

Растровое изображение полированных и травленных в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты образцов получали на микроскопах Hitachi s-3400N, FEI (Philips).

В качестве закона распределения по размеру ширины рейки выбран логнормальный закон:

$$f = \exp\left(-\left[\frac{\ln(R)-\mu}{\sigma}\right]^2/2\right)/(R\sigma\sqrt{2\pi}), \quad (1)$$

где μ – математическое ожидание, $\mu = \langle R \rangle$; σ – среднее квадратичное отклонение.

Достоверность принятого закона распределения оценивали по статистическому критерию Пирсона χ^2 . Доверительная вероятности определения элементов структуры составила 95% при уровне значимости $p=0,05$. Оценку проводили следующим образом: определяли размеры элементов структуры (объем выборки не менее 250 измерений), разбивали массив данных на несколько примерно равных частей, но не менее восьми интервалов [3], аппроксимировали гистограммы каждым из альтернативных законов, на основании принятого закона распределения вычисляли вероятности p_i попадания случайной величины d в i -й интервал. Количество элементов в интервале – более восьми [3]. При определении количества интервалов k в зависимости от объема выборки n использовали рекомендации ВНИИМетрологии [4, 5]:

n	k
40–100	7–9
100–500	8–12
500–1000	10–16
1000–10000	12–22

Отклонение выборочного распределения от предполагаемого (χ^2) вычисляли по формуле [3]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (3)$$

где k – число интервалов; n – объем выборки.

Гипотезу о принятом законе распределения принимали на заданном уровне значимости, исходя из соотношения:

$$\chi^2 < \chi^2_{1-p}, \quad (4)$$

где χ^2_{1-p} – значение, определяемое из таблиц [3] при заданном уровне значимости p .

Результаты исследований и их обсуждение

Типичная структура речного мартенсита, формирующаяся после охлаждения НМС 15Х2Г2НМФБ на воздухе непосредственно после прокатного нагрева, представлена на рис. 1, *а*, и после дополнительной закалки (рис. 1, *б*). Речная структура практически не отличается, но заметны отличия дислокационной структуры.

У закаленных с прокатного нагрева образцов плотность дислокаций порядка $2-4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ и в несколько раз выше, чем у образцов с дополнительным нагревом при охлаждении на воздухе [7].

Распределение реек по ширине стали 15Х2Г2НМФБ закаленной с прокатного нагрева, представлено на рис. 2, наиболее вероятная ширина реек – 250 нм, средняя – 260 нм, значение критерия Пирсона $\chi^2 = 12,6$, коэффициент вариации $V = 0,5$.

Табличные значения этого критерия для уровня значимости $p=0,02$ $\chi^2 = 13,4$ и для $p=0,05$ $\chi^2 = 11,1$, что означает выполнение с высокой вероятностью логнормального закона распределения.

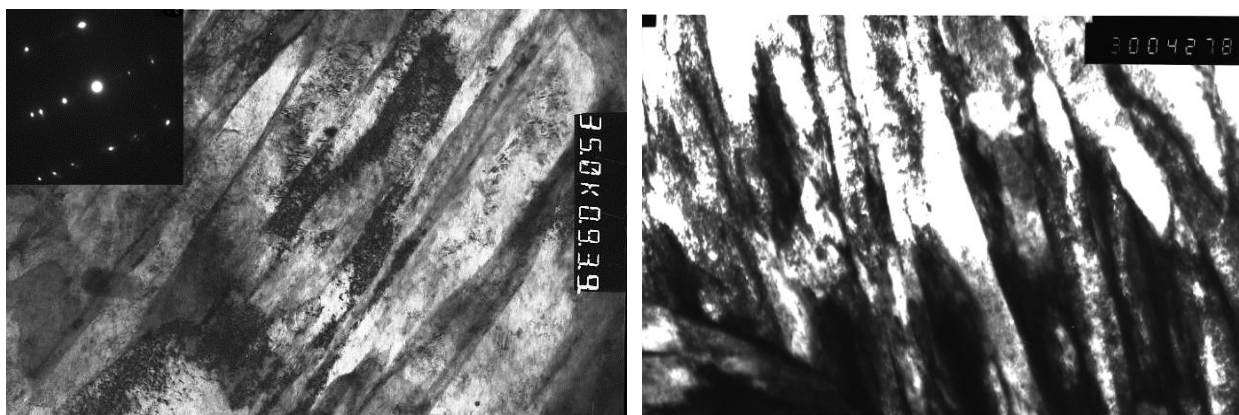
*а**б*

Рис. 1. Речная структура мартенсита стали 15Х2Г2НМФБ:

а – горячекатаная, $\times 35000$;
б – закаленная с $950 \text{ }^\circ\text{C}$, $\times 30000$

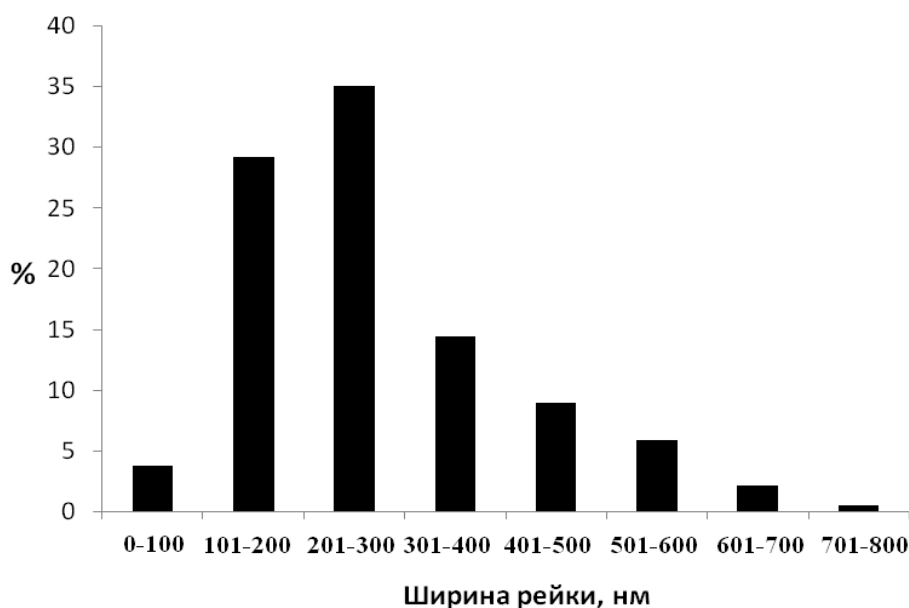
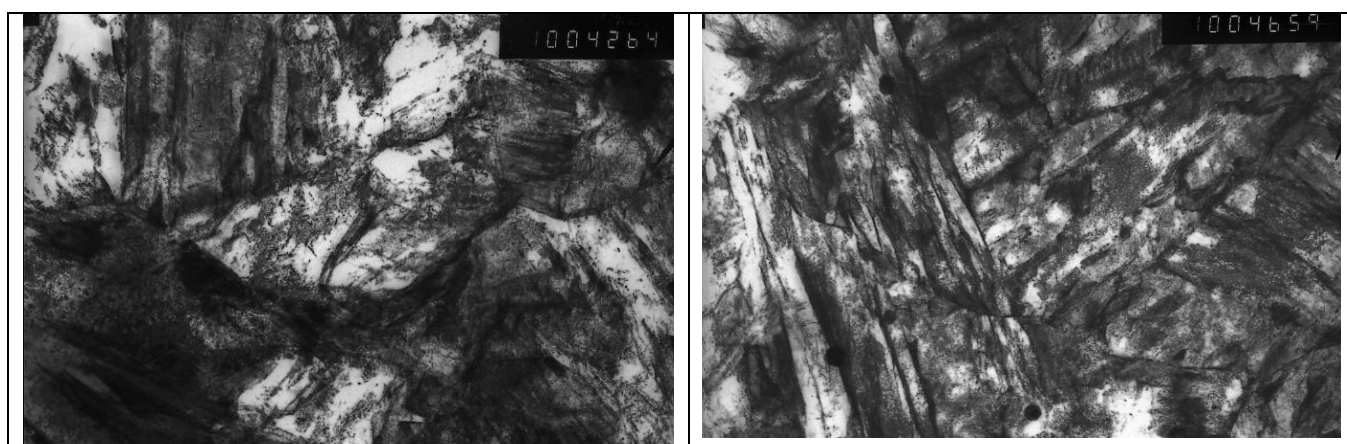


Рис. 2. Распределение реек по ширине стали 15Х2Г2НМФБ в состоянии с прокатного нагрева

Рейки объединены в пакеты с различными углами разориентации (рис. 3). Оценки размеров пакетов показали, что их средний размер составляет примерно 2,5 мкм. В границах бывшего аустенитного зерна в среднем находятся от 2 до 10 пакетов.

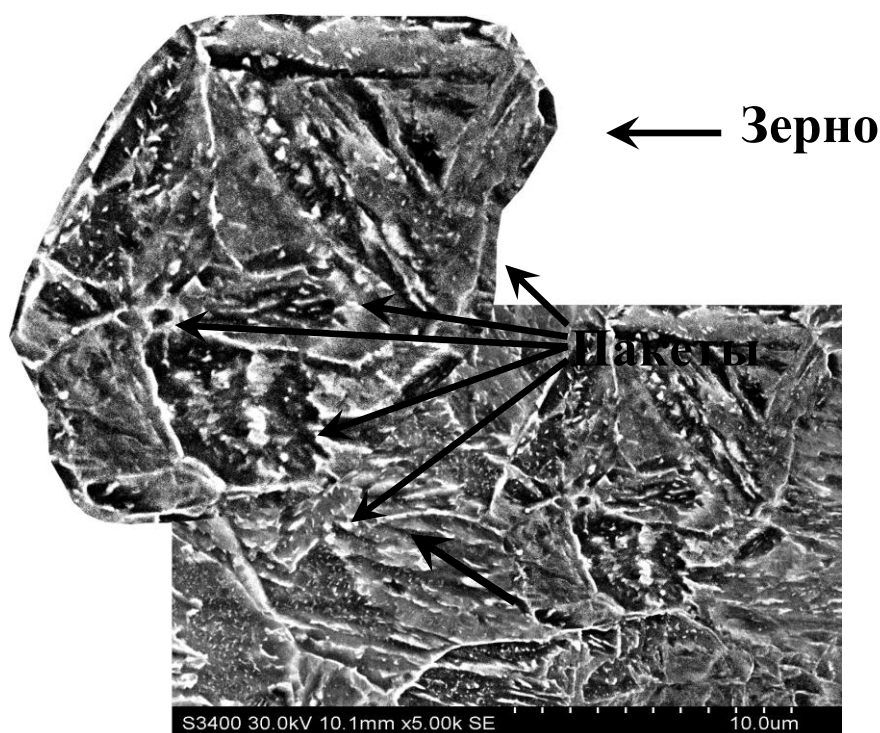
Выделения карбидов имеют нанометрический размер (ширина – 15-20 нм, длина – 100-115 нм) и не менее двух направлений ориентации (рис. 4, а), что является отличительным признаком именно мартенситной структуры [8]. Для большей наглядности представлены инвертированная микрофотография (рис. 4, б).

Признаки фрагментирования (образование дислокационных субграниц) появляются после охлаждения горячекатаной стали на воздухе (рис. 5). Фрагментирование в процессе охлаждения при наличии нескольких морфологических типов мартенсита наблюдают только в мартенсите с пакетно-речным строением [9].



а

б



в

Рис. 3. Пакетная структура низкоуглеродистого мартенсита НМС 15Х2Г2НМФБ:
а, б – просвечивающая электронная микроскопия, $\times 10000$;
в – сканирующая электронная микроскопия, $\times 5000$

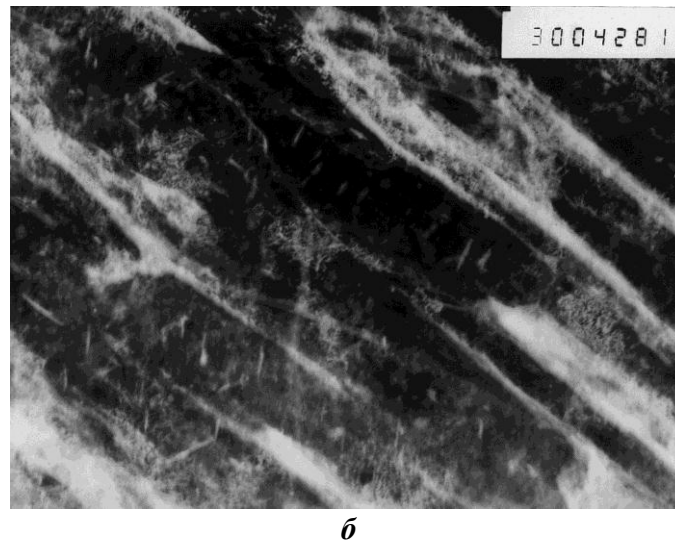
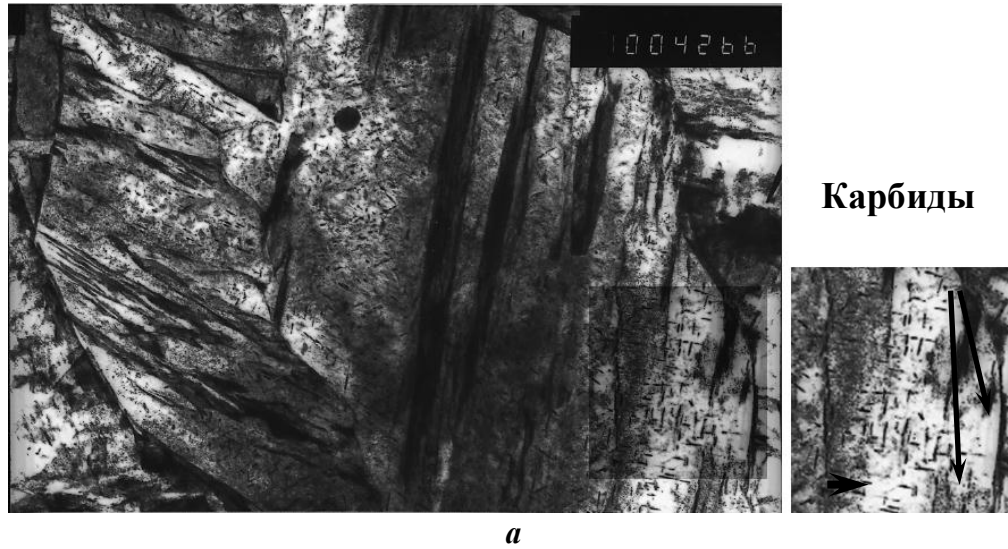


Рис. 4. Низкоуглеродистый мартенсит горячекатаной стали 15X2Г2НМФБ с характерными выделениями карбидов: *a* – x10000; *b* – x30000

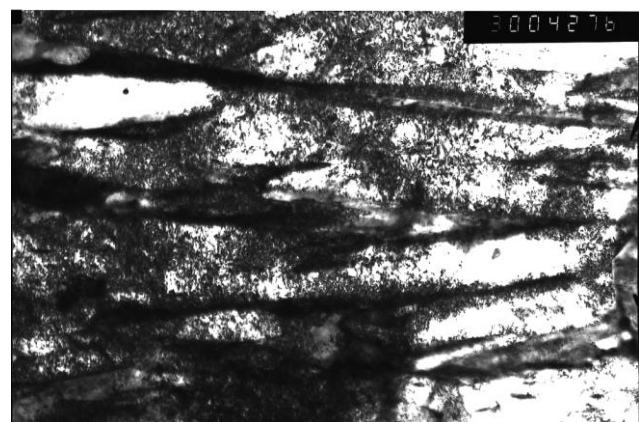
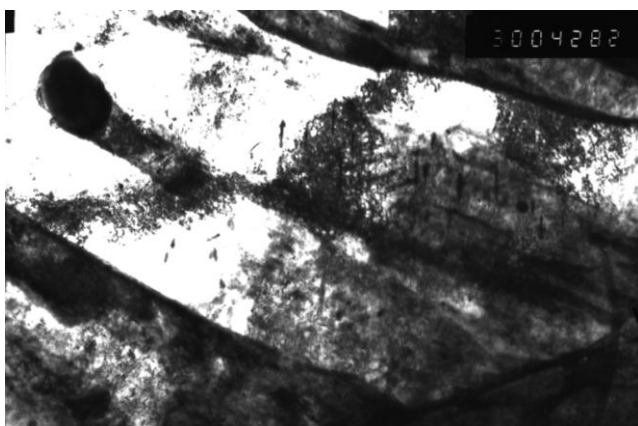


Рис. 5. Начальный этап фрагментирования стали 15X2Г2НМФБ, x30000: *a* – поперек реек; *b* – вдоль и поперек реек

Таким образом, высокие свойства закаленной с прокатного нагрева НМС 15Х2Г2НМФБ во многом обусловлены формированием ячеистой структуры мартенсита.

Выводы

Иерархическая структура низкоуглеродистого мартенсита, закаленного с прокатного нагрева, формируется в границах зерна аустенита и включает: пакеты рейки и фрагменты реек.

Внутри реек обнаружены выделения карбидов не менее двух направлений ориентации шириной – 15-20 нм и длиной порядка 100 нм.

Высокие механические свойства закаленных с прокатного нагрева НМС во многом обусловлены формированием наноразмерных характерных элементов структуры.

Библиографический список

1. Физическое материаловедение / под ред. Р. Кана: [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1968. Вып. 3. – 484 с.
2. Штремель, М.А. Прочность сплавов. Ч II. Деформация / М.А. Штремель. – М.: МИСИС, 1997. – 527 с.
3. Ахназарова, С.Л. Методы организации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Высш. шк., 1985. – 319 с.
4. Бурдун, Г.Д. Основы метрологии / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 120 с.
5. Лемешко, Б.Ю. О выборе числа интервалов к критериям согласия типа χ^2 / Б.Ю. Лемешко, Е.В. Чимитова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. С. 61–67.
6. Утевский, Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в материаловедении / Л.М. Утевский. – М.: Metallurgy. 1973. – 584 с.
7. Югай, С.С. Структурная наследственность в низкоуглеродистых мартенситных сталях / С.С. Югай [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 12. С. 24–29.
8. Климашин, С.И. Влияние термической обработки на морфологию мартенсита и эволюцию дефектной структуры литой среднелегированной конструкционной стали: дис. ... канд. техн. наук / С.И. Климашин. – Новокузнецк, 2006. – 18 с.
9. Козлов, Э.В. Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали / Э.В. Козлов [и др.]. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 177 с.

Дата поступления
в редакцию 17.06.2011

I.V. Ryaposov, L.M. Kleyner, A.A. Shatsov, P.A. Zakrevskaya

STRUCTURE OF LATH MARTENSITE OF HOT-ROLLED LOW-CARBON MARTENSITIC STEEL 15Cr2Mn2NiMoVNb

The features of packet-rack martensite of low-carbon martensitic steel (NMS) after cooling from the rolling heat were explored. It was established that the distribution of racks in width described by a logarithmic normal law. The statistical description of the fine structure of the NMS was given.

Key words: low-carbon martensite, racks, packets, fragments, cells, carbides.

УДК 669.14.019: 334.716.4 (470.341)

В.С. Малов¹, В.А. Васильев²

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СЛИТКОВ ИЗ СТАЛИ 14X17H2

ОАО «Завод «Красное Сормово»¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Данная статья является обобщением результатов системы менеджмента качества продукции, проводимой на ОАО «Завод «Красное Сормово» по анализу типовых дефектов, образующихся при выплавке и разливке слитков из стали 14X17H2. Описывает наиболее характерные их виды и пути их устранения в условиях действующего производства.

Ключевые слова: микрошлиф, макрошлиф, δ -феррит, дефект, слиток, сорбит.

Сталь 14X17H2 является весьма сложной в технологическом отношении, особенно при изготовлении поковок. Слитки из этой стали обладают склонностью к развитию усадочных пустот, осевых и радиальных трещин, ликвационных явлений. Статья является результатом исследований, проводимых в рамках системы менеджмента качества продукции гражданского и военного назначения по определению основных часто встречающихся дефектов, образующихся при изготовлении слитков из стали 14X17H2 и способов их устранения в условиях действующего производства.

Задачи, поставленные в данном исследовании:

- 1) выявить наиболее характерные;
- 2) произвести их классификацию;
- 3) выработать пути их устранения.

Методика исследования. Для анализа дефектов выбирались наиболее часто встречающиеся поковки деталей. Из деталей изготавливали поперечные макрошлифы, из них вырезали и изготавливали микрошлифы, которые затем подвергали глубокому травлению. Проводили исследование микрошлифа до и после травления. Микроструктуру изучали на металлографическом микроскопе МИМ-8М.

Накопленный опыт работы с этой сталью в условиях ОАО «Завод «Красное Сормово» позволяет выделить основные дефекты этой марки стали, получаемые в процессе изготовления слитков из неё:

- усадочные раковины;
- осевая пористость;
- неметаллические включения;
- пониженный уровень пластических свойств.

Неметаллические включения, как правило, представляют собой скопления на поверхности или вблизи от неё. Причинами их возникновения являются частицы огнеупорных материалов футеровки ванны печи и сталеразливочного ковша, попутно захватываемый струёй металла шлак и продукты раскисления, не полностью прореагировавшие с жидким металлом. При этом основными мерами предупреждения являются:

- соблюдение необходимых температур выпуска и разливки жидкого металла;
- применение раскислителей, образующих жидкотекучие продукты раскисления;
- регламентированная выдержка в разливочном ковше.

Устранение их производится шлифовкой, строжкой, огневой зачисткой или вырубкой. Данный дефект проиллюстрирован на фотографиях микрошлифов и макрошлифов поковки типа «Стержень» (рис. 1–3).

Краткое описание дефекта: в ходе анализа поперечного макрошлифа в центральной

зоне поковки выявлен внутренний разрыв металла с многочисленными ответвлениями. Микроанализ шлифа дефектной зоны выявил:

1. От вершин многочисленных крупных надрывов металла распространяются по включениям мелкие разветвлённые трещины;
2. Поверхность разрушения окислена;
3. Отдельные мелкие пустоты и трещины в металле наблюдаются также и при некотором удалении от магистрального дефекта, что свидетельствует об их возникновении в процессе затвердевания слитка.
4. Микроструктура металла – высокоотпущенный мартенсит с наличием выделений значительного количества δ -феррита примерно 10% по границам зёрен, что также является способствующим фактором для растрескивания металла.

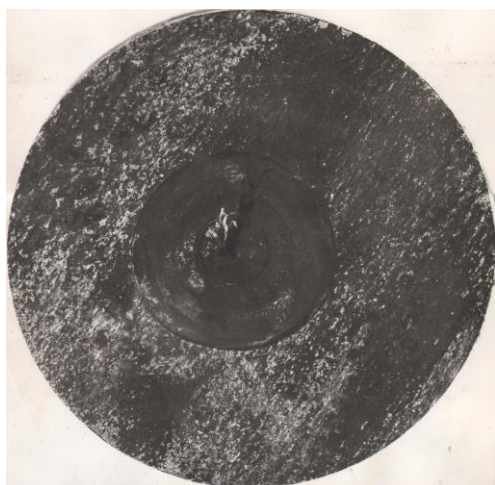


Рис. 1. Вид поперечного макрошлифа, $\times 1$

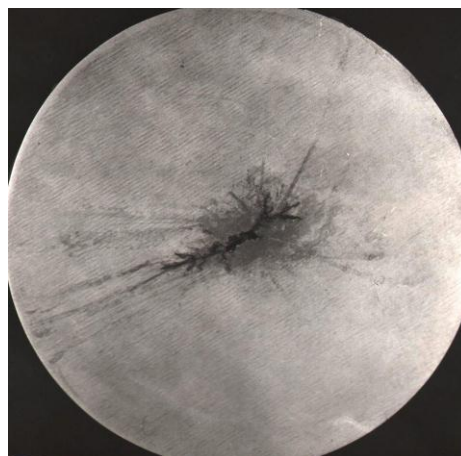
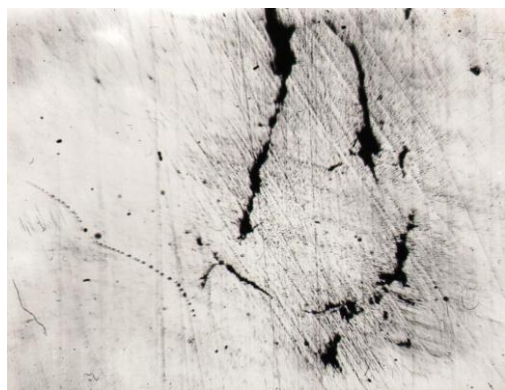


Рис. 2. Вид сбоку поковки типа «Стержень», $\times 1$



a



б



в

Рис. 3. Микрошлиф (а, б, в) поковки типа «Стержень», $\times 100$

Осевая пористость представляет собой маленькие видимые углубления, расположенные вдоль оси слитка. Причина их возникновения – выделение газов в центральной части слитка – связана с нарушением технологии выплавки и разливки слитков. Мерами для их предупреждения являются:

- проведение устойчивого кипения металла при плавке;
- соблюдение установленной технологии, применяемой при разливке металла;
- своевременная чистка изложниц.

Устранение производится с помощью, как правило, строжки с заваркой зоны дефекта. Данный дефект проиллюстрирован на фотографиях микрошлифов и макрошлифов поковки типа «Штанга» (рис. 4–5).

Краткое описание дефекта: в центральной части заготовки выявлены две несплошности размером до 2 мм и значительное количество мелких пор. На макрошлифе, изготовленном в дефектном районе, около пор выявлено скопление неметаллических включений разного происхождения. Микроструктура стали – сорбит и δ -феррит.

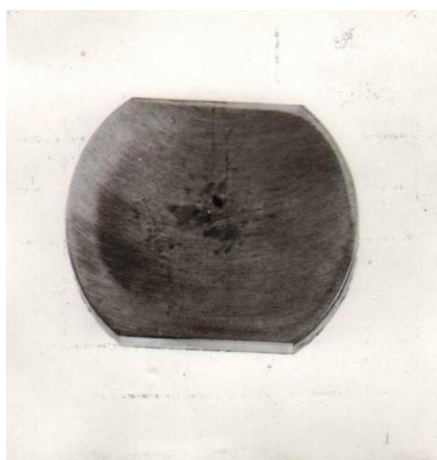


Рис. 4. Вид дефекта на макрошлифе, $\times 1$



а



б

Рис. 5. Вид дефекта (а, б) на микрошлифе $\times 100$

Усадочными раковинами называют открытые или закрытые полости в слитке, имеющие шероховатую грубую кристаллическую поверхность со следами дендритов. Усадочные раковины в отличие от усадочной пористости имеют сравнительно большие размеры. Причины возникновения – высокая температура заливки металла, отклонения химического состава от требований соответствующих ГОСТ И ТУ.

Основная мера для устранения – увеличение размера головной обрезки. Данный дефект проиллюстрирован на фотографиях микрошлифов и макрошлифов поковки типа «Вал» на рис. 6–8.

Краткое описание дефекта: центральная зона макрошлифа имеет несплошность разветвлённой формы, вокруг расположены поры. По результатам микроанализа металла осевой зоны выявлено:

1. Дефект представляет собой группу разрывов (пор), расположенных в виде сетки;
2. Металл по загрязнённости неметаллическими включениями относится к баллу 4 шкалы ОТ по ГОСТ 1778-70;
3. Обезуглераживания по границам не наблюдается;
4. Микроструктура – сорбит и феррит.

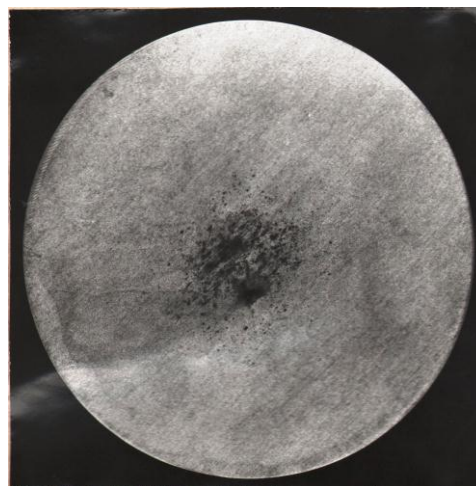
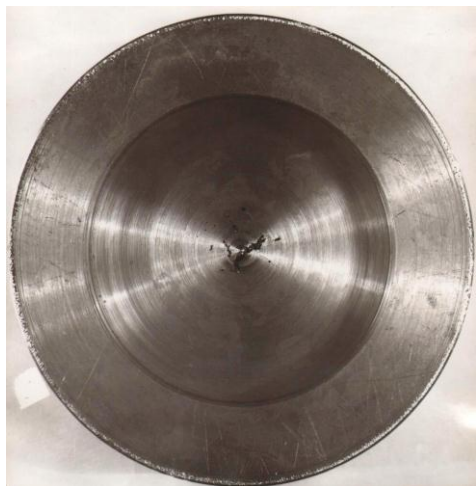
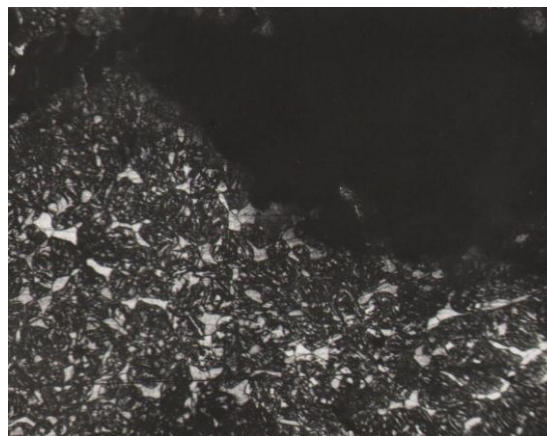
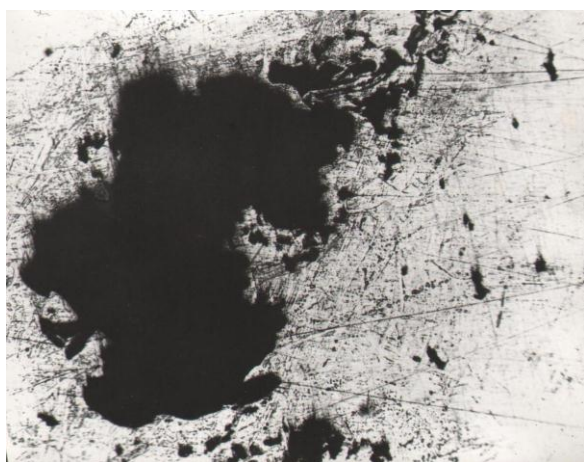


Рис. 6. Внешний вид дефекта на детали «Вал» 1:1 Рис.7.Макроструктура детали «Вал» 1:1



а

б

Рис. 8. Микроструктура (*а, б*) детали «Вал», x100

Пониженный уровень пластических свойств является также одним из наиболее характерных дефектов, наблюдаемых при изготовлении поковок из слитков данной марки стали. Этот дефект проиллюстрирован на фотографиях микрошлифов и макрошлифов поковки типа «Втулка» (рис. 9–10).

Краткое описание дефекта: в результате исследования микрошлифа установлено следующее:

1. Дефект представляет собой тонкую трещину, располагающуюся под прямым углом к поверхности. Берега трещины окислены на всём протяжении. Глубина проникновения составляет 1,2 мм.

2. Загрязнённость металла неметаллическими включениями небольшая и соответствует баллу 2 шкалы ОТ по ГОСТ 1778-70.

3. Микроструктура металла детали - сорбит и мелкодисперсный δ -феррит, располагающийся в виде цепочек по границам зёрен. Направление трещины совпадает с полосчатостью структуры.

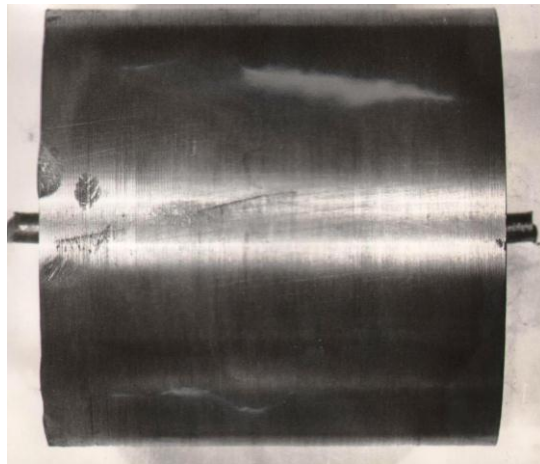
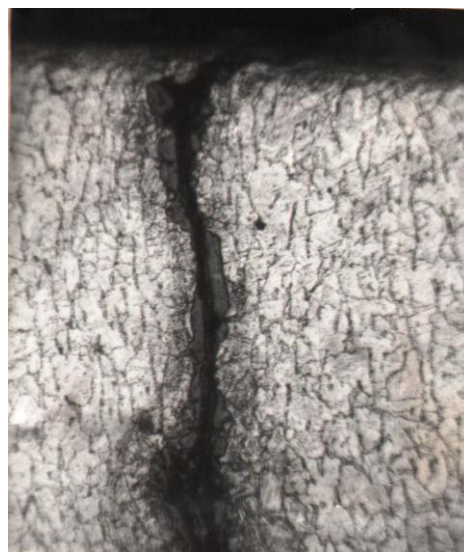


Рис. 9. Внешний вид дефекта на детали, 1:1



а



б

Рис. 10. Вид дефекта (*а*, *б*) на микрошлифе, $\times 100$

Вывод

Возникновение этих дефектов в стали связано в основном с необходимостью соблюдения и выполнения технологического процесса получения слитков из данной марки стали. При этом необходимо учитывать влияние каждой структурной составляющей - феррита и мартенсита, достигая их оптимального соотношения.

Библиографический список

1. Бородулин, Г.М. Нержавеющая сталь / Г.М. Бородулин, Е.И. Мошкевич. – М.: Металлургия, 1973. – 320 с.
2. Атлас дефектов стали / под. ред. М. Л. Берштейна. – М.: Металлургия, 1979. – 188 с.

3. **Сперанский, В.Г.** Технология производства нержавеющей стали / В.Г. Сперанский, Г.М.Бородулин. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по чёрной и цветной металлургии, 1957. – 203 с.
4. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. – Введ.1970-12-29. – М.: Государственный комитет стандартов совета министров СССР,1970. – 33 с.

*Дата поступления
в редакцию 17.06.2011*

V.S. Malov, V.A. Vasilev

RESEARCH OF DEFECTS OF INGOTS FROM THE STEEL 14X17H2

Given article serves as research of system of a quality management of production spent on Open Society «Shipbuilding yard «Krasnoe Sormovo» under the analysis of the typical defects formed at melt and casting of ingots from a steel 14X17H2. In it the most typical kinds of defects and a way of their elimination in the conditions of working manufacture are described.

Key words: microsection, macrosection, δ -ferrite, defect, ingot, sorbite.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 54.06

В.М. Воротынцев¹, С.С. Суворов², К.Ю. Смирнов²

ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОЧИСТОГО ОКСИДА ДИАЗОТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Фирма «ХОРСТ», Москва²

Разработана методика газохроматографического определения примесей постоянных газов (водорода, кислорода, азота, монооксида углерода), диоксида углерода и воды в оксиде диазота особой чистоты с использованием гелиевого разрядного детектора. Предел обнаружения составляет $0,1 \div 0,2$ млн⁻¹.

Ключевые слова: газовая хроматография, оксид диазота, закись азота, гелий разрядный детектор, анализ

Введение

Высокоочищенный оксид диазота N₂O (закись азота) применяют для получения слоев двуоксида кремния химическим или плазмохимическим осаждением из парогазовых смесей при пониженном давлении [1, 2, 3]. Оксид диазота, кроме того, используют для получения тонких пленок нитрида кремния [4]. Из наиболее характерных примесей, лимитируемых для применения в качестве материалов для электронной техники, являются в нашем случае вода, углерод и кислородсодержащие примеси. Перечень лимитируемых примесей оксида диазота представлен в табл. 1.

*Таблица 1***Требования, предъявляемые к оксиду диазота**

Наименование показателей	Техн. [5]	ОСЧ [6]	SEMI C3.13-93 [7]
N ₂ O, % не менее	7 99.7	999 99.	99.9994
H ₂ O, ppm, не более	250	4	1
O ₂ , ppm, не более	200	2	0.5
N ₂ , ppm, не более	200	3	3.0
CO ₂ , ppm, не более	25	6	0.5
Окислы азота, ppm, не более	0,5	5	0.1
CO, ppm, не более	5	-	0.1
SO ₂ , ppm, не более	1	5	-

Наличие примесей азота и кислорода приводит к изменению скорости роста пленок диоксид кремния, а также к его загрязнению нитридом. Влага и кислород приводят к неконтролируемому окислению кремния и способствуют формированию окисных ямок травления и включений. Источником углерода являются CO и CO₂. Внедряясь в структуры, углерод образует дефекты упаковки, вносит изменения в дискретные энергетические уровни и образует центры локализации зарядов и быстро-диффундирующих примесей [8].

Для определения примесей постоянных газов и диоксида углерода используют метод газовой хроматографии, характеризующийся экспрессностью и низким пределом обнаружения к лимитируемым в закиси азота примесям.

Для определения примесей постоянных газов и диоксида углерода используют хроматографические колонки, заполненные молекулярными ситами и порпаком Q [9]. Однако определение примеси диоксида углерода в закиси азота осложняется тем, что его пик закрывается пиком основы. В настоящее время для определения низких концентраций постоянных газов используют гелиевый ионизационный детектор (ГИД) с источником ионизирующего излучения [10] и ряд гелиевых разрядных детекторов (ГРД) [11]. Оба типа детекторов обладают одинаковой чувствительностью к постоянным газам $(10\div 100)\cdot 10^{-9}$ об. %. Использование ГРД предпочтительнее, поскольку его измерительная ячейка имеет более простую конструкцию, а сам детектор – более стабильные временные характеристики.

Целью настоящей работы является разработка методики анализа, позволяющей обеспечить постоянный аналитический контроль производства высокочистого оксида диазота.

Экспериментальная часть

Высокочистый оксид диазота получали путем глубокой очистки оксида диазота. Глубокую очистку оксида диазота от примесей проводили на установке, включающей криофильтр для очистки N_2O от воды, модуль низкотемпературной перегонки для очистки от примесей постоянных газов и модуль химического поглощения примеси диоксида углерода. Общая схема аналитического контроля производства закиси азота включает входной контроль сырья и тары под высокочистый продукт, контроль влажности на стадии криофильтрации, контроль содержания примесей постоянных газов при низкотемпературной перегонке и выходной контроль содержания лимитируемых примесей в расфасованном продукте.

Отбор пробы исходного вещества и высокочистого продукта производили непосредственно из баллонов, а при технологическом контроле – непосредственно из установки очистки по специальному трубопроводу. Для этого разработана встраиваемая в производственную установку система пробоотбора, позволяющая произвести напуск пробы в анализатор без использования промежуточных пробоотборных емкостей, что обеспечивает представимость пробы и экспрессность анализа.

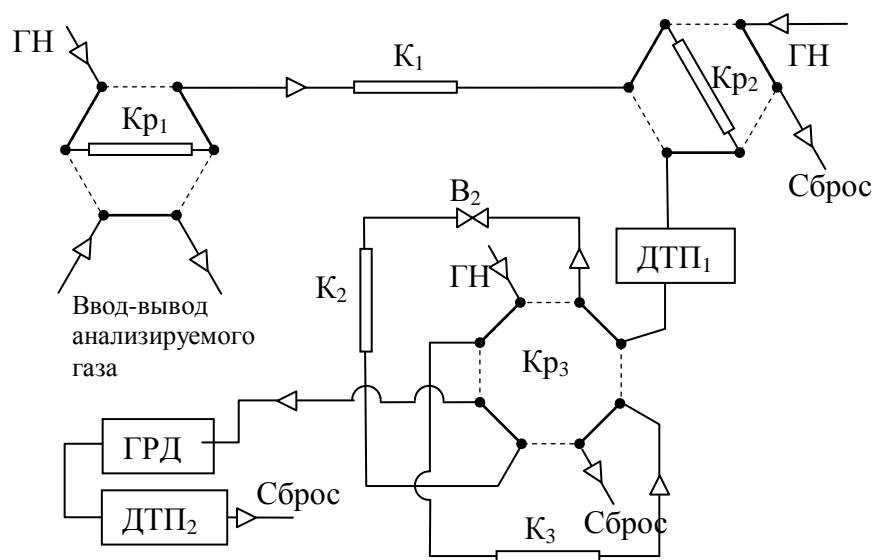


Рис. 1. Принципиальная газовая схема хроматографа для анализа закиси азота на содержание примесей постоянных газов и диоксида углерода:

K_1, K_2 – кран-дозатор первого и второго ввода соответственно; K_3 – переключающий кран; $K_1 - K_3$ – насадочные колонки; ГРД – гелиевый разрядный детектор; ДТП₁, ДТП₂ – каналы детектора по теплопроводности; ГН – газ-носитель; V_2 – вентиль тонкой регулировки

Для предотвращения искажения результатов анализа вследствие загрязняющего действия атмосферы все газовые линии аналитических систем тестировали на герметичность, а линии, подводящие пробу к анализаторам влажности, кроме того, постоянно продували инертным газом с влажностью не более $2 \cdot 10^{-6}$ об. %.

Для определения содержания примесей постоянных газов и диоксида углерода в закиси азота нами разработана двумерная хроматографическая система с ГРД, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. Система оборудована автоматическими дозирующим и переключающими кранами, колонкой K_1 с порпаком Q длиной 4 м и внутренним диаметром 4 мм., колонкой K_3 с порпаком Q длиной 4 м и внутренним диаметром 4 мм, колонкой K_2 с молекулярными ситами СаА длиной 6 м и внутренним диаметром 4 мм. Хроматограф оборудован системой напуска проточного типа с объемом дозы 3 мл. Кран Kp_2 служит для отсечения основы. В качестве газа-носителя использовали гелий качества 6.0, поток 60 мл/мин.

Идентификацию примесей проводили по времени удерживания. Концентрации рассчитывали методом абсолютной градуировки [12, 13]. Для градуировки использовали стандартные образцы, приготовленные в соответствии с [14]. Градуировку ГРД проводили по одной точке смесью с содержанием компонентов $(18 - 22) \cdot 10^{-4}$ об. % в гелии.

Результаты и обсуждение

На первом канале, включающем колонки K_1 и K_2 , производили определение примесей водорода, азота, кислорода и монооксида углерода. При этом колонка K_1 и переключающий кран Kp_2 служат для отделения основы от примесей, а колонка K_2 для разделения примесей постоянных газов (водород, кислород, азот, монооксид углерода). Момент переключения крана Kp_2 определяли по хроматограмме, записанной на ДТП с колонки K_1 , он выбирается в промежутке между концом пика постоянных газов и началом пика закиси азота. Все примеси детектировали на ГРД с пределом обнаружения 0,1–0,2 ppm (водород, азот, кислород) и 0,5 ppm (монооксид углерода).

На втором канале, включающем колонки K_1 и K_3 , производили определение примеси диоксида углерода: на первой колонке – частичное разделение примеси диоксида углерода и закиси азота, а краном Kp_2 – удаление большей части основы (рис. 2). На колонке K_3 производили полное разделение CO_2 и оксида диазота.

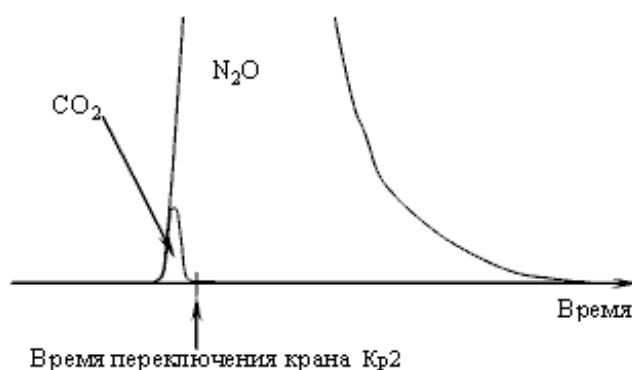


Рис. 2. Удаление основы при определении диоксида углерода в оксиде диазота

Время переключения крана Kp_2 определяли выполнением серии анализов искусственной смеси CO_2 в оксиде диазота, с временами переключения крана Kp_2 , отличающимися на 1 с.

Для определения содержания воды в закиси азота перед входом в хроматограф установлен сорбционно-емкостный датчик влажности [15] с минимальной определяемой концентрацией воды $0,5 \cdot 10^{-4}$ об. %.

На рис. 3 и рис. 4 представлены хроматограммы образцов оксида диазота. Базовая линия пиков показана линией в их основании. Перепады фонового сигнала связаны с изменением давления в линиях при переключении кранов.

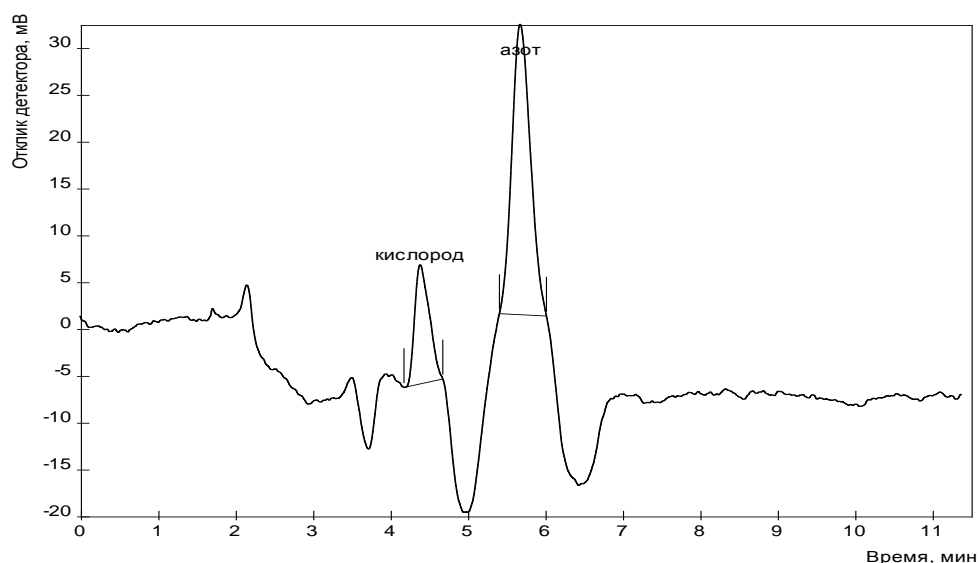


Рис. 3. Хроматограмма образца оксида диазота:
кислород – 1,0 ppm; азот – 1,7 ppm

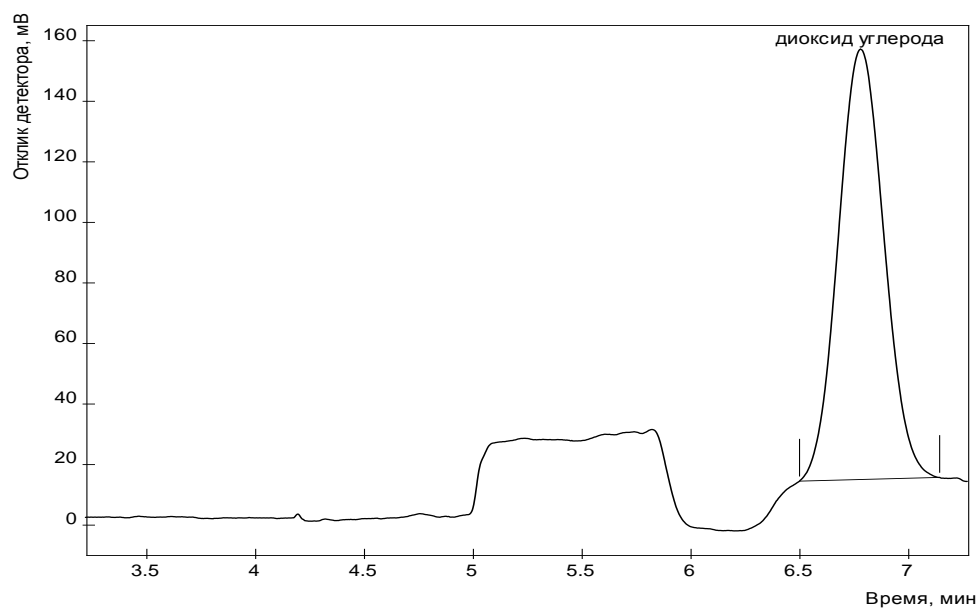


Рис. 4. Хроматограмма образца оксида диазота:
диоксид углерода – 5,0 ppm

Результаты определения исходного оксида диазота, полученного высокочистого оксида диазота, а также пределы обнаружения и допустимые концентрации примесей в высокочистом оксиде диазоте представлены в табл. 2. Для расчета предела обнаружения по 3σ -критерию [16] предварительно определяли аналитический сигнал холостого опыта и стандартное отклонение холостого опыта σ путем обработки результатов анализа гелия марки 6.0. Низкие пределы обнаружения позволяют выполнять сертификацию высокочистого оксида диазота электронной чистоты. Величины относительного стандартного отклонения высоты и площади пиков примесных компонентов при концентрации, превышающей предел обнаружения на порядок, не превышают 5%.

Таблица 2

Результаты определения примесей в оксиде азота квалификации 5.0

Компонент	Исходный оксид азота, ppm	Полученный оксид азота, ppm	Предел обнаружения, ppm	Требования SEMI C3.13-93, ppm
Вода	250	1,0	0,5	1
CO ₂	25	<0,1	0,1	0,5
H ₂	<0,2	<0,2	0,2	-
O ₂	20	<0,2	0,2	0,5
N ₂	50	0,9	0,2	3
CO	<0,5	<0,5	0,5	0,1

Библиографический список

1. Турцевич, А. С. Кинетика процесса осаждения слоев в системе SiH₄-N₂O в реакторе пониженного давления. Высокотемпературный окисел кремния / А.С. Турцевич, О.Ю. Наливайко // Поверхность: Рентген-, синхротронное и нейтронное исследование. 1996. С. 10–16.
2. Batey, J. Low-temperature deposition of high-quality silicon dioxide by plasma enhanced chemical vapor deposition / J. Batey, E. Tierniy // J. Appl. Phys., 1986. V.60. P. 3136–3145.
3. Szikora, S. Laser – induced deposition of SiO₂ / S. Szikora, W. Krauter, D. Baurle // Mater. lett. 1984. № 4а. P. 263–264.
4. Inushima, T. Film growth mechanism of photochemical vapor deposition / T. Inushima [at al.] // Appl. Phys. A. 1988. № 47. P. 229–236.
5. Азота закись ТУ 2114-051-00203772-2006.
6. Азота закись особой чистоты ТУ 2114-007-16424433-2007.
7. SEMI C3.50-95 Standard for nitrous oxide (N₂O), 99.9994 % quality (provisional).
8. Попенко, В. Ф. Газообразные технологические среды в производстве материалов микроэлектроники / В. Ф. Попенко [и др.] // Высокочистые вещества. 1987. № 3. С. 222–230.
9. Другов, Ю.С. Газохроматографический анализ газов / Ю.С. Другов, Л.А. Конопелько. – М.: МОИМПЕКС, 1995. С. 69–77.
10. Пат. РФ 2248564. G 01 N 27/62, 30/70, 30/95. Детектор для газовой хроматографии / Уваров В.В., Нистель И.Г. 20.03.2005
11. Raymond, P.W. Scott. Gas chromatography detectors / P. Raymond. – New York : Marcel Dekker, 1996. – 536 с.
12. Карабанов, Н.Т. Основные виды хроматографических процессов. Хроматографические материалы: учеб. пособие / Н.Т. Карабанов. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 1996. – 216 с.
13. Бражников, В.В. Детекторы для хроматографии / В.В. Бражников. – М.: Машиностроение, 1992. – 320 с.
14. ГОСТ 8.578-2002 Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах. – М.: Изд-во стандартов, 2002.
15. Берлинер, М.А. Измерение влажности / М.А. Берлинер. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
16. Дёрффель, К. Статистика в аналитической химии / К. Дёрффель. – М.: Мир, 1994. – 268 с.

Дата поступления
в редакцию 02.08.2011

V.M. Vorotyntsev, S.S. Suvorov., K.Ju. Smirnov

GAS CHROMATOGRAPHY ANALYSIS OF HIGH PURITY NITROUS OXIDE

The impurity determination in high purity nitrous oxide by GC with helium-discharged detector was carried out. As impurity were determined CO₂, H₂O and simple gases as hydrogen, oxygen, nitrogen and CO. The impurity determination lever was equal to 0,1-0,2 ppm.

Key words: gas chromatography, nitrous oxide, helium-discharged detector, analysis.

УДК 541.135.5 541.136.8

В.А. Козырин, В.Н. Флеров

ОСОБЕННОСТИ КАТОДНОГО РЕАГИРОВАНИЯ КИСЛОРОДА
НА УГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ В ЩЕЛОЧНО-ЦИНКАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Кислородный электрод на угольной основе в щелочно-цинкатных электролитах представляет собой многоэлектродную систему, компоненты которой могут реагировать между собой, образуя новую электрохимическую систему, влияя как на компромиссный потенциал, так и на катодный и анодный потенциалы электродов. Рассмотрены возможные механизмы катодного восстановления кислорода на угольных электродах на примере пористых электродов воздушно-цинковых элементов.

Ключевые слова: кислородный электрод, активированный угольный катод, щелочно-цинкатный электролит, воздушно-цинковый элемент.

Реакция восстановления кислорода является наиболее изученной в коррозионных процессах [1]. Большое внимание уделяется кислородным электродам в автономных химических источниках тока из-за неограниченности ресурсов кислорода и его высокого положительного потенциала. Известны солевые и топливные элементы, использующие механизмы воздушной деполяризации [2]. В большинстве аккумуляторных систем процессы, связанные с выделением и восстановлением кислорода, являются побочными [3, 4], влияющим на их емкость и коэффициент использования активных веществ.

Примером практического использования кислородного электрода являлись воздушно-цинковые элементы (ВДЦ) электрохимической системы $(-) \text{Zn} | 7\text{M KOH}, \text{ZnO}_2^{2-} | \text{O}_2 \text{ C} (+)$, ВДС-300, выпускавшиеся с 50-х годов двадцатого века для установок сигнализации и связи на железнодорожном транспорте [2]. Положительные микропористые электроды воздушной деполяризации (ВД) элементов ВДС изготавливались методом холодной прессовки из гидрофобного активного вещества на основе активированного угля марки КАД. Цинковые электроды монолитные; электролит – KOH, 7 М.

В таких электродах, согласно литературным данным [1, 5–7], катодное восстановление кислорода протекает двухстадийно, с промежуточным образованием пероксида водорода (процесс 2, табл. 1). Анодное окисление цинковых электродов сопровождается образованием псевдопересыщенных цинкатных растворов [2, 3].

Электроды с воздушной деполяризацией (ВД) могут служить хорошей моделью для изучения процессов, протекающих на положительных электродах и в других щелочно-цинковых элементах и аккумуляторах.

Таблица 1

Стандартные потенциалы электродных стадий кислородного процесса
в щелочных электролитах

№ п/п	Электродный процесс	Стандартный потенциал E^0 , В	
		по НВЭ	по Zn
1	$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e} \leftrightarrow 4 \text{OH}^-$	+ 0,401	+1,62
2	$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e} \leftrightarrow \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$	- 0,08	+1,14
3	$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e} \leftrightarrow 3 \text{OH}^-$	+ 0,88	+2,1
4	$\text{O}_2^- + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{e} \leftrightarrow \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$	+0,413	+ 1,632
5	$\text{HO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + \text{e} \leftrightarrow \text{OH}^- + 2\text{OH}^-$	- 0,240	+0,97

Особенностью кислородного электрода в элементах ВДЦ (так и в других его вариантах) является значительное снижение компромиссной (бестоковой) величины потенциала от термодинамического значения его стандартного потенциала, связанного с реакцией:



На рис. 1 представлены разрядные кривые кислородного электрода (1 и 2), полученные экспериментально, и термодинамические потенциалы соответствующих равновесиям реакций, представленных в табл. 1 [5, 6].

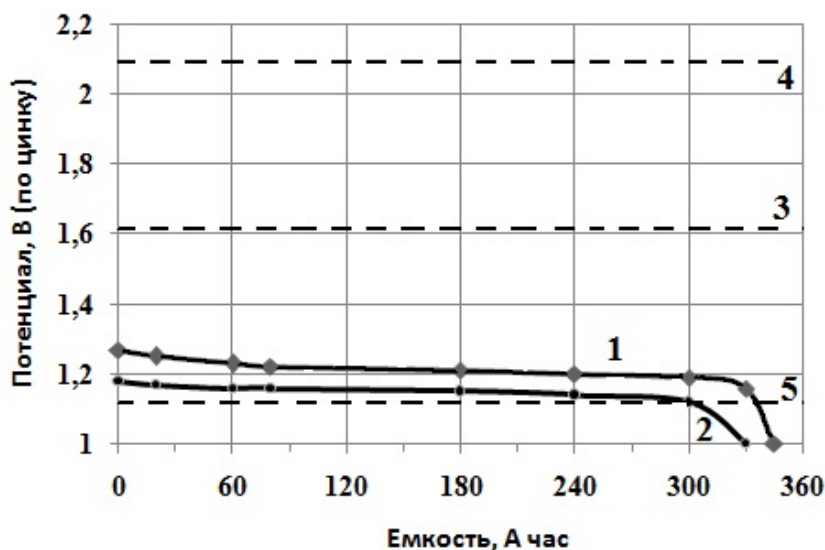


Рис. 1. Разрядные кривые угольных воздушных электродов из элементов ВДЦ-300 при различных температурах и токе разряда:

1 – 0,5 А ($j_{\text{раз.}} = 3 \text{ мА/см}^2$), температура комнатная; 2 – 0,25 А, температура – 30°C;
Пунктир - стандартные потенциалы реакций по данным таблицы; 3 – $\text{O}_2 \leftrightarrow \text{OH}^-$ (реакция 1);
4 – $\text{HO}_2^- \leftrightarrow \text{OH}^-$ (реакция 3); 5 – $\text{O}_2 \leftrightarrow \text{HO}_2^-$ (реакция 2)

Отличие бестокового потенциала кислородного электрода от его расчетной величины отмечалась и ранее [1,2]. Из рис. 1 следует, что разрядный потенциал воздушного электрода близок, но более положителен, чем потенциал электродной стадии 2 (табл. 1):



Это означает, что катодное восстановление кислорода в щелочных растворах должно останавливаться на стадии образования пероксида водорода. Действительно, пероксид HO_2^- , как промежуточный продукт реакции восстановления кислорода в щелочных растворах, фиксировался в работах многих исследователей [1, 7–9].

Однако данная реакция вызывает известные возражения, в частности, отсутствие перехода перекиси водорода в электролит работающих элементов и высокая стабильность катодного потенциала электродов ВД (рис. 1), что не характерно для перекисного процесса из двух последовательных стадий с участием ионов HO_2^- (стадии 2, 3, 5 табл. 1). Это указывает на наличие внутриэлектродных превращений исходного окислителя O_2 в объеме микропористых электродов ВД.

Система кислородного электрода в цинкатном электролите представляет сложную многокомпонентную систему: кислород O_2 – уголь (С) – цинкат ZnO_2^{2-} , составляющие которой могут реагировать между собой, образуя при этом новую электрохимическую систему.

В цинкатных электролитах наблюдается сдвиг компромиссного потенциала кислородного электрода примерно на 0,2 В с 1,62 В до 1,425 В, а разрядного потенциала на ~ 0,4 В в область более отрицательных значений. Разрядный потенциал кислородного электрода более далекий от потенциала электродной стадии 4 (см. рис. 1):



Это может свидетельствовать о смене лимитирующей стадии восстановления кислорода в цинкатных электролитах.

Угольная поверхность исследованных ВД электродов обладает высокими адсорбционными и химико-каталитическими свойствами [7,10], на которой наблюдается совместная адсорбция ионов O_2^{2-} , цинката (ZnO_2^{2-}) и цинка (Zn^{2+}). Энергия связи в ионе O_2^{2-} небольшая ~ 200 кДж/моль и по этой причине в условиях катодной поляризации на угольной поверхности могут наблюдаться процессы, приводящие к стабилизации этого иона, например, за счет образования пероксида цинка ($\Delta H_{\text{обр}} = -350$ кДж/моль) [11]:

Косвенным подтверждением образования пероксида цинка являются данные М.Р. Тарасевича [7,9], согласно которым при электровосстановлении кислорода на диске с кольцом в растворах КОН и с добавками $\sim 10^{-2}$ моль/л ионов Ba^{2+} и Ca^{2+} с увеличением концентрации специфически адсорбированных ионов Ba^{2+} и Ca^{2+} наблюдалось уменьшение количества пероксида водорода, фиксируемого на кольце. По мнению авторов, наличие упомянутых адсорбированных катионов приводит к упрочнению связи хемосорбированного кислорода с поверхностью электрода, что формально отвечает возможности образования на поверхности соединений типа BaO_2 и CaO_2 .

Чтобы оценить область начала образования ZnO_2 , нами были проведены следующие эксперименты. Цинковый электрод циклировали в потенциодинамическом режиме в транспассивной области в интервале потенциалов $E_k - E_a$, где $E_k = 0,380$ В (по цинку) – катодный конец циклирования, а в каждой следующей серии измерений потенциал E_a варьировался.

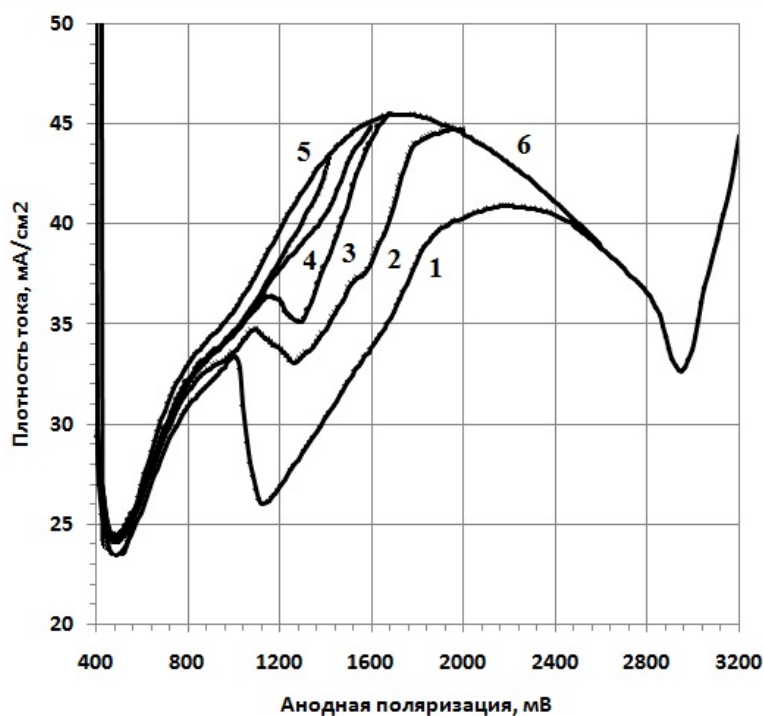


Рис. 2. Циклические анодные поляризационные кривые в транспассивной области цинкового электрода в 7 М КОН, скорость развертки потенциала 4 мВ/с

На рис. 2 показаны области изменения поляризаций, мВ: 1 – 2600 – 380 – 2600; 2 – 2000 – 380 – 2000; 3 – 1800 – 380 – 1800; 4 – 1600 – 380 – 1600; 5 – 1400 – 380 – 1400; 6 – анодная кривая 380 – 3200.

В первой серии E_a был равен +3,2 В; во второй +3,0 В и т.д. со снижением потенциала до $E_a = 1,4$ В, где уже не наблюдалась обсуждаемая далее волна восстановления ZnO_2 .

Из рис. 2 следует, что на катодных зависимостях тока явно видна волна, начинающаяся при $\sim 1,6$ В с максимумом тока восстановления при $\sim 1,2$ В, связанного, по-видимому, с восстановлением пероксида цинка.

При окислении цинка в области анодных потенциалов менее 1,5 В волна восстановления ZnO_2 на потенциодинамических кривых отсутствует и исчезает желтый налет на поверхности электрода, что свидетельствует об отсутствии ZnO_2 .

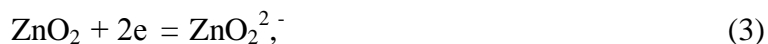
Следует обратить внимание, на то, что энтальпии образования ΔH° пероксида и оксида цинка практически совпадают: для $ZnO_2 = -350$, а для $ZnO = -350,8$ кДж/моль [10, 11]. Энтропии ZnO и ZnO_2 должны различаться и ZnO_2 , из-за повышенной сложности молекулы, имеет значение энтропии больше, чем у ZnO ($S_{ZnO} = 44$ Дж/моль·К). Для ZnO_2 значений энтропии нами не найдено. В то же время анализ значений энтропий оксидов металлов в разной степени окисления показало, что энтропия высших оксидов отличается от энтропии более низших в 1,1 до 1,4 раза. На этом основании примем два крайних значения энтропии 48 и 62 Дж/моль·К. С учетом этого, используя термодинамические данные и приняв температуру равной 298 К, можно оценить равновесный потенциал образования ZnO_2 , используя в качестве модельных реакций:



Для этих реакций все термодинамические данные за исключением энтропии ZnO_2 имеются в справочниках.

Расчеты показывают, что вклад энтропии ZnO_2 в энергию Гиббса реакции (E) незначителен и при значении энтропии 48 Дж/моль·К равна $\Delta G^\circ = -53,9$ кДж/моль, а при $S = 62$ Дж/моль·К значение ΔG° составляет $-58,64$ кДж/моль. Используя равенство $\Delta G = -zFE$, найдем равновесные потенциалы, которые равны +0,14 В (по н.в.э.) или +1,36 В по цинку и +0,15 В (по н.в.э.) или +1,37 В по цинку соответственно. Как видно, значения потенциалов довольно далеки от значений, полученных опытным путем.

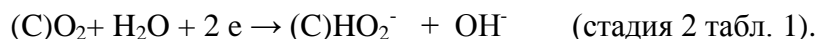
Расчеты, проведенные для реакции



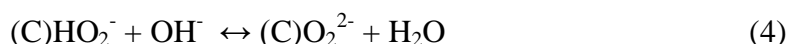
дали значения $\Delta G^\circ = -59$ кДж/моль и $E_{равн} = 0,305$ В (н.в.э.) или 1,53 В по цинку, что практически совпадает со значениями потенциалов начала образования и восстановления ZnO_2 . Из диаграммы Пурбе для цинка [11] следует, что образование ZnO_2 в области наших значений рН возможно при $E \geq 0,35$ В по н.в.э. или 1,57 В по цинку.

Из приведенных данных следует, что для образования ZnO_2 необходимо присутствие на поверхности электрода ионов ZnO_2^{2-} .

Внутриэлектродные химические преобразования кислорода на угольном катоде в цинкатном электролите на первой стадии процесса могут быть условно описаны последовательностью:



Перекись водорода обладает двоякими свойствами – может подвергаться восстановлению и окислению [1, 7, 8]. Поэтому, предполагаемая стадия 2 (табл. 1), будучи обратимой, может в начальный момент разряда описана равенством:



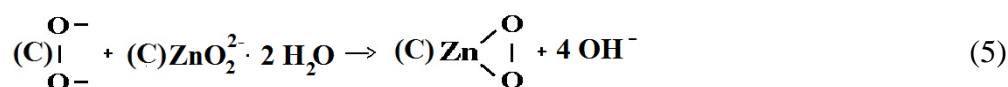
Эта трансформация кислорода, имеющая каталитический характер, будет предпочтительнее, чем обычное разложение перекиси до молекулярного кислорода [1,7, 10] из-за наличия в ней электрохимической стадии. Реакция разложения перекиси протекает внутри электрода в его тонких слоях, прилегающих изнутри к токоотводящей металлической сетке электрода. Это и является причиной снижения компромиссного потенциала электродов ВД на 0,2 В.

При разряде элементов ВД первичное образование ион-молекул кислорода непрерыв-

но происходит за счет внешнего тока с новыми порциями кислорода, поставляемыми в электрод взамен израсходованного.

В щелочном электролите, согласно кинетических исследований Красильщикова [8,12], первичная трансформация O_2 протекает до образования ион-молекулы O_2^{2-} , с относительно небольшой энергией связей (~ 200 кДж/моль) [10]. В цинкатных электролитах на реакционной угольной (катодной) поверхности таких электродов будет проходить соадсорбция молекул кислорода и ионов цинката. В условиях катодной поляризации электродов ВД на угольной поверхности будут наблюдаться каталитические процессы, приводящие к стабилизации цинкатом ион-молекул кислорода [7, 10], с образованием перекиси цинка ($\Delta H_{обр.} = - 350$ кДж/моль) [11]. Рецептуры получения разных модификаций перекисей цинка и их свойства сведены в детальном обзоре [13]. Такие стабилизированные ион-молекулы кислорода имеют структуру аналогичную перекиси водорода.

Проходя через активную массу электрода, ион-молекулы кислорода до участия в электрохимическом процессе будут подвергаться трансформации до перекиси цинка:



Каталитически образованная малорастворимая в цинкатном электролите перекись цинка обладает достаточной катодной активностью, низкой поляризацией из-за хорошей растворимости продуктов разряда



Катодные токи электродов ВД были, однако, относительно невысокими из-за ограниченной скорости доставки извне кислорода (рис. 1).

Часть перекиси водорода может реагировать в катодном процессе по стадии 3 (табл. 1) на предельном токе, несколько повышая разрядный потенциал электродов ВД.

Отсутствие перехода перекиси водорода в электролит может быть связано также с ее трансформацией в обменной реакции диспропорционирования [10] во внутриэлектродных слоях электродов ВД с ионами цинката и образованием перекиси цинка



Формирование в электродах ВД перекиси цинка с присущим ей потенциалом наблюдается только при двух условиях: угольной основы электрода и наличия цинката в электролите. Это меняет электрохимическую систему кислородного электрода ВД: с $(C)O_2 | KOH$ на новую электрохимическую систему $(C)ZnO_2 | KOH, ZnO_2^{2-}$. Перекись цинка, являющаяся потенциалопределяющим веществом электродов ВД, как стабильный продукт неполного восстановления кислорода будет иметь менее положительный потенциал, чем у кислорода, что снижает на $\sim 0,3 \div 0,4$ В разрядный потенциал кислородного электрода (реализуемый на его токоотводящем корпусе) по сравнению с термодинамической величиной катодного реагирования O_2^{2-} .

Катодные разрядные кривые электродов ВД из элементов ВДС представляют собой прямолинейные зависимости, без каких-либо задержек, изломов с небольшим возрастанием поляризации при низких температурах и повышением разряженности элементов. Такие электроды сохраняли свою работоспособность после нескольких смен электролита.

Вывод

Высокая катодная поляризация кислородного процесса на угольных электродах ВД в цинкатных электролитах обусловлена начальными электрохимической и химико-каталитической внутриэлектродной трансформацией кислорода в катодно активную перекись цинка, катодное восстановление которой протекает с пониженным электродным потенциалом.

Библиографический список

1. **Дамаскин, Б.Б.** Электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий, Г.А. Цирлина. – М. Химия, 2001. – 624 с.
2. **Багоцкий, В.С.** Новейшие достижения в области химических источников тока / В.С. Багоцкий, В.Н. Флеров. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1963. – 256 с.
3. **Багоцкий, В.С.** Химические источники тока / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 345 с.
4. **Варыпаев, В.Н.** Химические источники тока / В.Н. Варыпаев, М.А. Дасаян, В.А. Никольский; под ред. В.Н. Варыпаева. – М.: Высш. шк., 1990. – 240 с.
5. **Лидин, Р.А.** Константы неорганических веществ / Р.А. Лидин, Л.Л. Андреева, В.А. Молочко; под ред. Р.А. Лидина. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2006. – 685 с.
6. Справочник по электрохимии / под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1981. – 488 с.
7. **Тарасевич, М.Р.** Электрохимия углеродных материалов / М.Р. Тарасевич. – М.: Наука, 1983. – 253 с.
8. **Красильщиков, А.И.** Электрохимические реакции кислорода / А.И. Красильщиков // Труды 4-го совещания по электрохимии (1-6 октября 1956 г.). – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. С. 272–277.
9. **Тарасевич, М.Р.** Механизм и кинетика электровосстановления кислорода на металлических электродах / М.Р. Тарасевич, Е.И. Хрущева // Итоги науки и техники, серия Электрохимия. М. ВИНТИ, 1981. Т. 17. С. 42–85.
10. **Полинг, Л.** Общая химия / Л. Полинг; под ред. М.Х. Карапетьянца. – М.: Мир, 1974. – 847 с.
11. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. – М.-Л.: Химия, 1966. Т 3. – 1005 с.
12. **Красильщиков А.И.** О некоторых особенностях процессов кислородной деполяризации // Журн. физич. химии. 1957. N 31. С. 2706–2709.
13. Перекись водорода и перекисные соединения / под ред. М.Е. Позина. – М.-Л.: ГОСХИМИЗДАТ, 1951. – 475 с.

*Дата поступления
в редакцию 11.07.2011*

V.A. Kozirin, V.N. Flerov

**THE SPECIALTIES OF OXYGEN CATHODE REACTION ON CARBON ELECTRODES
IN ALKALINE – ZINC SOLUTIONS**

Oxygen coal-based electrode represents multielectrode system in alkaline – zinc solutions where its components can react against each other forming new electrochemical system and having influence with compromise potential (mixed potential) and cathode and anode electrodes potentials. Possible mechanism of oxygen cathode reduction on carbon electrodes are considered as exemplified by porous electrodes air-zinc elements.

Key words: oxygen electrode, activate carbon cathode, alkaline-zinc solution, air-zinc element.

УДК: 547-311

С.М. Данов, А.В. Сулимов, Т.А. Рябова, А.А. Овчаров

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОКСИДА ПРОПИЛЕНА

Представлен обзор промышленных способов получения оксида пропилена, рассмотрены их преимущества и недостатки. Исследован процесс производства оксида пропилена гетерогенно-каталитическим окислением пропилена водным раствором пероксида водорода в среде органического растворителя в присутствии титансодержащего силикалита и дана оценка перспектив его промышленной реализации.

Ключевые слова: оксид пропилена, эпоксидование, пероксид водорода, гетерогенный катализ.

Оксид пропилена является важным продуктом основного органического и нефтехимического синтеза. Он используется для производства целого ряда важнейших продуктов нефтехимии, таких как полиуретаны, гликоли, косметические средства, медицинские препараты и др. Жесткий полиуретан широко применяется в строительстве, производстве мебели, транспорте, обувной промышленности. Применение пенополиуретанов для теплоизоляции позволяет решить очень важную проблему современности - проблему энергосбережения. Есть мнение, что количество потребляемого страной полиуретана является показателем ее экономической стабильности.

Оксид пропилена применяется в качестве фумиганта для стерилизации упакованных продовольственных продуктов и других материалов. Кроме того, он является исходным сырьем для получения пропиленкарбоната, изопропаноламинов, полиоксипропиленполиолов, полипропиленоксида, пропиленоксидных каучуков, пропиленсульфида, синтетических смазочных масел и некоторых ПАВ. Пропиленоксид – промежуточный продукт при синтезе эфиров пропиленгликоля, эпихлоргидриновых каучуков, полиуретанов и полиэфирных смол (простых полиэфиров).

Мировое производство оксида пропилена оценивается в 7,1 млн т в год, при этом за последнее десятилетие наблюдается устойчивый рост спроса на оксид пропилена и продукты на его основе. В 2010 г. спрос на данный продукт может превысить 8 млн т в год [1]. В России в настоящее время оксид пропилена производится на двух предприятиях, суммарная мощность которых не превышает 125 тыс. т в год.

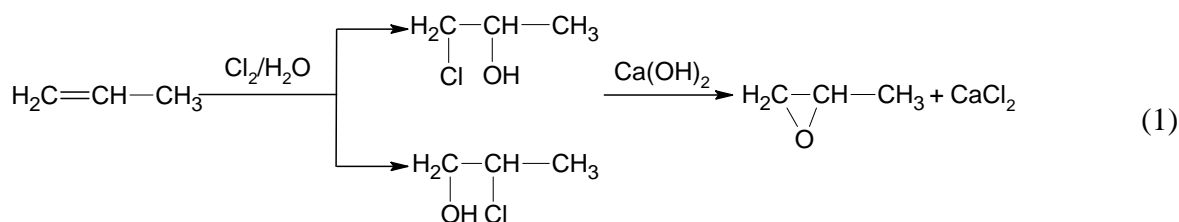
В настоящее время известны следующие методы получения пропиленоксида:

- хлоргидринный;
- электрохимический;
- эпоксидование пропилена надкислотами;
- окисление пропилена молекулярным кислородом (в газовой и жидкой фазах; сопряженное окисление; в присутствии уксусной кислоты);
- окисление пропилена пероксидами углеводов.

Основными промышленными процессами получения оксида пропилена как в России, так и за рубежом являются хлоргидринный и окисление пропилена пероксидами углеводов. Остальные методы не получили особого развития, хотя некоторые из них были реализованы в промышленных масштабах.

Основы технологии хлоргидринного процесса были разработаны еще в 20-х годах прошлого столетия. Распространению этого способа получения оксида пропилена способствовало то обстоятельство, что в результате успешного внедрения производства этиленоксида прямым окислением высвободились крупные производственные мощности, ранее использовавшиеся для синтеза этиленоксида, которые были быстро реконструированы для производства пропиленоксида.

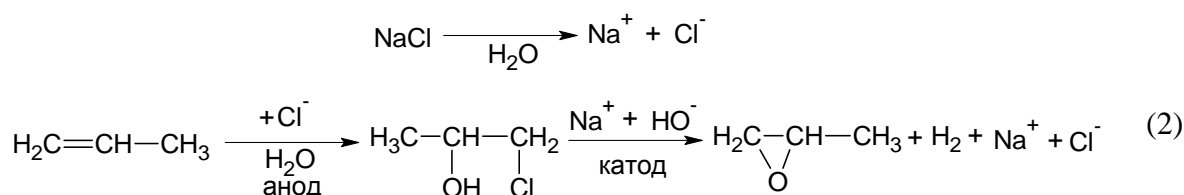
Процесс образования целевого продукта протекает через промежуточное образование пропиленхлоргидрина, который в дальнейшем подвергается омылению известковым молоком:



В качестве побочных продуктов образуются: дихлорпропан, изомерные дихлордипропиловые эфиры, хлорацетон и др. Выход пропиленхлоргидринов составляет 87–90%, а выход пропиленоксида – 95% от образующегося пропиленхлоргидрина.

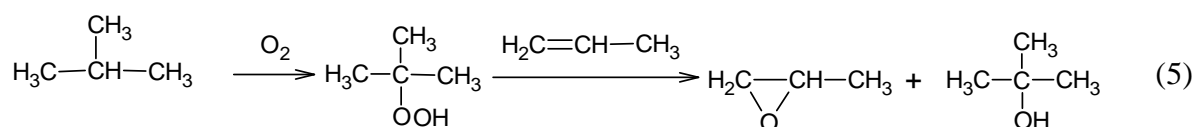
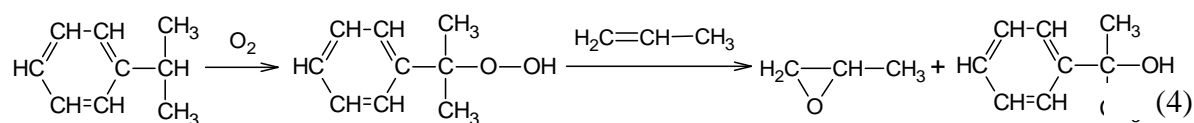
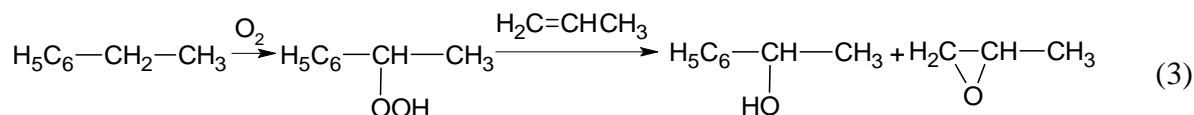
Однако этот метод имеет существенные недостатки, связанные с использованием дорогостоящих свободного хлора и гидроксида кальция, а также с образованием больших количеств разбавленного (5–6%) раствора хлорида кальция.

Интересным направлением повышения экономической привлекательности хлоргидринного метода является электрохимический метод получения оксида пропилена, сущность которого состоит в проведении в одном аппарате электролиза поваренной соли, гипохлорирования пропилена и омыления образующегося пропиленхлоргидрина раствором NaOH, полученным в катодном пространстве электролизера. Суммарная реакция может быть представлена схемой



Степень превращения пропилена 20–25 % при селективности 80–98%. К преимуществам данного процесса относится отсутствие сточных вод и незначительный выход побочных продуктов. Однако простота электрохимического метода является кажущейся, при выделении оксида пропилена из раствора электролита часть его с большой скоростью гидратируется в пропиленгликоль и другие продукты. Кроме того, очистка электролита от органических соединений представляет собой сложную технологическую операцию, в связи с этим метод очень ограниченно применяется в промышленности.

Начиная с 1968 г. появился альтернативный способ синтеза оксида пропилена, основанный на взаимодействии пропилена с органическими гидропероксидами. Этот метод получил название Халкон-процесс (по названию фирмы, впервые разработавшей этот процесс). Он реализован в промышленном масштабе как в стирольном (3), кумольном (4), так и в изобутиленовом вариантах (5).



Процессы проводят в присутствии растворимых катализаторов (солей молибдена, вольфрама, ванадия, титана и др.) при температуре 100-150⁰С и давлении 2-5 МПа. Выход оксида пропилена по гидроперекиси достигает 80-90 %. В настоящее время запатентованы различные модификации метода, отличающиеся, главным образом, составом катализатора. Данный способ производства оксида пропилена позволил устранить основные недостатки, присущие хлоргидринному методу, однако, халкон-процесс осложнен образованием сопутствующих продуктов (метилфенилкарбинол, трет-бутиловый спирт и др.), осложняющих стадию выделения целевого продукта и требующих разработки эффективных путей их утилизации. Кроме того, в процессе используется гомогенный катализатор, который необходимо отделять от продуктов реакции и регенерировать.

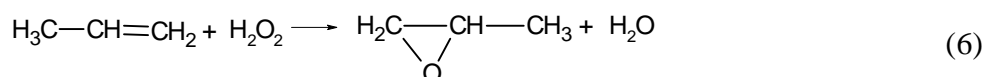
Учитывая недостатки существующих методов, постоянно возрастающий спрос на оксид пропилена, проблема разработки новых, более эффективных способов его производства является актуальной и своевременной задачей, привлекающей внимание ученых всего мира. В последние 10 лет наметилась тенденция, направленная на разработку гетерогенно-каталитических способов получения оксида пропилена, основанных на использовании в качестве окислителя молекулярного кислорода и пероксида водорода, поскольку оба эти окислителя являются экологически чистыми и недорогими. Окисление молекулярным кислородом при «комнатных условиях» остается наиболее предпочтительным, однако до сих пор такой процесс не представляется возможным. Поэтому все более популярным становится использование второго «зеленого» окислителя – пероксида водорода, который называют «восходящей химической звездой» и «идеальным окислителем», так как единственным образующимся из него побочным продуктом является вода, а по процентному содержанию кислорода в молекуле пероксид водорода стоит на втором месте после молекулярного кислорода. Несмотря на то, что стоимость пероксида водорода выше, чем стоимость кислорода, использование первого окислителя часто оказывается предпочтительнее, поскольку стоимость технологического оборудования для окисления с участием пероксида водорода в целом ниже, чем для окисления кислородом, которое, как правило, ведут при повышенных температурах и давлениях.

Многие исследователи с целью упрощения и удешевления процесса, а также снижения больших объемов побочных продуктов, пытались синтезировать оксид пропилена из пропилена и пероксида водорода. Основным сдерживающим фактором применения пероксида водорода в процессе эпоксидирования пропилена было отсутствие активного и селективного катализатора процесса. Существенный прорыв в этой области впервые удалось сделать ученым компании EniChem (Италия), которые в 1983 г. сообщили о получении высокоактивного гетерогенного катализатора окисления органических соединений водным раствором пероксида водорода [2]. Основные подходы к решению этой задачи были заложены в концепции, возникшей на стыке гомогенного и гетерогенного катализа и получившей название «одноцентрового катализа» (single-site catalysis). Согласно этой концепции, идеальный катализатор должен содержать равномерно распределенные и прочно связанные с поверхностью твердого носителя изолированные активные центры унифицированного состава и строения. Таким образом, удалось разработать катализатор для процессов жидкофазного окисления, который имеет неорганическую металл-оксидную природу и термодинамически устойчив к окислению. Таким катализатором стал синтетический микропористый титансодержащий силикалит структуры MFI. Перспективность данного катализатора заключается еще и в том, что возможно взаимосвязанное управление составом и микроструктурой катализатора на молекулярном уровне на стадии его синтеза, что позволяет получать гетерогенные контакты с заданными каталитическими свойствами.

Лабораторные испытания нового класса катализаторов показали их высокую эффективность и возможность использования при гидроксिलировании ароматических соединений [3], аммоксимировании циклогексанона в оксим [4], окислении спиртов до альдегидов и ке-

тонов [5], эпексидировании олефинов [6,7], окислении алканов [8,9], тиоэфиров [10], аминов [11] и др.

Нами были проведены исследования возможности применения титансодержащих силикалитов в процессе эпексидирования пропилена водными растворами пероксида водорода в среде органического растворителя. В ходе исследования было установлено, что использование титансодержащих силикалитов позволяет устранить недостатки, присущие традиционным способам получения оксида пропилен. В основе процесса лежит реакция прямого взаимодействия молекулы пропилен с молекулой пероксида водорода, приводящая к образованию целевого продукта и выделению молекулы воды:



Отличительной особенностью реакции является то, что она проводится при умеренных температурах (30-60 °С) и невысоких давлениях (3-8 атм.). Поскольку пропилен и пероксид водорода плохо смешиваются и практически взаимонерастворимы, процесс необходимо осуществлять в среде органического растворителя (низкомолекулярные спирты C₁-C₅), где растворитель играет роль гомогенизатора пропилен и пероксида водорода, обеспечивая их взаимодействие на поверхности твердого катализатора. Проведенные нами исследования показали, что роль растворителя нельзя сужать лишь до транспортной функции. Было установлено [12], что растворитель является не только гомогенизатором смеси исходных реагентов процесса эпексидирования, но и принимает активное участие в стабилизации Ti-пероксиокомплекса, образуемого молекулой пероксида водорода на титановом центре катализатора (рис. 1). Следует отметить, что увеличение размеров алкильного радикала R в молекуле спирта и соответственно размеров переходного комплекса усложняет подход молекулы олефина к активированному комплексу и затрудняет акт передачи кислорода. Поэтому самый высокий выход оксида пропилен достигается при использовании в качестве растворителя метанола. В связи с изложенным все дальнейшие исследования проводились в присутствии метанола.

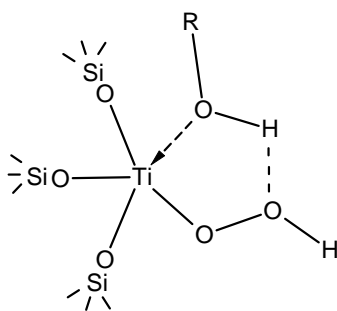
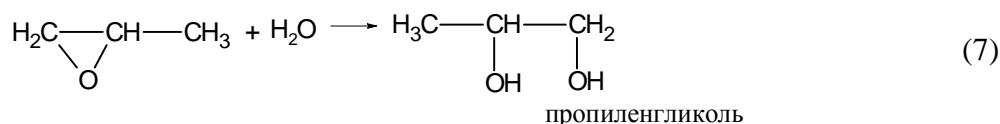


Рис. 1. Ti-пероксиокомплекс, образуемый молекулой пероксида водорода на титановом центре катализатора

Наряду с целевой реакцией образования оксида пропилен возможно протекание и ряда побочных процессов, приводящих к образованию незначительных количеств пропиленгликоля (7), 1-метокси-2-пропанола (8), 2-метокси-1-пропанола (9) и в очень незначительных количествах монометилового эфира дипропиленгликоля, 1-(2-метокси-2-метилэтокси)-пропанола-2, 2-(2-метокси-2-метилэтокси)-пропанола-1 и др.



что наиболее удобным методом синтеза титансодержащего силикалита является золь-гель способ [14, 15], основанный на гидролизе растворов алкоксидов кремния и титана в присутствии структурообразующего основания – тетрапропиламмоний гидроксида. Преимуществом метода является возможность взаимосвязанного управления составом и микроструктурой силикалита титана на молекулярном уровне и формирования материала в порошки, гранулы различного размера и формы с заданными каталитическими свойствами. После экспериментального изучения различных факторов, влияющих на активность получаемых образцов титансодержащего силикалита, была разработана оптимальная рецептура и условия его синтеза. На втором этапе, на базе полученного оптимального катализатора, было проведено экспериментальное исследование процесса эпоксицирования пропилена водным раствором пероксида водорода в среде метанола. В рамках данного направления мы изучили влияние различных факторов (начальное соотношение реагентов, температуры и др.) на процесс получения оксида пропилена. В результате исследования были найдены условия проведения процесса эпоксицирования, позволяющие получать оксид пропилена с выходом не менее 95% (на превращенный пероксид водорода) при количественном превращении пероксида водорода.

В условиях процесса, близких к оптимальным, нами были проведены кинетические исследования и построена кинетическая модель процесса эпоксицирования пропилена водным раствором пероксида водорода в среде метилового спирта на гетерогенном катализаторе. На основании экспериментальных данных, полученных на лабораторной установке периодического действия, оценены константы скорости и энергии активации целевой и побочных реакций и проведена проверка адекватности данной модели по критерию Фишера. С помощью разработанной математической модели был оптимизирован режим работы реактора эпоксицирования пропилена водным раствором пероксида водорода в среде метанола и определены оптимальные параметры проведения процесса.

В настоящее время проводится изучение фазовых равновесий в системе продуктов синтеза оксида пропилена, на базе анализа результатов которого будет разработан узел выделения целевого продукта.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что метод прямого эпоксицирования пропилена водным раствором пероксида водорода в среде органического растворителя на гетерогенном катализаторе является перспективным способом получения оксида пропилена. Кроме того, данный процесс имеет по сравнению с существующими и экономические преимущества: относительно низкий уровень капитальных затрат, низкое энергопотребление, а самое главное, отсутствие зависимости от рынков сбыта побочных продуктов. Среди явных экологических преимуществ процесса следует выделить отсутствие опасного и токсичного реагента – хлора, солей тяжелых металлов, рецикл пропилена и растворителя метанола. Таким образом, процесс прямого эпоксицирования пропилена пероксидом водорода на титансодержащем силикалите может быть рекомендован для промышленного применения.

Библиографический список

1. **Ашпина, О.И.** Новые технологии окисления / О.И. Ашпина, С.К. Ким // The Chemical Journal. 2007. № 10. С. 20–24.
2. Пат. 4410501 США, МКИ C01B 33/20. Preparation of porous crystalline synthetic material comprised of silicon and titanium oxides / Taramasso M., Perego G., Notari B. № 393379; заявл. 29.07.82; опубл. 18.10.83, – 8с.
3. Grieneisen, J.L. Synthesis of TS-1 in fluoride medium. A new way to a cheap and efficient catalyst for phenol hydroxylation / J. L.Grieneisen [at al.] // Microporous and Mesoporous Materials. 2000. № 37. P. 379–386.
4. **Xinhua Liang.** Process integration of H₂O₂ generation and the ammoximation of cyclohexanone / Xinhua Liang, Zhentao Mi, Yaquan Wang // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 2004. № 79. P. 658–662.
5. **Maspero, F.** Oxidation of alcohols with H₂O₂ catalyzed by Titanium Silicalite-1 / F. Maspero, U. Romano // Journal of Catalysis. 1994. № 146. P. 476–482.

6. **Gang, Li.** Effect of solvents on propene epoxidation catalyzed by titanium silicalite / Gang Li [at al.] // *React. Kinet. Catal. Lett.* 2004. V. 82, № 1. P. 73–80.
7. **Lin Huang.** Highly Selective Epoxidation of 1-Pentene with H₂O₂ over TS-1 / Lin Huang [at al.] // *Bull. Korean Chem. Soc.* 1999. V. 20, № 6. P. 747-748.
8. **Corma, A.** Lewis acids as catalysts in oxidation reactions: from homogeneous to heterogeneous systems / A. Corma, H. Garcia // *Chem. Rev.* 2002. № 102. P. 3837–3892.
9. **Istvan, H.** Efficient oxyfunctionalization of n-hexane by aqueous H₂O₂ over a new TS-PQ catalyst / Istvan Halasz [at al.] // *Catalysis Today.* 2003. № 81. P. 227–245.
10. **Robinson, D.J.** Oxidation of thioethers and sulfoxides with hydrogen peroxide using TS-1 as catalyst / Denis J. Robinson, Lucinda Davies, Neil McGuire // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2000. № 2. P. 1523–1529.
11. **Reddy, J.S.** Selective oxidation of secondary amines over titanium silicalite molecular sieves, TS-1 and TS-2 / J. Sudhakar Reddy, Pierre A. Jacobs // *Catalysis Letters.* 1996. № 37. P. 213–216.
12. **Данов, С.М.** Влияние природы растворителя на процесс эпоксирирования пропилена пероксидом водорода на силикалите титана / С.М. Данов, А.В. Сулимов, А.А. Овчаров // *Химическая промышленность сегодня.* 2008. № 12. С. 26–30.
13. **Бусыгин, В.М.** Основные тенденции в развитии производств алкиловых эфиров алкиленгликолей / В.М. Бусыгин, Д.Х. Сафин, Г.П. Ашихмин // *Химическая промышленность сегодня.* 2005. № 1. С. 21–28.
14. **Данов, С.М.** Катализаторы на основе силикалита титана для селективного жидкофазного окисления органических соединений пероксидом водорода: Ч. 1. Основные методы получения / С.М. Данов, А.В. Сулимов, А.Е. Федосов // *Катализ в промышленности.* 2007. № 6. С. 13–18.
15. **Данов, С.М.** Катализаторы на основе силикалита титана для селективного жидкофазного окисления органических соединений пероксидом водорода: Ч. 2. Физико-химические основы синтеза силикалита титана золь-гель методом / С.М. Данов [и др.] // *Катализ в промышленности.* 2008. № 5. С. 32–41.

*Дата поступления
в редакцию 02.08.2011*

S.M. Danov, A.V. Sulimov, T.A. Ryabova, A.A. Ovcharov

THE BASIC TENDENCIES OF DEVELOPMENT OF PRODUCTION PROPYLENE OXIDE

The review of industrial ways of reception propylene oxide is presented; their advantages and lacks are considered. Manufacture process propylene oxide by heterogeneous-catalytic oxidation of propylene with an aqueous solution of hydrogen peroxide in the environment of organic solvent at presence titanium-containing silicalite was investigated and the estimation of prospects of its industrial realization is given.

Key words: propylene oxide, epoxidation, hydrogen peroxide, heterogeneous catalysis.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 336.74

М.Ю. Малкина, Ю.С. Барабашина

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТАВКИ РЕФИНАНСИРОВАНИЯ, ДЕНЕЖНОЙ МАССЫ И ИНФЛЯЦИИ В РОССИЙСКОЙ ЭКОНОМИКЕ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
– Национальный исследовательский университет

Рассматриваются теоретические и практические аспекты взаимодействия денежной массы, ставки рефинансирования и темпа инфляции в российской экономике. На основе корреляционного анализа определены характер, степень явного и неявного влияния, лаги взаимодействия указанных переменных. Выявлен полный цикл инфляции в российской экономике продолжительностью 2,5 года. Обнаружена связь ставки рефинансирования с другими показателями монетарной сферы: коэффициентом монетизации экономики и денежным мультипликатором. Сделан вывод о необходимости упреждающих мер в денежно-кредитном регулировании.

Ключевые слова: ставка рефинансирования, денежная масса, темп инфляции, коэффициент корреляции, лаг взаимодействия, коэффициент монетизации, денежный мультипликатор.

Взаимосвязи и взаимному влиянию одного из фундаментальных инструментов денежно-кредитной политики, ставки рефинансирования и важнейших показателей экономики, денежной массы и инфляции уделяли внимание ученые разных направлений экономической мысли.

Неоклассики придерживаются концепции нейтральности денег, «денежной вуали» в экономике, согласно которой изменение денежной массы сказывается только на масштабе цен в экономике, то есть приводит к пропорциональному увеличению всех номинальных переменных (цен, денежных процентных ставок), не влияя на показатели реального сектора экономики. Еще в XVIII веке Дэвид Юм в «Очерке о деньгах» впервые выдвинул предположение о пропорциональном изменении объема денежной массы и цен. В начале XX века И. Фишер сформулировал правило, согласно которому номинальная процентная ставка изменяется в той же степени, что и уровень инфляции в стране, так что реальная процентная ставка остается неизменной. Чрез полвека Милтон Фридман, основываясь на концепции адаптивных ожиданий, рекомендовал ФРС США полностью отказаться от дискретной денежно-кредитной политики, вызывающей краткосрочные циклические колебания в экономике, и придерживаться постоянного правила наращивания денежной массы. Американский ученый пришел к выводу, что оптимальный прирост денег в экономике должен равняться 3–4% в год, что соответствовало усредненной динамике роста реального ВВП в США. Изучая динамику денежного предложения и инфляции в американской экономике в 1955–1988 годах, экономисты Федеральной Резервной Системы США Дж. Холлман, Р. Портер и Д. Смол нашли подтверждение гипотезы о существовании тесной связи между этими экономическими составляющими. Некоторые современные исследования российских экономистов также привели к выводу, что основной причиной инфляции в России служит именно избыток денежной массы [1].

Между тем существует и альтернативная точка зрения. Согласно кейнсианской теории, деньги играют активную роль в экономике, изменение денежной массы может сказаться

как на изменении масштаба цен, так и на изменении параметров реального сектора экономики (реального ВВП, реальной процентной ставки, реального валютного курса). А неравномерность распределения денежных потоков вызывает к тому же структурные сдвиги в экономике (эффект, обнаруженный еще в XVIII в. Р. Катильоном). Одним из каналов трансмиссии денежного импульса в реальный сектор экономики выступает процентная ставка [4, с. 42-44; 7, с. 735-736]. В теоретической кейнсианской экономике процентная ставка устанавливается рыночным способом, реагируя на изменение денежной массы. Особенностью современных денежно-кредитных систем является то, что процентные ставки в экономике зависят от называемой официальной (ключевой) процентной ставки (ставки рефинансирования), являющейся объектом не рыночного, а административного регулирования. Монетарные власти изменяют размер ставки рефинансирования с целью управления цикличностью экономических процессов.

Сегодня в экономике разных стран центральный банк воздействует на инфляцию, как непосредственно регулируя объем денежной массы, так и изменяя размер учетной ставки.

Для сдерживания инфляции спроса центральный банк повышает ставку рефинансирования. При этом происходит, с одной стороны, сокращение масштабов рефинансирования, а значит, темпов роста денежной базы в экономике. С другой стороны, удорожание кредитов приводит к уменьшению скорости обращения денег и сокращению размера денежного мультипликатора. Таким образом, конечной целью увеличения ставки рефинансирования является сокращение широкой денежной массы. «Мы стараемся это делать очень осторожно, чтобы не нанести серьезного ущерба экономическому росту», – отмечает в интернет издании «Ведомости» глава Банк России Сергей Игнатьев [9]. В то же время размер ставки рефинансирования определяет альтернативную ценность ключевого актива в экономике – денег. Его удорожание приводит к росту экономических затрат и способствует «инфляции издержек» [5, с. 24].

Для стимулирования экономической активности в стране центральный банк снижает ставку рефинансирования, в то же время дешевизна денег может разогреть не только реальный сектор экономики, но и сегменты финансового рынка [там же]. Поэтому побочными эффектами такой политики являются потребительская инфляция и инфляция активов, а, начиная с некоторого момента, и девальвация национальной валюты.

В отличие от ставки рефинансирования, денежная масса в меньшей степени находится под контролем Центрального банка Российской Федерации, ее изменения могут являться следствиями экономических процессов, происходящих не только внутри страны, но и за её пределами.

Все это свидетельствует о том, что необходимо совместное изучение динамики денежной массы, ставки рефинансирования и темпа инфляции в стране, что нередко игнорируется современными исследователями. Требуется не только теоретическое обоснование, но и эмпирическое подтверждение связей между этими параметрами. Корреляционный анализ позволяет не только подтвердить характер связи, констатируемой теоретически, но также определить силу и лаг влияния показателей друг на друга.

Для исследования нами использовались следующие показатели за каждый квартал 2006–2010 гг.: 1) среднегодовое значение инфляции в квартале – средняя арифметическая за три месяца прироста индекса потребительских цен в % к аналогичному месяцу прошлого года; 2) средняя денежная масса в квартале – среднее хронологическое значение денежной массы (агрегата M2), рассчитываемое на основе значений показателя на начало и конец каждого месяца; 3) среднее значение ставки рефинансирования – среднее арифметическое взвешенное официальной ставки Банка России, в качестве весов использовалось количество дней в квартале, когда действовала та или иная ставка. Таким образом, средние показатели денежной массы и ставки рефинансирования в нашей методике – это текущие показатели, а средний темп инфляции – накопленный за год. Использование годовых значений роста цен обусловлено необходимостью исключения влияния сезонной составляющей на уровень инфляции. Прирост инфляции за каждый текущий квартал определялся на основе сдвигаемых с шагом в 1 квартал годовых показателей инфляции. Полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Динамика темпа инфляции, денежной массы (агрегата М2)
и ставки рефинансирования в российской экономике***

Период	Среднего- довое зна- чение по- казателя инфляции, %	Средняя денежная масса (М2), млрд руб.	Среднее значение ставки ре- финансиро- вания, %	Прирост инфля- ции в % к пред. кварталу	Прирост денежной массы в % к пред. кварталу	Прирост став- ки рефинанси- рования в % к пред. кварталу
1 квартал 2006 г.	10,83	4 467,26	12,00	-	-	-
2 квартал 2006 г.	9,40	4 920,75	11,97	-13,23	10,15	-0,27
3 квартал 2006 г.	9,47	5 524,21	11,50	0,71	12,26	-3,90
4 квартал 2006 г.	9,07	6 038,44	10,62	-4,23	9,31	-7,69
1 квартал 2007 г.	7,73	6 310,88	10,15	-14,71	4,51	-4,37
2 квартал 2007 г.	7,97	7 710,11	10,43	3,02	22,17	2,77
3 квартал 2007 г.	8,90	8 314,04	10,00	11,72	7,83	-4,15
4 квартал 2007 г.	11,40	8 992,01	10,00	28,09	8,15	0,00
1 квартал 2008 г.	12,87	9 830,68	10,16	12,87	9,33	1,58
2 квартал 2008 г.	14,83	10 109,38	10,48	15,28	2,84	3,20
3 квартал 2008 г.	14,90	10 762,44	10,97	0,45	6,46	4,61
4 квартал 2008 г.	13,77	10 169,95	11,89	-7,61	-5,51	8,42
1 квартал 2009 г.	13,77	9 203,61	13,00	0,00	-9,50	9,33
2 квартал 2009 г.	12,47	9 459,14	12,21	-9,44	2,78	-6,07
3 квартал 2009 г.	11,43	9 957,81	10,87	-8,29	5,27	-11,00
4 квартал 2009 г.	9,20	10 693,10	9,44	-19,53	7,38	-13,14
1 квартал 2010 г.	7,23	11 686,00	8,64	-21,38	9,29	-8,47
2 квартал 2010 г.	5,93	12 460,58	7,99	-17,97	6,63	-7,48
3 квартал 2010 г.	6,20	13 135,91	7,75	4,49	5,42	-3,06
4 квартал 2010 г.	8,13	13 917,60	7,75	31,18	5,95	0,00

* Источник данных для расчета: Банк России. Официальный сайт. URL: www.cbr.ru.

На основе корреляционного анализа удалось определить характер и тесноту связи исследуемых показателей. Выбор лага воздействия осуществлялся на основе определения максимального значения (по модулю) коэффициента корреляции при сдвиге временных рядов. Отсутствие высокой степени связи (80-90%) интерпретировалось как результат влияния других внешних факторов на исследуемый параметр, таких как: внешние по отношению модели факторы изменения денежной массы; отклонение административной процентной ставки от рыночной; немонетарные причины инфляции. Далее представлены полученные взаимосвязи.

1. *Связь между инфляцией и ставкой рефинансирования.* В ходе исследования обнаружена двоякая зависимость между приростом среднегодовой инфляции и приростом ставки рефинансирования.

Во-первых, ставка рефинансирования реагирует на инфляцию с лагом в 2 квартала (коэффициент корреляции, отражающий тесноту связи показателей, составляет 0,56). Иными словами, в течение полугода Банк России успевает принять управляющее воздействие в связи с изменением темпа инфляции в стране. При усилении инфляционного давления на экономику он переходит к проведению жесткой денежно-кредитной политики, поднимая ставку рефинансирования. При уменьшении темпов инфляции он снижает ставку рефинансирования. Последнее может осуществляться как с целью стимулирования экономического роста, так и в силу уменьшения инфляционной составляющей учетной ставки. Действительно, согласно кейнсианской теории, инструментом регулирования центрального банка должна являться не номинальная, а именно реальная процентная ставка.

Во-вторых, сама инфляция реагирует на изменение ставки рефинансирования с лагом в 5 кварталов. Коэффициент корреляции составляет $-0,83$, что свидетельствует об их достаточно заметной обратной связи. Иными словами, ужесточение денежно-кредитной политики дает свой эффект в виде сокращения темпов инфляции через 1 год и 1 квартал. В то же время смягчение денежно-кредитной политики сказывается на увеличении темпов инфляции приблизительно через тот же временной интервал.

2. *Связь между ставкой рефинансирования и денежной массой*. Инструментальное воздействие ставки рефинансирования на денежную массу происходит достаточно быстро, хотя и неполно. Как показывает проведенный корреляционный анализ, пик реагирования отмечается уже через 1–2 квартала. При этом коэффициент корреляции ($-0,48$) свидетельствует о неполном приспособлении изменения денежной массы к изменению учетной ставки. Это объясняется тем, что, кроме ставки рефинансирования, на денежную массу оказывают влияние также другие инструменты (в первую очередь, норма обязательных резервов) и каналы прямой эмиссии денег.

3. *Связь между инфляцией и денежной массой*. Исследование показало наличие прямой связи между приростом среднеквартальной денежной массы и приростом среднеквартальной инфляции с временным лагом в 4 квартала, то есть в 1 год. Коэффициент корреляции ($0,64$) свидетельствует о средней тесноте связи двух показателей. В то же время наличие длительных лагов взаимодействия подтверждает гипотезу о том, что открытой инфляции предшествует накопление инфляционного потенциала [3].

Сведение воедино полученных *явных* (то есть непосредственных, объясняемых логически и доказанных эмпирически) *зависимостей* позволило выявить следующую *цепочку взаимодействий*:

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{ccc} 0,56 & -0,48 & 0,64 \end{array} \\
 1) \text{ понижательная волна инфляции: } \pi_t \uparrow \rightarrow i_r \uparrow \rightarrow \Delta M \downarrow \rightarrow \pi_t \downarrow ; \\
 \begin{array}{ccc} 2 \text{ кв.} & 1-2 \text{ кв.} & 4 \text{ кв.} \end{array} \\
 \begin{array}{ccc} 0,56 & -0,48 & 0,64, \end{array} \\
 2) \text{ повышательная волна инфляции: } \pi_t \downarrow \rightarrow i_r \downarrow \rightarrow \Delta M \uparrow \rightarrow \pi_t \uparrow . \\
 \begin{array}{ccc} 2 \text{ кв.} & 1-2 \text{ кв.} & 4 \text{ кв.} \end{array}
 \end{array}$$

Таким образом, *полный цикл инфляции*, по нашим подсчетам, составляет 2–2,5 года. В этот цикл логически вплетены прямое и обратное изменение параметров денежной экономики: объема денежной массы и стоимости денег. Кроме того, каждая волна цикла включает три лага: 1) лаг осознания проблемы и принятия решения (полгода); 2) лаг инструментального воздействия ставки рефинансирования на денежную массу (1–2 квартала); 3) лаг целевого воздействия денежной массы на темп инфляции (год).

Обнаруженные явные прямые и обратные зависимости предполагают также наличие *неявных зависимостей*:

1) обратное влияние инфляции на изменение денежной массы с лагом воздействия 4 квартала (коэффициент корреляции $-0,68$). Посредником этого неявного влияния становится регулирующее воздействие Банка России на ставку рефинансирования;

2) обратное влияние ставки рефинансирования на темп инфляции в стране с лагом воздействия 5 месяцев (коэффициент корреляции $-0,83$), о чем уже отмечалось ранее и что объясняется опосредующим воздействием через изменение денежной массы;

3) прямое влияние денежной массы на ставку рефинансирования с лагом 4 квартала (коэффициент корреляции $0,61$). Эта неявная зависимость в наименьшей степени поддается логическому осмыслению. Однако при рассмотрении описанного ранее цикла становится очевидным, что здесь речь идет о цепи событий (изменение денежной массы \rightarrow изменение темпа инфляции), результатом чего является принятие регулятором решения, противодействующего тенденции (изменение ставки рефинансирования). Кроме того, в данном неявном взаимодействии обнаруживается сбой продолжительности цикла (вместо 6 месяцев наиболее

тесная связь наблюдается уже через 4 месяца, хотя и через полгода она остается по направленности той же, хотя и менее слабой). На наш взгляд, это может быть объяснено разным периодом реагирования объясняемой переменной в случае увеличения, либо уменьшения объясняющей переменной.

Приведенный далее рисунок позволяет более четко представить характер взаимосвязи динамики ставки рефинансирования и денежной массы (рис. 1). Приросты денежной массы и ставки рефинансирования определялись как отношение значения показателя в данном квартале к значению показателя в аналогичном квартале прошлого года. Таким образом, годовые показатели темпов прироста в каждом квартале определялись на основе сдвига календарного года на 1 квартал. Эта позволило исключить сезонную составляющую исследуемых показателей, особенно денежной массы. Благодаря этому методу, достигнуто сглаживание временных рядов.



Рис. 1. Годовые темпы прироста ставки рефинансирования и денежной массы в российской экономике в 2006–2010 гг.

На рис. 1 отчетливо видна обратная связь изменения денежной массы и изменения ставки рефинансирования. Наилучший коэффициент корреляции исследуемых показателей (-0,73) получен при лаге воздействия ставки рефинансирования на денежную массу второго квартала, что подтверждает полученный ранее результат, когда в качестве показателей использовались не годовые со сдвигом на один квартал, а среднеквартальные показатели. Заметим также: устранение сезонной составляющей позволило существенно улучшить тесноту связи.

Изменение денежной массы может происходить вследствие увеличения потребности экономики в деньгах: в силу экономического роста в стране, активизации инвестиционных процессов, развития финансовых рынков и пр. Поэтому в анализе денежных взаимодействий имеет смысл использовать показатель «коэффициент монетизации экономики», который характеризует степень насыщенности экономической системы ликвидными активами. В табл. 2 представлен его расчет за 2005–2010 гг. В 2010 году в России коэффициент монетизации составил 35%, что в 2–2,5 раза ниже уровня развитых стран, но соответствует уровню развивающихся стран. Это свидетельствует о низком доверии экономических агентов к нацио-

нальной денежной системе, а также о высоком уровне инфляции. Некоторые научные исследования показывают наличие устойчивой связи между коэффициентом монетизации и уровнем развития экономической системы [2; 8].

В табл. 2 также демонстрируется рост уровня монетизации на фоне снижения среднегодовой ставки рефинансирования. Коэффициент их корреляции отрицательный и составляет -0,89, это свидетельствует об очень тесной обратной связи между этими двумя показателями. Межстрановой анализ показывает, что чем выше уровень монетизации, то есть чем более развита экономика и рынки в данной стране, тем ниже ставка рефинансирования.

Таблица 2

**Расчет коэффициента монетизации и денежного мультипликатора
в российской экономике***

Год	Среднегодовая денежная масса (агрегат М2), млрд руб.	Темп прироста среднегодового М2, %	Ставка рефинансирования - среднегодовая, %	ВВП, млрд руб.	Коэффициент монетизации	Среднегодовая денежная база (МВ)	Денежный мультипликатор М2/МВ
2005	4 503,45		12,99	21610	0,21	2 186,23	2,06
2006	6 446,36	43,14	11,65	26917	0,24	2 929,52	2,20
2007	9 759,36	51,39	10,27	33248	0,29	4 222,46	2,31
2008	12 610,63	29,22	10,87	41265	0,31	4 790,27	2,63
2009	12 096,51	-4,08	11,39	38797	0,31	4 458,84	2,71
2010	15 753,87	30,23	8,32	44491	0,35	6 276,53	2,51

* Источник данных для расчета: Банк России. Официальный сайт. URL: www.cbr.ru.

Низкий коэффициент монетизации в России можно объяснить более низким значением денежного мультипликатора, то есть острой нехваткой кредитных денег. В табл. 2 представлен расчет денежного мультипликатора в российской экономике в 2005–2010 гг. Его значение в 2010 году (2,51) также соответствует уровню развивающихся стран и существенно ниже, чем в развитых странах. Например, в Великобритании денежный мультипликатор в 2008 году равнялся 4,3, в США – 4,9, в Швейцарии – 6,6, в зоне евро – 7, в Японии – 8. И в том же году самая высокая (среди указанных стран) учетная ставка эмиссионного банка наблюдалась в Великобритании, а самая низкая – в Японии [4, с. 40; 6, с. 5].

На основе данных табл. 2 нами выявлена обратная связь между динамикой денежного мультипликатора и среднегодовой ставкой рефинансирования в российской экономике. Теснота связи средняя (коэффициент корреляции равен -0,47).

Денежный мультипликатор играет роль передаточного звена между ставкой рефинансирования и денежной массой. Снижение ставки рефинансирования (i_r) способствует удешевлению кредитов (i_c) и росту спроса на них (D_c). В результате увеличивается скорость обращения денег и денежный мультипликатор (m_m), что приводит к росту денежной массы (M):

$$i_r \downarrow \rightarrow i_c \downarrow \rightarrow D_c \uparrow \rightarrow m_m \uparrow \rightarrow M \uparrow.$$

Таким образом, между показателями денежной сферы, ставкой рефинансирования и темпом инфляции в стране наблюдаются достаточно тесные взаимозависимости. Найденные

коэффициенты корреляции позволяют определить эффективность мер денежно-кредитного регулирования, а лаги воздействия указывают на необходимость принятия упреждающих, а не запаздывающих мер, если целью регулирования является сглаживание цикла.

В настоящее время Банк России определяет основным приоритетом денежно-кредитной политики снижение инфляции, в соответствии с этим растут ожидания возможного повышения ставки рефинансирования.

Безусловно, процессы, происходящие в экономиках страны и мира, переплетены и взаимосвязаны, но совершенно очевидно влияние регулирующей роли ставки рефинансирования на целый ряд составляющих, формирующих в целом экономику. Именно этот финансовый инструмент используют, когда необходимо осуществлять регулирование в оперативном порядке. Роль ставки рефинансирования сохранится и далее, однако, эффективность его использования может быть выше. Исследование именно этого вопроса является наиболее перспективным и востребованным в данный момент.

Библиографический список

1. **Дмитриева, О.** Инфляция спроса и инфляция издержек: причины формирования и формы распространения / О. Дмитриева, Д. Ушаков // Вопросы экономики. 2011. № 3. С. 40–52.
2. **Малкина, М.Ю.** Анализ динамики уровня монетизации экономики и особенностей денежно-кредитной политики в современной России // Финансы и кредит. 2007. № 34. С. 2–14.
3. **Малкина, М.Ю.** Анализ инфляционных процессов и внутренних дисбалансов российской экономики // Финансы и кредит. 2006. № 6. С. 2–13.
4. **Малкина, М.Ю.** Монетарная экономика: учеб. пособие / М.Ю. Малкина. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2010. – 78 с.
5. **Малкина, М.Ю.** Особенности несбалансированной инфляции в зарубежной и российской экономиках // Финансы и кредит. 2010. № 46. С. 16–24.
6. **Малкина, М.Ю.** Уровень монетизации, структура денежной массы и качество денег в экономике (сравнительный анализ положения в России и зарубежных странах) // Финансы и кредит. 2010. № 30. С. 2–10.
7. **Мишкин, Фредерик С.** Экономическая теория денег, банковского дела и финансовых рынков: [пер. с англ.] / Ф. Мишкин. – 7-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 880 с.
8. **Садков, В.** О целевых ориентирах уровней монетизации экономики и инфляции с позиций конечных результатов развития общества / В. Садков, И. Греков // Общество и экономика. 2008. № 4. С. 3–22.
9. ЦБ: инфляция во втором полугодии не превысит 1,5% // Ведомости, 2011, 10 июня. URL: http://www.vedomosti.ru/finance/news/1282296/cbr_uveren_v_celi_po_inflyacii.

*Дата поступления
в редакцию 08. 07.2011*

M.Yu. Malkina, Yu.S. Barabashina

INTERDEPENDENCE OF REFINANCING RATE, MONETARY SUPPLY AND INFLATION IN RUSSIAN ECONOMY

Authors investigate theoretical and practical aspects of interdependence between monetary supply, refinancing rate and the rate of inflation in Russian economy. On the basis of correlation analysis the character, degree of explicit and implicit influence, and the lags of interactions are determined. It is revealed the two-and half years complete cycle of inflation in the Russian economy. The correlations between refinancing rate and other indicators of the monetary sphere, monetization coefficient and monetary multiplier, are discovered. It is concluded necessity of predictive measures in the monetary-and-credit regulation.

Key words: refinancing rate, monetary supply, inflation rate, correlation coefficient, lag of interaction, monetization coefficient, monetary multiplier.

УДК 330.35

О.Г. Беляев, Д.А. Корнилов

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В настоящей работе на основе систематизации имеющихся показателей предлагается комплекс показателей оценки инновационного потенциала. Раскрываются сущность и основные стадии, этапы анализа, отражающие формирование, развитие и функционирование инновационного потенциала. Отмечена необходимость разработки комплексной методики оценки инновационного потенциала.

Ключевые слова: инновации; инновационный потенциал; анализ; оценка; индикаторы; значимость показателей.

В наши дни одним из факторов развития региона является формирование и эффективное использование регионального инновационного потенциала. Оценка инновационного потенциала региона имеет значение для обоснования региональной инновационной политики и разработки программ регионального развития с учетом эффективного использования региональных инновационных ресурсов.

Термин «потенциал» в русском словоупотреблении в расширенном толковании может звучать следующим образом: «источники, возможности, средства, запасы, которые могут быть приведены в действие, использованы для решения какой-либо задачи, достижения определенной цели»

В настоящее время вопросу формирования инновационного потенциала уделяется особое внимание. Анализируя существующие понятия инновационного потенциала региона, следует отметить, что часть авторов видят в инновационном потенциале существующие наличные ресурсы, а другие авторы в своих определениях говорят о возможных способах реагирования.

Во многих случаях, рассматривая инновационный потенциал, его отождествляют с одним из аспектов, таких как научный, интеллектуальный, технико-технологический потенциал. Также можно выделить ресурсный подход, при котором инновационный потенциал рассматривается как упорядоченная совокупность ресурсов, обеспечивающих осуществление инновационной деятельности субъектом рынка. Однако использование такого подхода при исследовании потенциала не является полным поскольку в различных условиях хозяйственные ресурсы могут быть использованы по разному, и в конечном итоге они не выступают гарантией одинаковых экономических результатов, а значит, и не служат сопоставимой характеристикой инновационного развития.

В целом существующие трактовки категории инновационного потенциала можно разделить на шесть разных подходов. *Первый подход* отождествляет инновационный потенциал с понятиями научного, научно-технического, интеллектуального и творческого потенциалов.

Второй подход – ресурсный – рассматривает инновационный потенциал как упорядоченную совокупность ресурсов, обеспечивающих осуществление инновационной деятельности субъекта рынка. Использование ресурсного подхода имеет свои положительные стороны, так как с одной стороны, он позволяет дать оценку текущей ситуации развития инновационных процессов (выделить сильные и слабые стороны). С другой стороны, при взаимоувязке основных ресурсных составляющих инновационного потенциала с их пограничными характеристиками и целевыми ориентирами могут быть выявлены возможности реализации инновационных процессов в перспективе.

Третий подход основан на разделении ресурсов инновационного потенциала на реа-

лизированные и нереализованные (скрытые) ресурсные возможности, которые могут быть приведены в действие для достижения конечных целей экономических субъектов.

В рамках *четвертого подхода* инновационный потенциал рассматривается как мера способности и готовности экономического субъекта осуществлять инновационную деятельность. Под способностью понимается наличие и сбалансированность структуры компонентов потенциала, а под готовностью – достаточность уровня развития этих ресурсов. К представителям данного подхода следует отнести О.С. Москвину, Е.П. Маскайкина, Г.И. Жиц.

Пятый подход следовало назвать результативным. Именно в нем инновационный потенциал раскрывается через анализ «выхода» инновационной деятельности и является отражением конечного результата реализации имеющихся возможностей (в виде нового продукта, полученного в ходе осуществления инновационного процесса). В то же время в нем не учитывается наличие и сбалансированность структуры компонентов инновационного потенциала и достаточность уровня развития потенциала для формирования инновационной активности экономики.

Шестой подход, являющийся комбинацией ресурсного и результативного подходов, представляет собой совокупность инновационных ресурсов, предоставляемых в виде продукта инновационной деятельности, производственной сферы.

Большинство авторов говорят о совокупности материальных, информационных, социальных и иных ресурсов, забывая о том, что указанные ресурсы принадлежат и используются конкретными предприятиями, функционирующими в регионе. Совокупность экономических возможностей предприятия (материальные, кадровые, интеллектуальные, финансовые, инфраструктурные) по эффективному вовлечению новых технологий в хозяйственный оборот составляют инновационный потенциал предприятия.

Определение сущности инновационного потенциала региона должно охватывать следующие основные характеристики:

1) инновационный потенциал выступает подсистемой социально-экономического потенциала региона, при этом все части общего потенциала тесно связаны между собой. Эффективная реализация общего потенциала зависит от состояния как каждой из его частей, так и их взаимодействия. В данном случае развитие всех подсистем должно быть сбалансированным, поскольку отставание одной из них выступает сдерживающим фактором как для системы в целом, так и для отдельных ее составляющих;

2) инновационный потенциал – это наличие и сбалансированность ресурсов, уровень развития которых достаточен для осуществления эффективной инновационной деятельности

3) инновационный потенциал включает организационный и институциональный механизмы, обеспечивающие инновационную деятельность

4) инновационный потенциал содержит неиспользованные, предполагаемые (скрытые) возможности ресурсов, которые могут быть приведены в действие для реализации инновационной стратегии

5) инновационный потенциал – это определенная характеристика способности экономической системы к изменению, улучшению, прогрессу на основе трансформации имеющихся ресурсов в новое качественное состояние.

Указав данные факты, следует предложить следующее определение инновационного потенциала региона: **совокупность экономических возможностей предприятий региона к инновационному развитию, правовых норм регулирования инновационной деятельности в регионе, возможностей регионального бюджета к осуществлению инновационной деятельности, а также состояние научно-технического потенциала региона, и результатов их использования.**

Данное определение учитывает ресурсные возможности как региона в целом, так и отдельных предприятий, действующих в регионе, в то же время оно охватывает и результативную (целевую) составляющую инновационной деятельности.

Инновационный потенциал это триединая структура, включающая в себя субъекты генерирующие инновации, инновационных посредников и потребителей инноваций.

Таблица 1

Методики оценки инновационного потенциала региона

Автор	Описание	Достоинства	Недостатки
О.С. Москвина	Предлагаемые показатели разделены на пять групп: первые четыре характеризуют условия для формирования инновационности региона, пятая группа характеризует результативную составляющую	Наглядность полученных результатов; Простота расчета показателей; Возможность выявления сильных и слабых сторон ресурсной компоненты ИП	Отсутствие интегральной оценки ИП;
М.В. Егорова	Определение по заданной бальной шкале инновационного потенциала, инновационной восприимчивости и инновационной активности, как характеристик инновационной позиции региона.	Определение не только текущего состояния дел в инновационной сфере, но и характера использования потенциальных инновационных возможностей и тенденций развития; Использование экспертного метода для определения весовых значений	Отсутствие показателей характеризующих финансово-экономическую, технологическую и административную составляющие ИП; Невозможность выявления особенностей развития ИП региона
Т.Н. Данилова	Выделение поэлементного состава составляющих инновационного потенциала отраслей региона	Возможность определения собственного и привлеченного ИП региона; Выявление отраслей необеспеченных/излишне обеспеченных собственным ИП; Определение профилирующих направлений	Отсутствие интегральной оценки ИП
В.К. Заусаев	Предлагаемые показатели, разделены на пять групп: макроэкономические, инфраструктурные, правовые, кадровые, экономические. На основе экспертного метода определяется значимость каждого из показателей групп	Возможность сравнительного анализа инновационного развития регионов	Не используются показатели, характеризующие технико-технологические возможности; В одной группе показателей, присутствуют показатели, характеризующие как ресурсную составляющую, так и результативную компоненту ИП; Единые коэффициенты значимости показателей для разных регионов.
Э.П. Амосенко, В.А. Бажанов	Выделение групп показателей (факторов) на основе метода главных компонент	Возможность сравнительного анализа инновационного потенциала регионов. Ранжирование на основе полученных факторов	Отсутствие интегральной оценки инновационного потенциала региона; В методике предполагается, что рассматриваемые факторы одинаково значимы в разных регионах; Преобладание научно-исследовательской компоненты в изучении инновационного потенциала
Е.П. Маскайкин	Оценка инновационного потенциала региона, осуществляется на основе выделения центральных субъектов региональной инновационной системы и субъектов, обеспечивающих деятельность первых	наглядность изображения на матрице потенциалов; Значительное число используемых показателей	Определение рейтинговых значений на основе стандартизированных показателей без учета значимости каждого

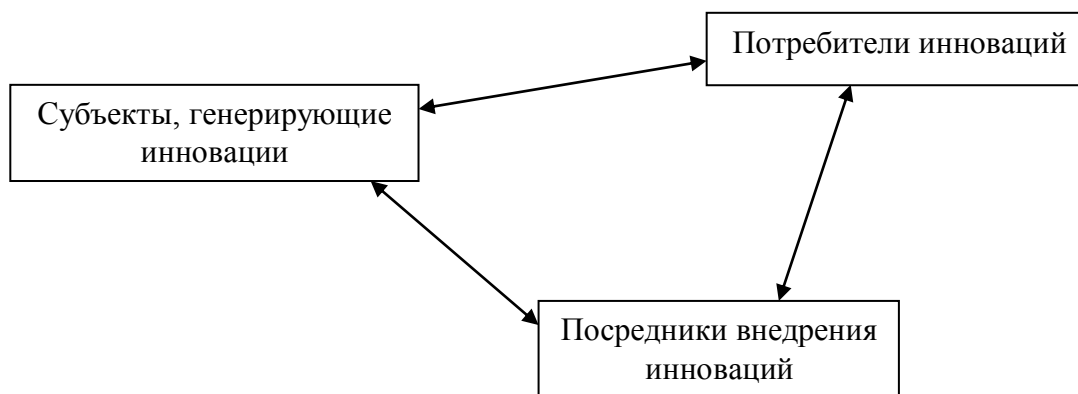


Рис. 1. Субъектная структура инновационного потенциала

Рассмотрение инновационного потенциала региона в качестве составной части социально-экономического потенциала экономики мезоуровня, его целевой подсистемы, выполняющие специфические функции, предопределяет необходимость его исследования как объекта регионального управления. Существует ряд методологических подходов к оценке инновационного потенциала региона. Подходы к оценке инновационного потенциала региона варьируются в зависимости от того, как понимается собственно инновационный потенциал, какие параметры его структуры выделяются в качестве основных.

За последние два десятилетия в отечественной науке появилось значительное количество методик исследования инновационного потенциала региона (страны в целом). Согласно данным мировой теории и практики, исследование инновационного потенциала региона осуществляется с использованием трех методов – скалярного, векторного и экспертного, а также их комбинации. Выбор того или иного метода при исследовании зависит от множества факторов: поставленных целей и задач исследования, наличия и доступности исходной информации, формы представления результатов и др.

В основе векторного метода инновационный потенциал представляется в виде набора чисел, отражающих отдельные стороны и проявления потенциала. При скалярном подходе производится «свертка» частных показателей в интегральный (агрегированный) показатель, принимаемый за численную оценку потенциала

Векторный метод обычно применяется в задачах управления, нацеленных на всестороннюю, углубленную оценку составляющих потенциала, изыскание резервов развития и формирования потенциала, разработку мероприятий по использованию этих резервов. Скалярный метод незаменим при сравнительном анализе потенциалов различных систем, а также при анализе и прогнозировании тенденций и траекторий развития потенциала.

Согласно анализу существующих методик оценки инновационного потенциала, выявлены основные недостатки существующих методик. Так, ряд авторов, исходя из определения инновационного потенциала как способности, возможно и готовности экономической системы, при подсчете инновационного потенциала указывает на результат инновационной деятельности как составную его часть. Данное положение противоречит применяемым ими определениям инновационного потенциала.

Ранее отмечалось, что «потенциал» это способности, возможности, которые могут быть приведены в действие. Учет результативной составляющей предполагает.

Применение экспертного метода при расчете индикаторов инновационной деятельности несет в себе множество «подводных камней». Для репрезентативности полученных значений число экспертов должно быть значительным и представлять всех субъектов инновационной деятельности: представители науки, руководства и персонала компаний, внедряющих инновации, законодательных и исполнительных органов власти, представители образовательных учреждений и центров трансфера технологий и тд. В рамках оценки инновационно-

го потенциала конкретного региона применение экспертного метода возможно, но в этом случае невозможно говорить об эффективности использования инновационного потенциала в сравнении с другими регионами. Использование же экспертного метода при сравнительном анализе сопряжено с существенными трудо- и время-затратами или вовсе невозможностью создания репрезентативной группы экспертов.

Мнения экспертов к оценке инновационной деятельности на региональном уровне могут существенно различаться в разных субъектах РФ. Таким образом, подходы и показатели, используемые в проанализированных методиках, не обеспечивают сопоставимость и соизмеримость, тем самым не позволяют исследователям произвести оценку и сравнительный анализ динамики и эффективности инновационного развития региона.

Проведенный анализ различных подходов к оценке уровней инновационного развития стран и регионов позволил обосновать предлагаемую в данном исследовании методику оценки инновационного потенциала региона и его составляющих. Предлагаемая в исследовании система показателей позволяет не только проанализировать инновационную деятельность и определить величину инновационного потенциала регионов, но и выявить возможности и резервы роста региональной экономики, определить направления государственной политики в области стимулирования инновационного развития регионов. Для комплексной обобщающей характеристики инновационного потенциала предлагается использовать интегральный показатель, характеризующий величину инновационного потенциала региона.

С учетом того, что инновационный потенциал представляет собой совокупности экономических возможностей предприятий региона к осуществлению инновационной деятельности, правовых норм регулирования и способности регионального бюджета к осуществлению инновационных проектов, введем следующее формульное изображение данного определения:

$$ИП_{рег} = \beta_{рес} * \sum_{i=1}^h Ресурсы_i + \beta_{инф} * \sum_{j=1}^p Инфраструктура_j,$$

где $\beta_{рес}$ - значимость ресурсной составляющей потенциала;

$\beta_{инф}$ - значимость инфраструктурной (внутренней) составляющей;

$$\beta_{рес} + \beta_{инф} = 1$$

Применение данного выражения основано на положении, что управленческие качества руководства субъектов инновационной деятельности во всех регионах одинаковы. Следовательно, результат инновационной деятельности является фактическим уровнем применения текущего инновационного потенциала региона. Данное утверждение можно представить следующим образом:

$$Результат = \alpha * ИП_{рег} = \alpha * (\beta_{рес} * \sum_{i=1}^h Ресурсы_i + \beta_{инф} * \sum_{j=1}^p Инфраструктура_j),$$

где α - % использования текущего инновационного потенциала

Предположив, что значимость составляющих инновационного потенциала постоянна во времени (на срок до 10 лет) можно составить следующие систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Результат}_{t_1} = \alpha_{t_1} * (\beta_{рес} * \sum_{i=1}^h Ресурсы_i^{t_1} + \beta_{инф} * \sum_{j=1}^p Инфраструктура_j^{t_1}), \\ \text{Результат}_{t_2} = \alpha_{t_2} * (\beta_{рес} * \sum_{i=1}^h Ресурсы_i^{t_2} + \beta_{инф} * \sum_{j=1}^p Инфраструктура_j^{t_2}), \\ \text{Результат}_{t_3} = \alpha_{t_3} * (\beta_{рес} * \sum_{i=1}^h Ресурсы_i^{t_3} + \beta_{инф} * \sum_{j=1}^p Инфраструктура_j^{t_3}) \\ \beta_{рес} + \beta_{инф} = 1. \end{array} \right.$$

Преобразовав данную систему уравнений получим значения $\beta_{рес}$, $\beta_{инф}$ и α . Тем са-

мым определим значимость составляющих инновационного потенциала и процент его использования.

В целом алгоритм подсчета инновационного потенциала можно представить следующими этапами.

Первый этап реализации методики включает в себя формирование базы исходных данных в соответствии с предлагаемой структурой показателей. Предложенная система показателей носит комплексный характер, что обеспечивает объективность полученной интегральной характеристики инновационного потенциала региона.

Систематизированные первичные данные, необходимые для расчета, используются для определения частных индикаторов после осуществления процедуры нормирования.

Все используемые абсолютные показатели должны быть представлены в удельном выражении. При расчете показателей используются следующие весовые характеристики: количество организаций, численность населения, численность экономически-активного населения, валовой региональный продукт. Применение показателей в форме удельных величин позволяет производить корректные сравнения, на результат которых не влияют характеристики размера и населенности отдельных территорий.

Все используемые величины необходимо привести к соизмеримому виду. Цель этой процедуры состоит в создании единого масштаба для всех измерителей, поскольку нарушение этого принципа необоснованно увеличит влияние показателей, значения которых выражаются числами большего порядка, чем другие применяемые показатели.

Нормирование показателей осуществляется по методике линейного масштабирования. Все базовые показатели составляющих инновационного потенциала региона делятся на две группы. К первой группе относятся показатели, связанные с обратной зависимостью с интегральным показателем, в расчете которого они участвуют:

$$I = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \text{ (максимизация показателей),}$$

$$I = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \text{ (минимизация показателей).}$$

Процедура линейного преобразования приводит данные к единому масштабу. Все расчетные величины находятся в интервале $[0;1]$, где 0 соответствует минимальному (максимальному) значению признака, а 1 – максимальному (минимальному). Такие данные легко интерпретируются.

В ходе отбора показателей из предложенного перечня необходимо осуществить их проверку на мультиколлинеарность.

Второй этап предусматривает определение значения инновационного потенциала регионов в соответствии с предложенной структурой частных индикаторов по отдельным блокам первичной информации. Процедура оценки инновационного развития регионов предполагает последовательное выполнение определенных шагов, позволяющих в количественной форме обобщить все показатели, характеризующие ресурсы, масштабы и результаты использования инновационного потенциала регионов.

Полученные нормированные значения отобранных показателей сводятся в составляющие инновационного потенциала. Определение составляющих инновационного потенциала производится по следующей формуле:

$$k_j = \frac{\sum_{q=1}^p I_q^j \times \alpha_q^j}{p},$$

где I_q^j - нормированное значение показателя j -составляющей;

α_q^j - значимость (весомость) влияния показателя на j -составляющую.

Расчет сводного индекса инновационного потенциала региона и многомерная класси-

фикация регионов по системе показателей позволяют осуществить ранжирование регионов по уровню инновационного развития, а также сформировать группы регионов, основные характеристики которых близки по значениям. Расчет интегрального (сводного) индекса инновационного потенциала осуществляется по формуле:

$$\text{ИП}_{\text{рег}} = \sum_{j=1}^m k_j + \varepsilon.$$

Третий этап заключается в проведении ранжирования регионов в соответствии со значениями интегрального индекса инновационного потенциала, а также в анализе влияния внешних и внутренних факторов инновационного потенциала региона на возможность развития различных типов инноваций.

На основе расчетов интегрального показателя инновационного потенциала и индексов его составляющих, выполняется предварительный анализ распределения регионов по выбранной системе показателей. Для визуального анализа полученного распределения строятся диаграммы и гистограммы. На основе ранжированной совокупности регионов осуществляется их группировка.

Четвертый этап методики включает в себя построение регрессионных моделей, выявляющих влияние факторов социально-экономической среды региона на формирование инновационного индекса.

Методика факторного анализа инновационного развития регионов предусматривает выявление факторов, оказавших существенное влияние на формирование инновационного потенциала. Реализация методики анализа предполагает последовательное выполнение следующих шагов: определение структуры показателей социально-экономической среды, расчет показателей и их нормирование, проверка переменных на мультиколлинеарность, построение регрессионных моделей для всей совокупности регионов, построение модели множественной регрессии.

Влияние факторов внешней (социально-экономической) среды может быть как позитивным, так и негативным. Соответственно необходимо осуществить разбиение совокупности факторов на две группы: оказывающих положительное и отрицательное влияние на результирующий признак.

Признаки, оказывающие отрицательное влияние, заменяются обратными величинами в целях использования всех показателей группы для создания интегрированного индикатора.

Подготовленные таким образом исходные данные могут быть использованы для построения регрессионных моделей. Затем необходимо построить корреляционные матрицы влияния факторных показателей на результирующий признак.

В процессе моделирования выявляются показатели, влияние которых на результирующий признак наиболее значимо. Необходимо осуществить выбор показателей, включаемых в модель, по критерию наибольшего влияния на результирующий признак на основе корреляционных матриц.

Построение моделей парных регрессий для всей совокупности регионов состоит из отдельных этапов, соответствующих функциональной структуре факторных показателей. На первом этапе моделирования осуществляется расчет параметров уравнений регрессии, отражающих влияние на инновационный потенциал внешними факторами социально-экономической среды региона.

Следующим этапом моделирования является расчет дисперсии (среднего квадратического отклонения) и коэффициентов детерминации по каждому факторному признаку. На основании коэффициентов детерминации принимается решение о включении частных показателей в модель множественной регрессии и строятся уравнения парной регрессии для каждого региона.

Построенное по методике пошаговой регрессии уравнение позволяет определять прогнозные значения инновационного индекса в зависимости от изменения значений факторных показателей, включенных в модель.

Согласно предложенному алгоритму, были получены следующие данные – указанные в табл. 2. Полученные данные позволяют судить об уровне инновационного развития регионов в рамках Приволжского федерального округа. Сравнительный анализ не дает возможности интерпретации эффективности реализации региональных инновационных программ по сравнению с иностранными государствами, что в текущий момент является наиболее актуальным.

Таблица 2

Совокупный инновационный потенциал (сравнительный анализ) регионов ПФО

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Республика Башкортостан	0,47	0,42	0,40	0,37	0,35	0,33	0,33	0,35	0,38
Республика Марий Эл	0,35	0,30	0,30	0,31	0,25	0,18	0,26	0,27	0,30
Республика Мордовия	0,42	0,37	0,40	0,41	0,41	0,43	0,46	0,46	0,39
Республика Татарстан	0,57	0,51	0,51	0,53	0,56	0,51	0,51	0,44	0,43
Удмуртская Республика	0,41	0,38	0,32	0,34	0,30	0,30	0,30	0,32	0,29
Чувашская республика	0,33	0,25	0,32	0,32	0,33	0,31	0,33	0,35	0,31
Пермский край	0,38	0,38	0,42	0,40	0,37	0,32	0,33	0,31	0,31
Кировская область	0,21	0,14	0,15	0,19	0,19	0,24	0,28	0,23	0,22
Нижегородская область	0,51	0,49	0,50	0,55	0,56	0,49	0,52	0,55	0,57
Оренбургская область	0,36	0,35	0,33	0,29	0,24	0,22	0,22	0,25	0,24
Пензенская область	0,20	0,23	0,20	0,24	0,22	0,22	0,25	0,29	0,26
Самарская область	0,38	0,37	0,39	0,34	0,37	0,35	0,39	0,36	0,38
Саратовская область	0,50	0,41	0,42	0,41	0,41	0,44	0,42	0,39	0,40
Ульяновская область	0,39	0,36	0,33	0,30	0,34	0,36	0,35	0,34	0,43

Библиографический список

1. **Амосенко, Э.П.** Интегральная оценка инновационного потенциала регионов России / Э.П. Амосенко, В.А. Бажанов // Регион: Экономика и Социология. 2006. №2.
2. **Данилова, Т.Н.** Подходы к оценке инновационного потенциала региона / Т.Н. Данилова, В.А. Грищенко // Региональная экономика: теория и практика. 2007. №5.
3. **Егорова, М.В.** Метод Инновационного позиционирования региона // Региональная экономика: теория и практика. 2007. №5.
4. **Мухамедьяров, А.М.** Методолого-методические основы оценки уровня инновационного потенциал / А.М. Мухамедьяров, Э.А. Диваева // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2009. №1.
5. **Москвина, О.С.** Инновационный потенциал как фактор устойчивого развития региона // (режим доступа) <http://journal.vscs.ac.ru>

Дата поступления
в редакцию 08.07.2011

O.G. Beljaev, D.A. Kornilov

**THE TECHNIQUE OF A COMPLEX ESTIMATION OF INNOVATIVE
POTENTIAL OF REGION**

In the present work on the basis of ordering of available indicators the complex of indicators of an estimation of innovative potential is offered. The essence and the basic stages, the analysis stages reflecting formation, development and functioning of innovative potential reveal. Necessity of working out of a complex technique of an estimation of innovative potential isn'ted.

Key word: Innovations; innovative potential; the analysis; an estimation; indicators; the importance of indicators.

УДК 330.35

Е.С. Митяков, Д.А. Корнилов

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ВЕСОВ ПРИ НАХОЖДЕНИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В настоящей работе рассмотрена проблема выбора весов при нахождении интегральных показателей экономической динамики социально-экономических систем. Предложен один из возможных алгоритмов составления обобщенных индексов, который основан на формировании системы показателей, их нормировке и агрегировании с выбором весовых коэффициентов.

Ключевые слова: обобщенный индекс; система показателей; стратегическая карта; нормирование; агрегирование информации; квалиметрия; весовые коэффициенты.

В задачах мониторинга социально-экономических систем во многих случаях используется множество показателей, имеющих различную размерность. Каждый из них отражает отдельные аспекты социально-экономических систем. Преимущество такого подхода заключается в возможности глубокого и всестороннего исследования различных составляющих системы. К недостаткам можно отнести сложность анализа, избыточность информации, проблематичность сравнительного анализа различных социально-экономических систем.

Другим подходом к оценке устойчивого развития социально-экономических систем является разработка агрегированных индикаторов (индексов), на основе которых можно судить как об отдельных компонентах устойчивости социально-экономических систем, их комбинации, так об устойчивости системы в целом. Истоки такого агрегирования лежат в широко известном системном подходе, где в течение многих лет с успехом применяется принцип анализа и синтеза, декомпозиции и объединения. К недостаткам агрегирования можно отнести невозможность точного оценивания динамики отдельных показателей. Значительные трудности при агрегировании информации в индексы возникают при определении весов исходных показателей. Тем не менее, использование обобщенных индексов позволяет анализировать и отслеживать обобщенные тенденции в отдельных сферах.

Использование обобщенных индексов широко используется при мониторинге различных параметров экономической динамики. Так, международной организацией International Living разработан Индекс качества жизни, включающий показатели состояния экономики и окружающей среды, стоимости жизни, здоровья, отдыха, культуры, свободы людей, состояния окружающей среды, инфраструктуры, безопасности и климатические условия [1].

В рамках Программы ООН разработан Индекс развития человеческого потенциала (ИРЧП) [2]. Он рассчитывается на основе следующих показателей: продолжительности жизни; уровня образования, измеряемого как совокупный индекс грамотности взрослого населения (вес в две трети) и совокупной доли учащихся, поступивших в учебные заведения первого, второго и третьего уровней (вес в одну треть), а также уровня жизни, измеряемого на базе реального ВВП на душу населения.

Индекс «Экологический след», предложенный фондом дикой природы измеряет величину давления на окружающую среду, производимого отдельными людьми и человечеством в целом [3].

Учеными Йельского и Колумбийского университетами США предложен Индекс экологической устойчивости (ESI) [4], который определяет способность нации защитить окружающую среду в обозримой перспективе.

В соответствии с методикой Всемирного экономического форума для каждой страны

разрабатываются сводный индекс конкурентоспособности GCI. Он включает двенадцать факторов конкурентоспособности страны, каждый из которых определяется с помощью различного количества индикаторов и имеет разный вес [5].

Международная лига стратегического управления и учета (МЛСУ) и Международная Академия исследований будущего (МАИБ) Института экономических стратегий предложили методику расчета Интегрального показателя мощи для определения текущего и прогнозного статуса ведущих стран мира, который осуществляется по девяти факторам: управление, территория, природные ресурсы, население, экономика, культура и религия, наука и образование, армия и внешняя политика [6].

В. Садков и И. Греков предложили ввести интегральный показатель результатов гармоничного развития общества (ИРГРО), который включает в себя три блока: социальный, экологический и экономический [7].

В [8] разработана методика оценки устойчивого развития социально-экономических систем, использующая методологию сбалансированной системы показателей (ССП), которая дает возможность использования как количественных, так и качественных показателей и применима к различным типам социально-экономических систем. Разработана стратегическая карта устойчивого развития России, которая содержит пять проекций: инновационного развития, социального развития, развития отраслей экономики, макроэкономической стабильности, а также реакции на глобальные угрозы.

В [9, 10] предложена сбалансированная система показателей экономической безопасности региона, предложена методика вычисления обобщенных индексов, отражающих ее отдельные аспекты.

Практически все приведенные ранее примеры используют один и тот же алгоритм для нахождения обобщенных индексов. Рассмотрим основные этапы этого алгоритма, уделив внимание вопросам нормировки показателей, способам агрегирования и, особенно, – вопросам выбора весов.

На первом этапе производится формирование системы показателей. все показатели группируются по блокам (проекции), отражающим различные аспекты функционирования системы. Существующие в настоящее время методологии системного анализа и моделирования определяют «правила игры» при формировании и группировке показателей. Например, согласно известной методологии SADT (Structured Analysis and Design Technique) [11] каждая группа должна содержать от 3 до 6 исходных показателей. В соответствии с методологией BSC (Balanced ScoreCard) [12] Нортон и Каплана общее количество показателей системы не должно превышать 30-35, а число показателей в одном блоке (проекции) должно быть в пределах 4-8 (соответственно, число проекций – 4-6). Они должны освещать свойства исследуемого объекта с различных сторон.

Основные проблемы, которые могут возникать в процессе отбора и анализа показателей:

1. Источники информации должны быть официальными, надежными и достоверными. Если данные отсутствуют в открытом доступе (сайт Росстата, сайт Банка России, сайт Минрегионразвития и др.), то показатель следует исключить из рассмотрения или сформировать систему запроса от заинтересованных органов управления.

2. Сбалансированность показателей. Индикаторы внутри каждой проекции должны быть сбалансированы, не должны повторять друг друга. Так, если в течение длительного промежутка времени наблюдается 100% корреляция между двумя показателями, то один из них можно отбросить. Сбалансированность должна также иметь место и для агрегированных индексов (проекции).

3. Единая периодичность поступления информации. Для анализа тенденций и долгосрочного прогнозирования может использоваться периодичность один год. Однако, для

оперативного анализа и прогнозирования угроз необходимо поступление информации с периодичностью один месяц. Для этого можно сформировать отдельную систему краткосрочных индикаторов по данным Росстата и Банка России.

На следующем этапе происходит нормировка показателей. Поскольку все индикаторы имеют различную размерность, для их совместной оценки целесообразно, наряду с анализом натуральных показателей, проводить их нормировку. При этом индикаторы заменяются безразмерными индексами, которые удобно анализировать, например, с помощью лепестковой диаграммы. В большинстве случаев применяется их отображение на отрезок $[0,1]$.

Основными требованиями к нормировке является ее относительная простота и адекватность (динамика нормированных индикаторов должна в точности повторять динамику исходных индикаторов), а также единообразие (нормирующая функция должна быть одинакова для всего множества индикаторов). Выбор нормирующей функции определяется конкретной задачей, требованиями к отображению информации, необходимостью детализации отдельных участков изменения аргумента, выбором зон ранжирования индикаторов.

Отметим, что после нормировки теряется размерность, но сохраняется тонкая структура изменения отдельных индикаторов. При этом появляется реальная возможность их сравнения и отображения в единой системе координат.

Основные методики нормировки можно классифицировать следующим образом [13].

1. Сравнение с эталонным (пороговым) значением:

$$y = \frac{x}{x_0}, \quad (1)$$

где y – нормируемое значение показателя; x – его фактическое значение; x_0 – эталонное значение, к которому должен стремиться показатель x .

Достоинством такой нормировки является простота в применении. Однако, эталонное значение показателя во многих случаях отсутствует. Кроме того, данная функция является безграничной, и в случае существенного превышения индикатором порогового значения анализ динамики его может быть затруднительным. Эта функция не всегда пригодна и для анализа нескольких индикаторов на одной диаграмме, обладая невысоким динамическим диапазоном.

2. Нормировка с использованием линейной функции вида:

$$y = y_2 - \frac{(y_2 - y_1)(x_2 - x)}{x_2 - x_1}, \quad (2)$$

где x – фактическое значение показателя; x_1 – минимально допустимое значение показателя; x_2 – максимально допустимое значение показателя; y – преобразованное значение показателя; y_1 – минимальное значение стандартного интервала, y_2 – максимальное значение стандартного интервала.

В частном случае при $y_1=0$, $y_2=1$ можно записать:

$$y = 1 - \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}. \quad (3)$$

Несмотря на простоту такой нормировки, в ряде случаев линейную функцию использовать нецелесообразно. Кроме того, недостатком такой нормировки является использование экспертных оценок для определения x_1 и x_2 . Ни в коем случае нельзя в качестве минимальных или максимальных значений выбирать показатели реального ряда или показатели других рядов. В первом случае экстремальное значение может быть превышено в последующих наблюдениях. Во втором случае будут возникать дополнительные связи между индикаторами в процессе нормировки, что не допустимо.

3. Нормировка с применением нелинейной функции $y = f(x, a)$. Здесь a – некоторый функциональный параметр, определяющий конкретный вид функции. Использование нелинейной нормирующей функции позволяет увеличить вес более низких значений исходного показателя. Чем ниже значение показателя, тем более ощутимым является его изменение. Например, если среднее число инновационно-активных предприятий на 10000 человек составляет 100, то рост в исследуемом регионе этого показателя от 20 до 40 является, несомненно, более значимым, чем его рост от 120 до 140. Если говорить о динамической функции, где сравнение производится по состоянию показателя того же объекта за предыдущий год, то и здесь уместно введение нелинейности, которое позволяет более четко отделять аутсайдеров от лидеров, штрафовать снижение инновационной активности.

В различных случаях рекомендуется использовать разные виды аналитической функции $f(x, a)$. Например, можно использовать функцию вида

$$y = 2^{-\frac{a}{x}}. \quad (4)$$

Данная функция выбиралась из следующих соображений. При нормировке индикаторов экономической системы можно полагать, что $y=0$ при $x=0$ – полное отсутствие соответствующего качества, и $y=1$ при $x \rightarrow \infty$ (экономические параметры, в отличие от физических, как правило, не имеют ограничений). Значение $x = a$ соответствует случаю $y = 0,5$ – середина отрезка $[0, 1]$. Это имеет различный экономический смысл в зависимости от выбора модели мониторинга.

В общем случае можно выделить «затратные» и «эффектные» показатели. Рост первых ведет к снижению, а рост вторых – к увеличению уровня устойчивого развития системы. Поэтому реально необходимо использовать преобразование вида

$$y = \begin{cases} 2^{-\frac{a}{x}} & \text{для "эффектного" показателя,} \\ 2^{\frac{x}{a}} & \text{для "затратного" показателя.} \end{cases} \quad (5)$$

В результате данного преобразования все показатели становятся «эффектными», что облегчает последующий анализ.

Рассмотрим различные модели мониторинга, в которых параметр a может принимать различные значения.

1. *Динамическая модель.* Основная цель – определение степени саморазвития экономической системы. В этом случае a представляет собой значение параметра x в предыдущий (или базовый) период. Значение $x = a$ ($y=0,5$) соответствует случаю отсутствия изменений; при $x > a$ ($y > 0,5$) наблюдается положительная динамика; при $x < a$ ($y < 0,5$) – отрицательная динамика.

2. *Сравнительная модель.* Основная цель – сравнение степени развития экономической системы с другими системами, позиционирование (определение рейтинга) исследуемого объекта. В этом случае параметр a выбирается как среднее значение параметра x по группе объектов (отрасль, регион, страна). Значение $x = a$ ($y=0,5$) соответствует случаю равенства исследуемого параметра среднему значению; при $x > a$ ($y > 0,5$) параметр имеет значение выше среднего; при $x < a$ ($y < 0,5$) – ниже среднего.

3. *Модель сравнения с пороговым значением.* Может использоваться при мониторинге индикаторов экономической безопасности страны. В этом случае параметр a выбирается как пороговое значение индикатора. Значение $x = a$ ($y=0,5$) соответствует случаю равенства исследуемого индикатора пороговому значению; при $x > a$ ($y > 0,5$) имеет значение выше порогового; при $x < a$ ($y < 0,5$) – ниже порогового.

На следующем этапе проводится агрегирование информации. При этом по каждой группе показателей вычисляется обобщенный индекс. При необходимости обобщенные ин-

дексы групп могут агрегироваться в единый обобщенный индекс, отражающий поведение системы в целом.

Рассмотрим один из распространенных и простых способов агрегирования, при котором по каждой из составляющих (проекции) социально-экономической системы вычисляются индексы обобщенные индексы как среднее взвешанное соответствующих нормированных показателей с учетом их значимости. Такой подход целесообразно применять, если между показателями отсутствует функциональная зависимость. В литературе различают среднеарифметическое, среднегармоническое, среднеквадратичное и среднегеометрическое взвешенное [14].

Среднеарифметическое взвешенное применяется в случае, когда все показатели в проекции однородны и дисперсия слагаемых мала. Пусть, y_{ij} – j -й показатель i -й проекции; s_j – вес j -го показателя, задаваемый экспертно; m – число показателей в составе данной проекции. Тогда математическая запись выражения для среднеарифметического взвешенного примет вид:

$$\Psi_i = \sum_j^m s_j y_{ij}; \sum_j^m s_j = 1. \quad (6)$$

Среднегармоническое взвешенное целесообразно применять, когда разброс между слагаемыми более значителен. Оно вычисляется по следующей формуле:

$$\Psi_i = \frac{\sum_j^m s_j}{\sum_j^m \frac{y_{ij}}{s_j}}; \sum_j^m s_j = 1. \quad (7)$$

Среднеквадратичное взвешенное применяется в методе наименьших квадратов и часто применяется для вычисления обобщенных индексов:

$$\Psi_i = \sqrt{\sum_j^m s_j y_{ij}^2}; \sum_j^m s_j = 1. \quad (8)$$

И, наконец, среднегеометрическое взвешенное – один из наиболее распространенных способов выражения для обобщенного индекса. Он применим даже тогда, когда имеется значительный разброс показателей:

$$\Psi_i = \sqrt[m]{\sum_j^m y_{ij}^{s_j}}; \sum_j^m s_j = 1. \quad (9)$$

Анализ этих индексов дает возможность рассмотреть динамику поведения экономической системы по каждой из проекций.

Наконец, может быть найден обобщенный индекс экономического развития страны как суммы индексов всех ее составляющих с учетом их значимости одной из указанных выше методик.

Теперь возникает проблема определения весов s_i для всех показателей экономической динамики. Самый простой способ – все показатели имеют одинаковый вес проекции, однако зачастую это может привести к неадекватным оценкам экономической ситуации. Здесь можно воспользоваться аппаратом квалиметрии [15].

Квалиметрия – научная дисциплина, в рамках которой изучаются методология комплексной, количественной оценки значимости и качества объектов любой природы. Квалиметрия как наука переживает период становления. Именно из-за этого отсутствует единое мнение по ряду вопросов. Являясь в значительной степени научной дисциплиной межотраслевого характера, квалиметрия во многих проблемах смыкается с конкретными дисциплина-

ми: стандартизацией, метрологией, экономикой, организацией производства, психологией, правом, менеджментом и в других дисциплинах. В ее аппарат включается целая группа математических и инструментальных методов. Объектом приложения методов квалиметрии может быть и предложенная проблема. С помощью квалиметрии разрабатывают теоретические основы, методы измерения и количественной оценки качества.

С одним из способов нахождения весов являются следующие методы [16]:

- метод ранжирования;
- метод попарного сопоставления;
- метод непосредственной оценки;
- метод адаптивной оценки;
- метод парной корреляции.

Все эти методы широко известны и применяются в различных приложениях современной науки. Остановимся на каждом из них подробнее.

Метод ранжирования. Для составления системы весов с целью построения рейтинга каждый эксперт ранжирует показатели по убыванию значимости: $y_1 > y_2 > \dots > y_i > \dots > y_n$, где y_i – показатели состояния [4]. В этом случае для определения весов показателей можно воспользоваться шкалой Фишберна:

$$s_i = \frac{2(n-i+1)}{n(n+1)}, \quad (10)$$

где s_i – коэффициент значимости i -го показателя; i – номер текущего показателя; n – количество показателей.

Итоговый весовой коэффициент показателя рассчитывается исходя из весов, определенных экспертами, по методу медианы Кемени. Медианой Кемени является такая ранжировка, суммарное расстояние от которой до всех заданных экспертных ранжировок минимально:

$$\sum_{j=1}^m \{d_j(A_j, X)\} \rightarrow \min, \quad (11)$$

где A_j – ранжировка j -го эксперта; X – медиана Кемени; $d_j(A_j, X)$ – расстояние между ранжировкой j -го эксперта A_j и медианой Кемени X , m – количество экспертов, j – номер текущего эксперта.

При этом накладываются следующие ограничения:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n a_{ij} = 1, & a_{ij} \geq 0, \\ \sum_{i=1}^n x_i = 1, & x_i \geq 0, \end{cases} \quad (12)$$

где a_{ij} – вес i -го показателя, определенный j -м экспертом; x_i – вес i -го показателя в медиане Кемени; n – количество показателей; i – номер текущего показателя; j – номер текущего эксперта.

При использовании данного метода необходимо определить метрику в пространстве ранжировок. В качестве метрики принято расстояние Евклида:

$$R_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n \{(x_i - a_{ij})^2\}}, \quad (13)$$

где R_j – расстояние Евклида от медианы Кемени до ранжировки j -го эксперта; x_i – вес i -го

показателя в медиане Кемени; a_{ij} – вес i -го показателя, определенный j -м экспертом; n – количество показателей; i – номер текущего показателя; j – номер текущего эксперта.

При выведении итогового мнения экспертов необходимо оценивать согласованность мнений экспертов. Эту процедуру можно провести любым методом, например, при помощи коэффициента вариабельности или коэффициента конкордации Кендалла. Если мнения экспертов окажутся недостаточно согласованными, то необходимо повторить опрос экспертов.

Можно ли на основе значения агрегированной величины делать выводы о тенденциях изменения совокупности факторов, выясняется в каждой конкретной ситуации индивидуально.

Приведенная методика позволяет оценить уровень развития различных типов экономических систем с использованием как количественных, так и качественных показателей, имеющих различную размерность путем их нелинейной нормировки.

Метод попарного сопоставления. Предполагает заполнение экспертом матрицы, на осях абсцисс и ординат находятся оцениваемые показатели. На пересечениях проставляется номер того показателя, который по мнению эксперта является более весомым. Принято заполнять матрицу только выше главной диагонали. Таким образом, каждая пара показателей сравнивается только один раз. Обработка матрицы предполагает определение частоты появления того или иного показателя в строках и столбцах. Далее определяется суммарная частота e_{ij} появления каждого из показателей.

На основании суммарных частот каждого эксперта определяем среднюю частоту обладания i -го показателя по всем экспертам

$$e_i = \frac{\sum_{j=1}^N e_{ij}}{N}, \quad (14)$$

где N – количество экспертных оценок.

Общее число сравнений определяется по формуле:

$$M = \frac{n(n-1)}{2}, \quad (15)$$

где n – количество оцениваемых параметров.

Тогда вес i -го показателя определяется по формуле:

$$s_i = \frac{e_i}{M}. \quad (16)$$

При таком подходе возможны ситуации, когда $e_{ij} = 0$. В таком случае весовые коэффициенты назначаются.

Метод непосредственной оценки. Каждый эксперт присваивает показателю определенный балл по определенной шкале (например от одного до 10). Затем по каждому показателю баллы суммируются и определяется средний балл

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^N C_{ij}}{N}, \quad (17)$$

где N – количество опрашиваемых экспертов; C_{ij} – сумма баллов для каждого показателя. Полученное выражение используется для расчета весов

$$s_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (18)$$

Метод адаптивной оценки. С течением времени некоторые показатели могут оказаться менее значимыми или даже лишними в проекции. В этом случае их вес должен уменьшиться. Такая ситуация может возникнуть в следующих случаях:

1. В течение длительного времени показатель стабилен и его значение практически не меняется. В этом случае величина веса может быть пропорциональна темпу его изменения.

2. При анализе индикаторов экономической безопасности ряд показателей может достичь порогового значения. В таком случае целесообразно уменьшить значение его веса, увеличив при этом вес показателей, которые не достигли требуемого порога.

3. Показатель может утратить свой экономический смысл в силу различных экономических, политических и социальных причин.

Во всех случаях при использовании адаптивного метода необходимо помнить о том, что веса должны изменяться одинаковым образом для всех рассматриваемых в сравнении экономических систем, а их сумма должна равняться единице.

Метод парной корреляции. Корреляционный анализ данных производится с целью выявления основных тенденций и зависимостей между показателями экономики. Если $y_i(t)$ – значение i -го показателя в момент времени t , то коэффициент кросскорреляции как функция временного сдвига τ между значениями показателей (он может быть как положительным, так и отрицательным), может быть найден по формуле:

$$R_{ij}(\tau) = \frac{\langle (y_i(t) - \langle y_i \rangle)(y_j(t) - \langle y_j \rangle) \rangle}{\sqrt{\langle (y_i(t) - \langle y_i \rangle)^2 \rangle \langle (y_j(t) - \langle y_j \rangle)^2 \rangle}}, \quad (19)$$

где знак $\langle \rangle$ означает усреднение по времени.

Если коэффициент парной корреляции между показателями близок к единице, то это говорит о том, что между ними существует тесная связь. В этом случае один из показателей можно исключить из рассмотрения, либо существенно уменьшить его вес. Так же в этом случае возможен вариант, когда их необходимо объединить в один, сложив их веса.

На рис. 1–6 представлены все этапы предложенного алгоритма оценки экономической системы по набору показателей.

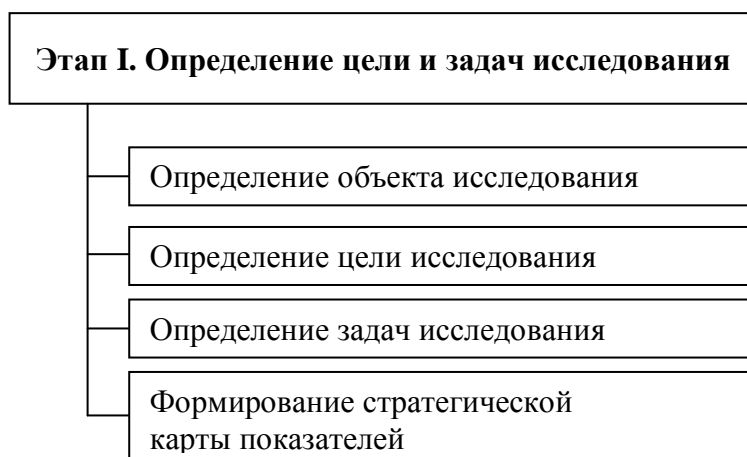


Рис. 1. Этап I. Определение цели и задач исследования

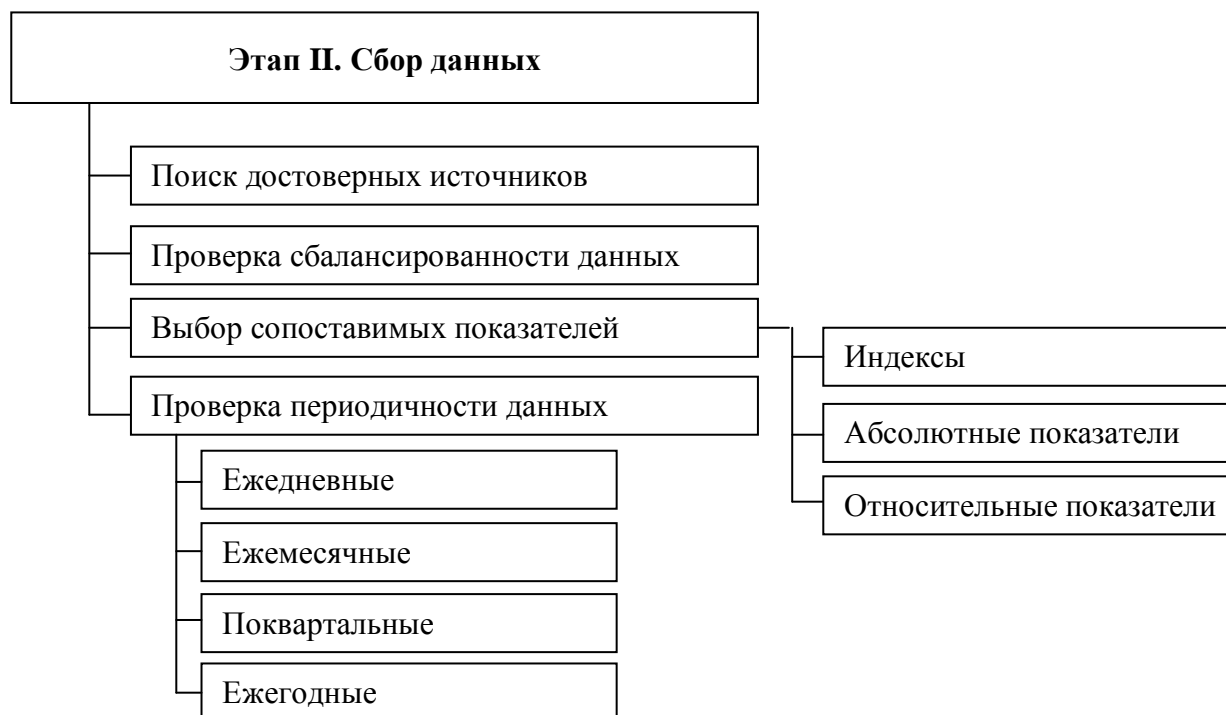


Рис. 2. Этап II. Сбор данных

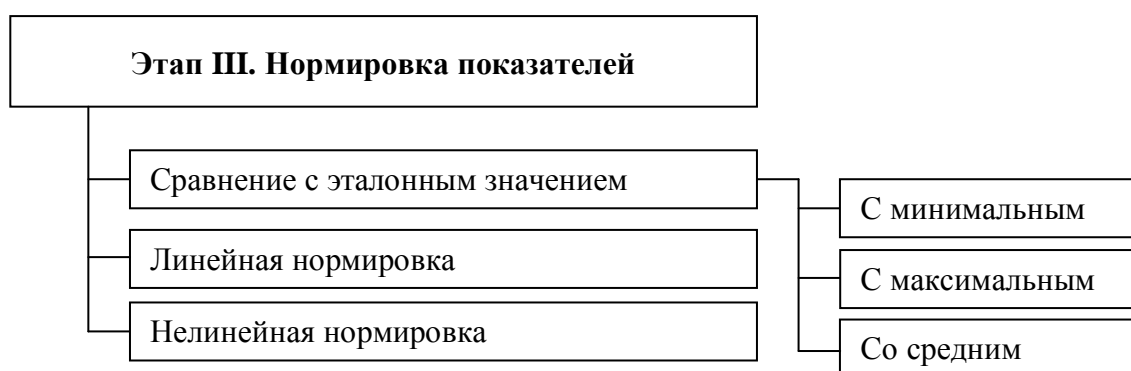


Рис. 3. Этап III. Нормировка показателей

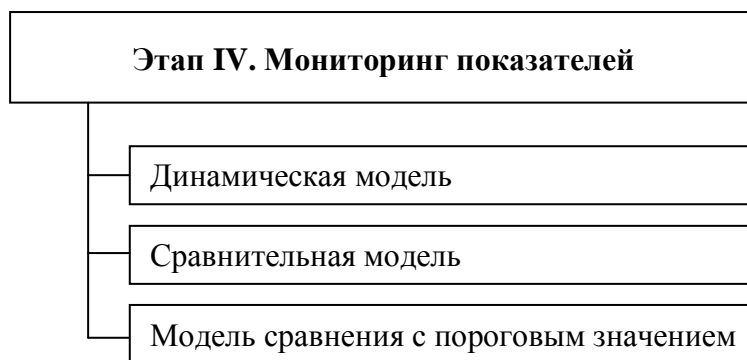


Рис. 4. Этап IV. Мониторинг показателей

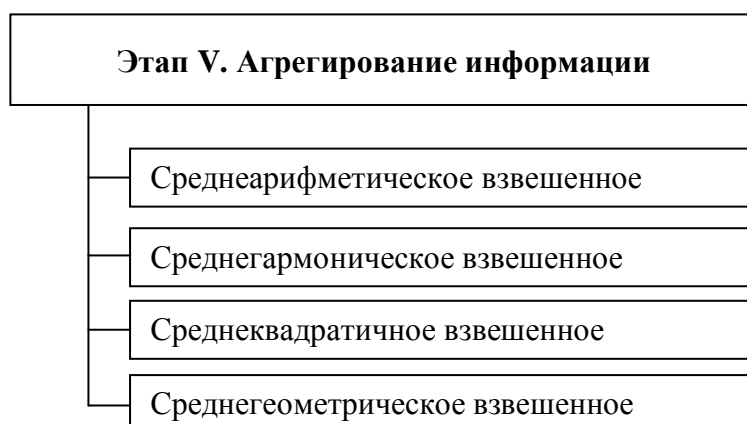


Рис. 5. Этап V. Мониторинг показателей

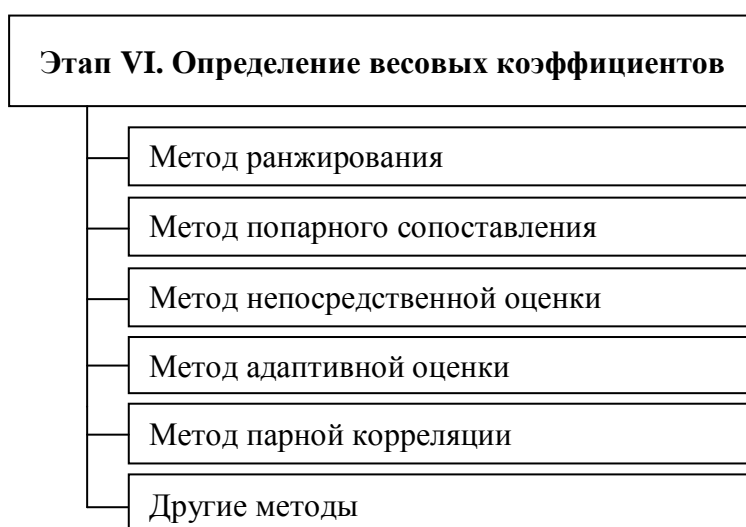


Рис. 6. Этап VI. Определение весовых коэффициентов

После всех этапов производится расчет интегрального показателя оценки социально-экономической системы.

В заключение следует отметить, что данный алгоритм имеет ряд достоинств. Он достаточно универсален и может применяться не только в социально-экономических системах. Во время расчета агрегированных индексов снижается степень субъективного влияния на результат. Данная методика позволяет оценить динамику развития различных типов социально-экономических систем с использованием как количественных, так и качественных показателей, имеющих различную размерность путем их нормировки.

Однако область применения данного алгоритма имеет некоторые ограничения. В методике частично отсутствует учет качественных факторов оценки (политические, законодательные, природные, этнические и др. факторы). Учет качественных факторов возможен при добавлении экспертных балльных оценок, что в свою очередь повысит субъективность интегральной оценки и потребует расширения методологии обработки информации. Например, применение аппарата нечеткой логики. Данный алгоритм не учитывает тонкие экономические эффекты. Поэтому говорить о том можно ли на основе агрегированной величины делать выводы о тенденциях изменения совокупности показателей однозначно нельзя. Это выясняется в каждой конкретной ситуации индивидуально. Так же при согласовании выбора показателей, методики расчета агрегированных индексов, выбора нормирующей функции возникает ряд субъективных оценок результата.

Библиографический список

1. [электронный ресурс] / <http://www.expert.ru>
2. Доклад о развитии человека, 2006 г. – М.: Издательство «Весь мир», 2006. – 440 с.
3. Тарасова, Н.П., Кручина, Е.Б. Индексы и индикаторы устойчивого развития // [электронный ресурс] / www.mnr.gov.ru
4. [электронный ресурс] / <http://www.yeale.edu/esi>
5. [электронный ресурс] / <http://www.waforum.org>
6. Глобальный рейтинг интегральной мощи 100 ведущих стран мира: доклад – 2-е издание дополнен. – М.: Международная академия исследования будущего, 2009. -148 с.
7. Садков, В.Г., Греков, И.Е. Высшие ценности цивилизации и измерение результатов общественного развития стран мирового сообщества // [электронный ресурс] / <http://hghltd.yandex.net>
8. **Митякова, О.И.** Проблемы устойчивого развития экономики России на основе инновационных преобразований / Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2009. – 245 с.
9. **Максимов, Ю.М.** Инновационные преобразования как императив экономической безопасности региона: проблемы инновационного развития / Ю.М. Максимов, С.Н. Митяков, О.И. Митякова // Инновации. 2011. №3. С. 38–43
10. **Сенчагов, В.К.** Инновационные преобразования как императив экономической безопасности региона: система индикаторов / В.К. Сенчагов [и др.] // Инновации. 2011. №5. С. 17–22.
11. [электронный ресурс] / <http://ru.wikipedia.org/wiki/SADT>
12. **Каплан, Р.С.** Сбалансированная система показателей. От стратегии к действию: [пер. с англ.] / Р.С. Каплан, Д.П. Нортон. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2004. – 320 с.
13. Методика построения интегральных индикаторов с помощью нормирующих функций [электронный ресурс] / http://sphaera.cemi.rssi.ru/In_Ind/Metio_ru.htm
14. [электронный ресурс] / <http://www.hi-edu.ru/e-books/xbook096/01/part-005.htm>
15. [электронный ресурс] / <http://www.inventech.ru/lib/glossary/qualimetr/>
16. [электронный ресурс] / http://window.edu.ru/window/library/pdf2txt?p_id=17957

*Дата поступления
в редакцию 09. 07.2011*

E.S Mitiakov, D.A. Kornilov

**REGARDING THE ISSUE OF PROPER WEIGHTING COEFFICIENTS
IN DETERMINATION OF INTEGRAL INDICATORS OF ECONOMIC DYNAMICS**

This study deals with selection of proper weighting coefficients in determination of integral indicators of economic dynamics of economic and social systems. The study suggests one possible composite indexing algorithm that is based on formation of the system of indicators, normalization and aggregation of the same with selection of weighting coefficients.

Key word : composite index; indicator system; strategic map; normalization; data aggregation; qualimetry; weighting coefficients.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 339.5 (043)

А.Д. Петросян

УПРАВЛЕНИЕ ВНЕШНЕТОРГОВЫМИ КОНФЛИКТАМИ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ИМИДЖА СТРАНЫ НА МИРОВОМ РЫНКЕ

Министерство промышленности и торговли Российской Федерации

Дано определение внешнеэкономического имиджа страны показана роль организационно-управленческих и социально-психологических факторов и управленческих технологий государственного регулирования внешней торговли, в частности, технологий управления внешнеэкономическими конфликтами как важного инструмента формирования позитивного имиджа страны на мировом рынке.

Ключевые слова: внешнеэкономический имидж страны, управленческие технологии, внешнеэкономические конфликты, управление конфликтами.

Одной из основных задач государственного регулирования экономикой страны является целенаправленное формирование и продвижение позитивного имиджа страны на мировых рынках. Эта проблема решается путем улучшения таких важнейших составляющих имиджа страны, как имидж власти, имидж национальной экономики и ее инвестиционная привлекательность, внешнеполитический и внешнеэкономический имидж и др. [5, 4, 15]. К общепризнанным методам формирования и продвижения имиджа страны относятся политические технологии, методы и технологии рекламы, public relations и коммуникационного менеджмента.

Однако в научной литературе в полной мере не поставлена задача и не проработаны методы управления внешнеэкономическими конфликтами, как одного из инструментов государственного регулирования внешней торговли и формирования позитивного имиджа страны на мировом рынке, как надежного делового партнера. Этому актуальному вопросу, затрагивающему социально-психологические проблемы разрешения внешнеэкономических конфликтов на макроуровне управления, посвящена настоящая статья.

Согласно определению Всемирной организации по туризму, имидж страны – это совокупность эмоциональных и рациональных представлений. Он определяется не только объективными характеристиками страны, её реальными достоинствами или недостатками, формальными показателями ее состояния и основных тенденций ее развития, но и спецификой субъективного восприятия аудиторией данной страны [2]. Как указывает А.П. Панкрухин, для выявления имиджа страны в сознании населения, то есть на уровне бытовой психологии, используются ряд устоявшихся характеристик, параметров: символов, особенностей менталитета нации, ее культуры и негативных аспектов жизнеобеспечения. Результаты опроса 2000 россиян, проведенного Центром исследований и статистики науки РАН показали: в числе наиболее значимых факторов чаще всего назывались высокий уровень благосостояния, высокий уровень развития науки и техники, военная мощь, соблюдение прав человека, высококультурная культура и богатые природные ресурсы. Вместе с тем Россия, по мнению 23%

опрошенных, достойна уважения в связи со своими природными ресурсами, 13% отметили военную мощь отечества, включая наличие ядерного оружия, 8% – большую территорию и 4% – высокоразвитую культуру. При этом почти половина (49%) не нашли вообще ни одного фактора, по которому Россию можно уважать [13].

И.Ю. Киселев выделяет *две группы* характеристик имиджа государства: *условно-статичные* (их можно отнести к объективным): природный ресурсный потенциал; национальное и культурное наследие российского общества; геополитические параметры; исторические события, повлиявшие на развитие российской государственности; базовая форма государственного устройства и структура управления; *условно-динамичные* (их можно отнести к субъективным): социально-психологические настроения в российском обществе; характер и принципы деятельности общественно-политических объединений России; морально-нравственные аспекты развития российского общества; устойчивость российской экономики, оцениваемая комплексом показателей динамики ВВП, уровня доходов на душу населения, объема привлекаемых инвестиций, финансовой обеспеченности бюджетов, гарантий прав и свобод, хозяйствующих на российском рынке субъектов, и др.; правовое пространство России и соответствие российских правовых норм международным требованиям; функции, полномочия и механизмы государственного регулирования различных областей и сфер деятельности, определяющих эффективность властной конструкции [8].

Исследования общественного мнения свидетельствуют, в частности, что имидж страны эффективно формируется только при соблюдении нескольких условий: борьбу с искажением образа страны следует вести конкретно и максимально аргументированно; усилия имиджмейкеров по формированию положительного образа страны важно рассматривать лишь как дополнение к исправлению реального положения дел; образ политика – особенно из первых эшелонов власти – должен «нравственно» соответствовать выстраиваемому образу страны [4]. Формирование позитивного имиджа страны в мире возможно с помощью реализации экономических, культурных, научных, образовательных, социальных и спортивных медийных проектов, а также проектов, приуроченным к празднованию особо важных событий.

Вместе с тем, в научной литературе, должным образом, не рассматривается такая важная составляющая имиджа страны, как *внешнеторговый имидж*, иными словами имидж страны как надежного внешнеторгового партнера на мировом рынке. Формирование позитивного внешнеторгового имиджа России является одной из функций государственного регулирования внешней торговли страны, которое предполагает проведение умеренной протекционистской политики и направлено на защиту отечественных производителей и продвижение их продукции на внешние рынки, а также ориентацию импортных поставок на развитие национальной экономики и повышение качества жизни населения страны. Чтобы повысить внешнеторговый имидж страны, государственное регулирование внешней торговли, по нашему мнению, должно основываться на принципах этической экономики и социальной справедливости, в соответствии с которыми торговля как акт купли-продажи товара ставит своей целью не только получение коммерческой прибыли, но и способствует укреплению доверия. Это позволит сохранить долговременные торговые отношения между партнерами и взаимовыгодность внешнеторговых отношений, так как, в соответствии с положениями маркетинга, реализация любого товара должна приносить максимальную прибыль не только в краткосрочной, но и долгосрочной перспективе.

Для повышения внешнеторгового имиджа страны методология государственного регулирования внешнеторговой деятельности на всех уровнях управления российской экономики, по нашему мнению, должна быть ориентирована на максимальное использование не востребованного потенциала *организационно-управленческих и социально-психологических факторов*, к которым мы относим степень применения и совершенства управленческих, в том числе маркетинговых технологий, вовлечение организационной культуры в процессы управления, соответствие имиджа и деловой репутации участников внешнеторговой деятельности, использование всего многообразия стилей руководства и потенциала личностных

качеств менеджеров, повышение качества и культуры их взаимодействия с внешнеторговыми партнерами, включая лояльность и доверие партнеров, а также соблюдение этических принципов во внешнеторговых отношениях.

Роль организационно-управленческих и социально-психологических факторов в системе государственного регулирования внешней торговли в условиях глобализации экономических отношений резко повышается. С одной стороны, система государственного регулирования внешней торговли должна сочетать научные принципы управления и неформализованные профессиональные знания, которые представляют собой одновременно опыт и искусство управления. С другой стороны, эта система находится в постоянном взаимодействии с аналогичными системами других стран и представляет собой важнейший организационно-управленческий фактор конкурентоспособности национальной экономики.

Использование организационно-управленческих и социально-психологических факторов в системе государственного регулирования внешней торговли России выражается в разработке и внедрении *управленческих технологий государственного регулирования внешней торговли*, то есть совокупности методов и процедур (операций) управления, направленных на осуществление управленческой деятельности путем планирования, организации, выполнения и контроля как общих, так и конкретных функций управления в сфере внешней торговли. Применение управленческих технологий в сфере государственного регулирования внешней торговли ставит своей целью типизацию и регламентацию отдельных процедур управленческой деятельности для повышения их эффективности и явится важным условием формирования позитивного внешнеторгового имиджа страны на мировом рынке, будет способствовать привлечению зарубежных деловых партнеров.

Одной из важнейших управленческих технологий регулирования внешней торговли являются технологии: а) экспортного маркетинга как планирования и организации изучения рынков на территории иностранных государств с целью эффективного продвижения на них отечественной продукции с учетом условий сбыта, деловых обычаев, национальных традиций, валюты и социально-культурной среды, а также формирования новых потребностей производства и населения за рубежом в отечественных – сырья, материалах и продукции [1]; б) импортного маркетинга как особой формы исследований рынка, а также создания инфраструктурных условий внутренних рынков для обеспечения высокоэффективных импортных закупок [14]. Применение этих технологий способствует позитивному внешнеторговому имиджу страны на мировых рынках и позволяет обеспечить долгосрочные внешнеторговые отношения с зарубежными партнерами.

Помимо указанных управленческих технологий формирование позитивного внешнеторгового имиджа страны нами предлагается с помощью *технологий регулирования внешне-торговыми конфликтами*. В научной литературе понятие внешнеторгового конфликта определяется на основе изучения несовпадения интересов внешнеторговых партнеров. Так, О.А. Дубровина сводит внешнеторговые противоречия, к несовпадению интересов стран и (или) их объединений в области внешней торговли. При этом определяются понятия внешних и внутренних противоречий мировой торговли. Под первыми понимается внутренняя противоречивость национальных интересов – с одной стороны, стремление к свободной торговле, открытию рынков, с другой стороны – протекционистская тенденция, свидетельствующая о наличии глубинных политико-экономических интересов, стремлении защищать отечественных производителей, сохранять рабочие места, поддерживать конкурентоспособность национальных товаров и отраслей. Внешние противоречия проявляются в торговых конфликтах, которые возникают как следствие существенного дисбаланса соотношения свободы торговли и протекционизма [6].

Часто внешнеторговые конфликты рассматриваются с точки зрения международного права. Д.Э. Столетова под конфликтом в международном частном праве определяет такое состояние в положении участников международного невластного правоотношения, при котором наблюдается противостояние объективно расходящихся интересов, целей и юридиче-

ски значимых действий сторон правоотношения. Международным коммерческим конфликтом она считает сложный и неоднородный по своей природе специфический тип взаимодействия, заключающийся в столкновении интересов участников международной коммерческой сделки, объединенных связями невластного (частного) характера, при распределении экономических (материальных и нематериальных) благ в международном коммерческом обороте [16].

Под внешнеторговым конфликтом мы понимаем разновидность экономического конфликта, в основе которого находится несовпадение внешнеторговых интересов, целей и позиций двух и более субъектов внешнеторговой деятельности различных стран. Субъекты внешнеторговой деятельности – это предприятия и внешнеторговые организации, а также органы государственной власти, занимающиеся регулированием внешнеторговой деятельности.

В научной литературе в основном рассматриваются психологические аспекты исследования и разрешения межличностных конфликтов в коллективах внешнеторговых организаций [10] либо правовые вопросы разрешения разногласий в международных коммерческих сделках [12, 3, 16].

Так, проведенный А.А. Малышевым опрос более 60 слушателей программы MBA Всероссийской академии внешней торговли о конструктивных и деструктивных функциях конфликта (среди опрошенных: 26 человек – генеральные директора внешнеторговых компаний и их заместители, 6 – финансовые директора, 7 – коммерческие директора, 22 – начальники отделов компаний) показал:

- конструктивные функции конфликта, среди которых: решение проблемы (противоречия), лежащей в основе конфликтной ситуации; снятие психологической напряженности участников конфликта и социальной группы; умножение опыта социального взаимодействия сотрудников и менеджеров в конфликтных ситуациях; поиск и нахождение нового, как правило, лучшего варианта развития межличностных и межгрупповых отношений; улучшение психологического климата в коллективе; мобилизация внимания, интереса и ресурсов внешнеторговой фирмы для решения конкретных проблем (как следствие, экономия рабочего времени и средств организации); развитие у участников конфликта способности к сотрудничеству в будущем; преодоление традиций конформизма, «синдрома» покорности и развитие индивидуальности сотрудников;

- деструктивные функции конфликта: временное снижение производительности труда не только у конфликтующих, но и у других членов социальной группы; снижение сплоченности группы; ухудшение психологического климата в коллективе; неэффективная (бесполезная) трата временных, социально-психологических и психофизиологических ресурсов; появление у конфликтующих затаенной обиды, чувства мести, что разрушающе действует на личность; отвлечение персонала внешнеторговой фирмы от реальных проблем и целей организации, смещение этих целей в сторону групповых эгоистических интересов; нарастание у отдельных сотрудников враждебности и агрессивности поведения, недоверия к руководству и коллегам; дестабилизация организации, снижение управляемости ею [10].

Д.Э. Столетова в зависимости от типа конфликта и стадии его развития предлагает объективно адекватное определение способов его разрешения. Она выделяет наиболее эффективные альтернативные способы урегулирования конфликтов, возникающих при заключении и исполнении международных коммерческих сделок: переговоры, посредничество, претензионный порядок урегулирования споров, экспертиза, иные примирительные и согласительные способы разрешения международных коммерческих конфликтов с использованием современных эффективных международных стандартов [16]. А.В. Манойло указывает на важную роль применения технологий несилового разрешения конфликтов, регулирования конфликтов, среди которых технологии политического и дипломатического регулирования, психологического и информационного воздействия [11].

В то же время управленческие технологии государственного регулирования внешнеторговых конфликтов слабо разработаны [7]. Государственное регулирование внешнеторговых конфликтов – это целенаправленные воздействия федеральных органов исполнительной

власти по устранению (минимизации) причин, породивших конфликт и урегулирование этих конфликтов. Наличие у субъекта внешнеторговой деятельности эффективных технологий управления внешнеторговыми конфликтами способствует своевременной диагностике, прогнозированию, предупреждению (профилактике), регулированию и разрешению конфликтов. Все это является важнейшим условием формирования у страны имиджа неконфликтного делового внешнеторгового партнера, с которым экономически выгодно, политически надежно и психологически комфортно налаживать внешнеторговые отношения.

Чтобы эффективно управлять внешнеторговым конфликтом, необходимо использование методов теории конфликтологии, экономической психологии, социальной психологии и психологии личности. В первую очередь, следует с большой точностью произвести *диагностику причин, симптомов и проявлений внешнеторгового конфликта*. Используя эту управленческую технологию, следует описать видимые проявления конфликта, определить уровень его развития и масштабы; выявить причины возникновения конфликта.

К причинам возникновения внешнеторгового конфликта мы относим:

- недостаточную согласованность и противоречивость институциональных норм, регулирующих внешнеторговые отношения субъектов внешнеторговой деятельности различных стран, частности различия, а то и противоречия во внешнеторговом законодательстве стран;
- различные, в том числе противоположные по направленности, существенные факторы кросскультурных коммуникаций, определяющие этноисторические и этнопсихологические особенности делового общения, присущие той или иной стране;
- наличие не соответствующей нормам международного торгового права конкурентной борьбы между субъектами внешнеторговой деятельности различных стран и стремление к захвату зарубежных рынков;
- незачинное и неправомерное поведение участников внешнеторгового конфликта, путем навязывания несправедливых условий внешнеторговых сделок, наличия неравенства, господства и подчинения между участниками внешнеторговых отношений, принуждение одного участника внешнеторговых отношений к определенному поведению других участников;
- межличностные конфликты между представителями (владельцы и руководители предприятий и внешнеторговых организаций, ответственные работники органов государственной власти, занимающиеся регулированием внешнеторговой деятельности) субъектов внешнеторговой деятельности. Межличностные конфликты между представителями субъектов внешнеторговой деятельности возникают не в силу проявления объективных обстоятельств, а в результате их неправильного субъективного восприятия и оценки. Это наличие противоречий между интересами, ценностями, целями, мотивами, ролями представителей субъектов внешнеторговой деятельности или их групп; присутствие противоборства между ними; появление и доминирование негативных эмоций и чувств как фоновых характеристик взаимодействия и общения между ними и, в конечном итоге, разрыв межличностных отношений.

Помимо выявления причин конфликта, возникшего в результате взаимодействия между странами, процедура регулирования внешнеторговых конфликтов включает в себя, выбор стратегии преодоления конфликта и реализация этой стратегии, в том числе путем достижения консенсуса. Основываясь на положениях теории конфликтологии нами рекомендуются следующие стратегии регулирования внешнеторговых конфликтов: стратегия предотвращения конфликта, посредством раннего распознавания и превентивного устранения реальных причин конфликта между странами; стратегия подавления конфликта применяемая по отношению к конфликтам в необратимо деструктивной фазе, путем целенаправленного и последовательного устранения предмета конфликта; стратегия отсрочки как временная мера, помогающая лишь ослабить конфликт с тем, чтобы позже, когда созреют условия, добиться его разрешения; стратегия отрицания или замалчивания имеющегося конфликта, которая на первых порах сможет даже ослабить развитие конфликта, при этом сохраняется угроза возобновления конфликта с еще большей силой, так как его глубинные причины не устранены; стратегия достижения компромисса между конфликтующими странами.

С помощью технологии *прогнозирования внешнеторгового конфликта* осуществляется предвидение конфликта с определенной вероятностью с указанием его основных участников и времени возникновения. Прогнозирование конфликтной ситуации играет важную роль для предотвращения возникновения и дальнейшего развития конфликта.

Применение технологии по *предупреждению (профилактике) внешнеторгового конфликта* направлено на недопущение его возникновения и негативного влияния на ситуацию на конкретном сегменте мирового рынка, а также на национальные экономики стран-участников конфликта, и, в частности, сферу внешней торговли этих стран. Предупреждение внешнеторговых конфликтов должно проводиться путем создания объективных условий, препятствующих возникновению предконфликтных ситуаций, таких как формирование и обеспечение благоприятных внешнеторговых отношений между странами; разработка правовых и иных процедур разрешения типичных предконфликтных ситуаций.

Технология *регулирования внешнеторгового конфликта* сводится к планированию и реализации ряда мероприятий, предпринимаемых одним из участников конфликта или обеими сторонами. Здесь следует уточнить права, обязанности, ответственность и обязательства участников конфликта на основе формальных и неформальных норм международной торговли и достижения одинакового понимания и применения на практике этих норм. Результатом регулирования внешнеторгового конфликта является его *разрешение*, которое может привести к *конфронтации* сторон конфликта, путем удовлетворения одним участником конфликта своих интересов и игнорирования интересов второй стороны; *уклонению*, посредством избежания конфликта; *приспособлению* путем удовлетворения одним участником конфликта интересов другого участника и пренебрежения собственными интересами; *компромиссу*, то есть достижению двухсторонних уступок; *сотрудничеству*, ориентированному на полное удовлетворение интересов задействованных во внешнеторговом конфликте стран и предприятий.

Для эффективного применения указанных технологий управления внешнеторговыми конфликтами необходимо планомерно повышать профессиональную компетентность менеджеров и специалистов в области конфликтологии и кросскультурных коммуникаций, обучить их современным технологиям проведения внешнеторговых переговоров. Менеджеры и специалисты, которым приходится иметь дело с контрагентами из разных стран, должны в своей деятельности постоянно учитывать такие существенные факторы кросскультурных коммуникаций, как этноисторические и этнопсихологические особенности делового общения присущие той или иной стране. К таким факторам относятся: общая, бытовая и деловая культуры поведения, вербальный и невербальный паралингвистический языки общения, господствующие в той или иной стране ценности, в частности религиозные воззрения, национальные социально-экономические институты, манеры и обычаи, уровень социально-экономического развития страны, финансовая и логистическая инфраструктуры, доминирующая национальная модель менеджмента [9]. Кроме того, менеджеры и специалисты, вступающие в деловые переговоры с представителями зарубежных коммерческих фирм и правительственных организаций, должны принимать во внимание психологические, этические и эстетические особенности личности своих партнеров.

Следует обратить особое внимание на актуальную задачу повышения коммуникативной компетентности внешнеторговых работников, в частности в федеральных и региональных органах исполнительной власти, путем ознакомления их с традициями и обычаями повседневной и деловой жизни, необходимыми знаниями общей, организационной и коммерческой культуры страны-делового партнера, а также получением соответствующей языковой подготовки. Под *коммуникативной компетентностью* понимаются знания, умения и навыки межличностного общения. Вместе с тем в это определение обязательно нужно добавить способности к компетентному межличностному общению. Менеджер с высоким уровнем коммуникативной компетентности устанавливает и поддерживает необходимые контакты с другими людьми, владеет навыками адекватного взаимодействия с окружающими; умеет работать в группе; определять цели и средства коммуникации, правильно оценивать ситуацию и

выбирать соответствующую ей стратегию коммуникативного поведения. Таким образом, коммуникативная компетентность включает в себя не только коммуникативные знания, умения, навыки и способности, но и эффективное их применение на деле. Коммуникативная компетентность представляет собой сложный кластер различных и пересекающихся между собой личностных качеств. К ним, в частности, относятся: контактность; социальная компетентность; адаптивный социально-адекватный тип общения; адаптационная мобильность; стрессоустойчивость; критичность и самокритичность; мотивационно-волевые качества; толерантность; эмпатия или синтония; доминантность; ассертивность; артистичность или органичность по К.С. Станиславскому. Кроме этого, должны быть приняты во внимание такие факторы коммуникативной деятельности как коммуникативный имидж, то есть внешние данные, способствующие установлению деловых контактов, например, обаяние, личные связи и личностные знания, то есть неформализуемые приемы мастерства и искусства.

Для повышения коммуникативной компетентности в профильных экономических вузах и специализированных образовательных учреждениях помимо лекционных курсов «Кросскультурные коммуникации» рекомендуется ввести активные методы обучения деловому общению с представителями различных национальных культур. Особое место в процессе обучения следует уделить вниманию повышению адаптивности к восприятию особенностей национальной культуры, а также выработки специфических умений и практических навыков, которые могут понадобиться в различных ситуациях кросскультурного общения. Пользу здесь могут принести практические занятия по кросскультурному тренингу. Необходимо также обучить работников различным методам проведения деловых переговоров, среди которых методы: принципиальных переговоров, исходя из сути дела, «совместный анализ проблемы», «расстановка ложных акцентов в собственной позиции» и как один из вариантов этого приема – внесение явно неприемлемых для партнера предложений, «выдвижение требований в последнюю минуту», «постановка партнера в безвыходную ситуацию», «выдвижение требований по возрастающей», «постепенное повышение сложности обсуждаемых вопросов», «разделение проблемы на отдельные составляющие», а также прием «пакетирования», когда обсуждению подлежат не отдельные предложения или вопросы, а их комплекс. Важную роль должны сыграть различные формы внутрифирменного обучения под руководством опытных практиков. Разумеется, наилучшие результаты можно получить путем организации обучения и стажировки в других странах путем погружения в чужую среду, когда человек некоторое время живет в другой стране, проходя стажировку на профильной фирме и т.д.

Библиографический список

1. **Багиев, Г.Л.** Международный маркетинг / Г.Л. Багиев, Н.К. Моисеева, В.И. Черенков: – СПб.: Питер, 2009.
2. **Веренич О.В.** Туристский имидж России // Инновационные процессы в развитии социально-культурного сервиса и туризма в современном мире: материалы I Всероссийской научно-практической конференции. – Кемерово, 2011.
3. **Вилкова, Н.** Применимое право при разрешении споров из внешнеэкономических сделок // Хозяйство и право. 1995. № 11.
4. **Галумов, Э.А.** Имидж страны и власть [psycho.ru > library/552](http://psycho.ru/library/552)
5. **Гранкина, Т.К.** Экономический имидж страны и его составляющие / Т.К. Гранкина. – М.: РАГС. 2003.
6. **Дубровина О.А.** Соотношение протекционизма и фритредерства во внешней торговле: дисс. ... канд. экон. наук / Дубровина О.А. – М., 2005.
7. **Капелинский, И.Ю.** Причины возникновения конфликтов в процессе развития мировой торговли и формирование многосторонних механизмов их урегулирования: дисс. ... канд. экон. наук / Капелинский И.Ю. – М.: ВНИКИ, 2004.
8. **Киселев, И.Ю.** Проблема образа государства в международных отношениях в рамках конструктивистской парадигмы // www.elitarium.ru. 2007 . Апрель.

9. **Льюис, Р.Д.** Деловые культуры в международном бизнесе. От столкновения к взаимопониманию / Р.Д. Льюис. – М.: Дело, 1999.
10. **Мальшев, А.А.** Профилактика конфликтов как фактор психологической безопасности внешнеторговой организации // Российский внешнеэкономический вестник. 2008. № 4.
11. **Манойло, А.В.** Национально-государственные модели психологического управления конфликтами // Обозреватель-Observer. 2008. №2.
12. **Мата, О.В.** Арбитражное соглашение и разрешение споров в международных коммерческих арбитражных судах / О.В. Мата. – М.: Права человека, 2004.
13. **Панкрухин, А.П.** Маркетинг страны marketologi.ru
14. **Петросян, А.Д.** Импортный маркетинг как метод государственного регулирования внешнеторговой деятельности // Актуальные вопросы экономики и управления: материалы междунар. заоч. науч. конф. (г. Москва, апрель 2011 г.). Т. 2. – М.: Молодой ученый, 2011.
15. **Савицкая, А.С.** Внешнеэкономический компонент структуры имиджа государства // Имидж государства / региона: современные подходы: новые идеи в теории и практике коммуникации: сб. науч. трудов. Вып. 3 / отв. ред. Д.П. Гавра. – СПб.: Роза мира, 2009.
16. **Столетова, Д.Э.** Конфликты в международных коммерческих сделках и альтернативные судебному способы их разрешения: дисс. ... канд. юрид. наук / Столетова Д.Э. – М.: РАГС, 2007.

*Дата поступления
в редакцию 28.06.2011*

A.D. Petrosyan

MANAGEMENT OF THE FOREIGN TRADE CONFLICTS AS THE TOOL OF FORMATION OF COUNTRY IMAGE IN THE WORLD MARKET

Definition of the country foreign trade image is made, the role of organizational-administrative and socially-psychological factors and administrative technologies of state regulation of foreign trade, in particular, technologies of management by the foreign trade conflicts as important tool of formation of positive image of the country in the world market is shown.

Key words: the foreign trade image of the country, administrative technologies, the foreign trade conflicts, management of conflicts.

УДК 316.733

В.П. Козырьков**ЭСТЕТИЗМ КАК ФАКТОР СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ СОЦИОЛОГИИ:
РОМАНТИЗМ КАК СОЦИОКУЛЬТУРНОЕ ПРОСТРАНСТВО
СТАНОВЛЕНИЯ СОЦИОЛОГИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Прослежена внутренняя взаимосвязь процесса эстетизации общественных отношений и развития социологии в контексте развития духовной культуры.

Ключевые слова: эстетизм, социология, романтизм, социокультурный анализ, эстетизация, типы социальной рациональности.

Введение

Цель предлагаемых статей – показать внутреннюю взаимосвязь процесса эстетизации общественных отношений и развития социологии в контексте развития духовной культуры.

Данная цель вызвана тем обстоятельством, что по общему признанию аналитиков современная социология находится в состоянии глубокого кризиса. Мы будем исходить именно из такой оценки, но сам кризис будет толковаться не как разрушение системы социологических знаний и депрессия в рядах социологов, к чему кризис нередко сводится состояние кризиса, а как состояние, в котором происходит образование новых тенденций развития, которые можно рассматривать как возможные способы разрешения противоречий в развитии социологии. Причем этот процесс имеет социокультурный характер, и каждая новая тенденция отвечает определенным потребностям исторического развития общества, культуры и личности. И мы не можем сказать, что в истории социологии какая-то ее ветвь была бесполезной или даже вредной для будущего. Важно избежать такой односторонности, и не выделить такую логику становления и развития социологии, которая прямым путем приводит к современному состоянию, которое, как мы уже отметили, является кризисным. Поэтому, наблюдая и анализируя эту творческую духовную лабораторию в ее актуальном прошлом, мы не можем со всей определенностью утверждать, что результат обязательно получится тот, который предначертан легендарным прошлым современной социологии. Легенды о своем прошлом мы создаем сами для подкрепления своей современной правоты. История социологии самоценна и содержит в себе зачатки таких тенденций, которые могли бы стать нечто более значимым, чем это получилось в действительности, но в силу исторических обстоятельств этого не случилось. Поэтому возможны различные «заходы» в пространство историю социологии, которые позволяют очередной раз подумать о характере социологического знания и месте социологии в системе духовной культуры. При многообразии таких непредвзятых подходов, порождаемых самим историческим процессом развития социологии в контексте культуры, может сложиться не только целостная картина эволюции социального знания, но и могут быть найдены опорные точки в поиске новых направлений выхода из современного кризисного состояния.

Таким образом, одна из задач цикла статей – разрушить стереотипы, сложившиеся в современной социологии о судьбе самой социологии. Так, давно стало уже стереотипным представление, что социология возникла как некий ответ на объективные социальные проблемы, связанные с развитием индустриального, капиталистического общества. Затронув гениальную душу Сен-Симона, Фурье, Кетле, Конта, Маркса, Спенсера и др., включая более ранних мыслителей (Вико, Гоббс, Монтескье Руссо др.), эти проблемы, якобы, вызвали к жизни новую социальную науку, социологию, без которой дальше общество уже развиваться

не могло. Следовательно, идеи этих авторов в их совокупности, но только освобожденное от того, что составляло содержания исторической социокультурной среды, и есть, якобы, достижение социологии в стадии ее становления. Таким образом, подход, который берется за основу к изучению становления социологии, напоминает идею, исповедовавшуюся в недавнем прошлом по отношению к исторической науке вообще: история – это политика, опрокинутая в прошлое. Теперь только в качестве истории фигурирует социология, и мы можем сказать, перефразируя историка М.Н. Покровского, история социологии «ничего иного, кроме политики, опрокинутой в прошлое, не представляет». То есть в истории социологии находят только то, что имеется в тематике и проблематике современной социологии, которое во многом еще спелената политическими идеями и целями. Все, что находится за границами этого – тем можно пренебречь. Так, в советское время пренебрегали культурой романтизма, в контексте которой формировалась социология, а в настоящее время продолжают пренебрегать той же культурой романтизма и вдобавок революционными событиями Европы конца XVIII – первой половины XIX веков. В расчет берется только индустриальная революция, требования которой отразилось в идейном наследии О. Конта. При этом идеи Конта рассматриваются как возникшие в социокультурном вакууме, а не как многонаправленный диалог с его современниками, которые имели не меньше амбиций в стремлении создать новую социальную науку. Они не называли себя социологами, но социология, даже будучи уже названной наукой, еще не раз будет менять свои имена после Конта. И наоборот: называя себя социологией, определенная социальная наука вряд ли «дотягивает» до того высокого статуса, как это задумывалось О. Контом и как это думалось многими его последователями или оппонентами.

Таким образом, вот уже началось третье столетие, как социология существует, но до сих пор не утихают споры о судьбе возникшей науки. Какова ее цель? Как возможна вообще социальная наука? Должна ли она кому-то «служить»? Если современное общество не может развиваться без социологии, то каким оно становится, отвергая социологию? Эти и многие другие вопросы постоянно возникают и тревожат профессиональное сознание социологов, а дискуссия нередко переходит в широкую сферу всего общественного сознания. Она тогда становится фактом духовной жизни общества и затрагивает жизнь каждой отдельной личности, обещая что-то ей или выступая в роли академического судьи, который выносит строгий приговор судьбе не отдельным людям, а целым социальным группам, к которым принадлежит тот или иной человек. Например, быть в современной России интеллигенции или нет? Исчерпал свой исторический потенциал рабочий класс или нет? Появится в России когда-нибудь «новое крестьянство» или российские земли навек останутся лишь кладовой сырьевых запасов для всего цивилизованного мира, а крестьянство отомрет через 150 лет после отмены крепостного права?

Как полагает автор статьи, чтобы ответить на эти и подобные вопросы, необходимо детально погрузиться в историю проблемы, а не довольствоваться общими суждениями о причинах возникновения социологии или ее задачах, которые ставили перед собой каждый из социологов. Современное состояние социологии, в особенности в состоянии кризиса, должно быть не площадкой для проявления высокомерия по отношению к идеям прошлого, а более высокой точкой зрения, которая позволяет увидеть в прошлом то, чего его творцы и современники увидеть были не в состоянии.

В частности, как полагает автор статей, социология возникла в эпоху романтизма, которая наложила свою печать на характер социологии. Он выразился, в частности, в том, что, с одной стороны, произошло расширение полномочий воображения, а с другой – романтические корни социальной науки привели к господству эстетизма в социальной науке. И до сих пор социология существует в этом противоречивом состоянии. Отсюда и общее название цикла статей, которое выражает общую черту социологии на стадии ее становления и на современной стадии, когда, казалось бы, социологии превратилась в одну из тех наук, которая объективно востребована обществом, но субъективно эта потребность не находит способа

своего удовлетворения. Поэтому читателю предлагается погрузиться в атмосферу поисков выхода из кризиса, из которого социология успешно вышла в состоянии своего становления. Но теперь она прошла большой цикл в развитии, и ее состояние напоминает то, которой сложилось в европейской культуре двести лет назад. И нам есть чему поучиться у наших предшественников, которые делали свое дело более решительно и не оглядывались ни на власть, ни на великих предшественников, пренебрегая коммерческим интересом. Социология возникла как теоретический, научный способ общественного самосознания, который позволял определить свое место всему гражданскому обществу, а не только отдельным классам или слоям. Это положение между молотом (власть) и наковальной (определенный класс) много бед принесет социологии за двести лет ее истории. Еще большие испытания предстоят ей в будущем, поскольку социальные современные противоречия неизмеримо более острые и более масштабные. Но выбирая роль «третьей стороны», независимого эксперта, социология продолжает делать свое дело, которое она начала двести лет назад, несмотря на все внутренние коллизии и внешние опасности. В этом залог того, что социология сохранит себя и не растворится в многообразии новомодных социальных наук, которые возникают сейчас как грибы после дождя. Впрочем, так же, как двести лет назад, в эпоху революций и романтизма.

Метод – социокультурный анализ, опирающийся на диалектическую методологию. Его суть в том, что для определения специфики социологии необходимо изучение не только произведений основоположников новой науки, но также изучение логики развития новых идей в социокультурном контексте. Следовательно, диалектика познания должна быть «нагружена» реальными социальными и культурными явлениями, которые составили мотивационную духовную основу становления социологии и были той актуальной тематикой, разбираясь в которой социология приобретала свой изначальный облик, претерпевая при этом различные метаморфозы.

Жанр – теоретический анализ. В качестве аргументов обоснования позиции автора послужили исторические факты, факты публикации работ упоминаемых авторов и логика развития социокультурных процессов, приводящих к эстетизации социологии.

К вопросу об эстетизме и эстетическом. Эстетизм не тождественен эстетике. Но для того, чтобы понять природу эстетизма, необходимо определиться с толкованием сути эстетики и природы эстетической реальности.

В своем анализе мы будем исходить из широкого толкания эстетики. С точки зрения такого подхода эстетика есть наука о формах выражения содержания, оцениваемых как отношения прекрасного и безобразного, возвышенного и низменного, трагического и комического и др. ценностные элементы этих отношений, фиксируемые сознанием в виде эстетических категорий. Изначально, следовательно, эстетическая реальность имеет субъектно-объектную природу. Однако в силу ряда причин, о которых будет отмечено далее, категориальная, субъектная сторона эстетических отношений нередко рассматривается абстрактно, вне связи с социальными отношениями и проблемами, что позволяет в социологических исследованиях игнорировать эстетический фактор как совершенно не существенный, не относящийся к предмету социологии. Как правило, под эстетическими факторами в этом случае имеются в виду лишь те элементы общественных отношений, которые связаны с профессиональным искусством. Эстетика объективных общественных отношений и не профессиональных субъектных форм их выражения игнорируется. Но если эстетичность самих общественных отношений не принимается во внимание, то вполне объясним тот факт, почему социология искусства развивается крайне медленно. Другое дело, например, политическая или экономическая социология, которые, якобы, изучают отношения людей в их «чистом виде». Видимо, то, что эта «чистота» достигается за счет очищения от культуры, сторонников этой точки зрения несколько не смущает.

Нередка и противоположная ситуация, когда эстетические отношения объективиру-

ются, но не как результат деятельности человека, а как возникшие стихийно, лишенные социального творчества, но тем, якобы, и ценные для человека, так как в этой стихийности видится подлинная красота жизни. Любая рационализация общественных отношений и управление ими рассматриваются как вмешательство в естественную органичность, как нарушение данной от бога гармонии. Более того: сама субъектность в такой объективации эстетических отношений оценивается лишь как источник низменного, безобразного, комического. Следовательно, в этом случае мы видим не игнорирование субъективной стороны эстетических отношений вообще, а сведение их к негативному ряду эстетических категорий. Как следствие развития этой тенденции в настоящее время можно наблюдать триумфальное шествие эстетики безобразного [1] в современном российском обществе. Именно в эпоху романтиками впервые была разработана эстетика безобразного. В частности, в 1853 г. Розенкранцем, учеником Гегеля, была издана «Эстетика безобразного. Именно в его работе мы находим детальный анализ неправильного, отвратительного, ужасного, тривиального, тошнотворного, преступного, призрачного, дьявольского, колдовского, карикатурного [2].

Таким образом, в самой природе эстетического отношения скрыто внутреннее противоречие, определенный способ разрешения которого позволяет возникать крайним формам проявления эстетического, в которых оно или игнорируется (эстетический нигилизм), или абсолютизируется, но только в негативном ряде категорий (эстетика безобразного, низменного, ужасного). В этих крайних формах не ясна специфика действия эстетической реальности как причинного фактора. В первом случае считается, что эстетической причиной можно пренебречь, а во втором случае эстетический фактор сам бросается в глаза с тенденцией поглотить собой все другие причины социальных процессов. Эстетический феномен даже в своей классической форме как причина чего-либо до сих пор во многом остается загадкой. Мы еще не можем сказать, как возникает та или иная форма эстетического бытия или действует как причина того или иного явления. Раздвоение эстетической реальности на две крайних формы является формальной предпосылкой возникновения морализма (эстетического нигилизма) и эстетизма (имморализма). Но для того, чтобы эти формальные предпосылки стали реальными условиями действительного морализма и эстетизма, необходимы реальные исторические условия и конкретные действия людей, ориентированных на создание крайних форм эстетической реальности.

Имманентность эстетического в социальной реальности и в социологии. Подойдем к решению проблемы с другой стороны – со стороны социальной реальности. Начнем с констатации факта: социальные отношения невозможны без формы своего выражения, то есть без своей эстетической стороны; в свою очередь, эстетические категории имеют смысл лишь тогда, когда они выражают отношения людей по поводу определенных ценностей культуры. Это означает, что эстетический фактор имманентен социальной реальности и неотделим от нее. Точно так же, как неотделимы друг от друга форма и содержание вообще. Если мы принимаем этот факт, то отсюда следует, что социологическое исследование невозможно без учета эстетического фактора.

Отсюда два логических следствия. *Во-первых*, любое социологическое исследование без учета эстетического контекста будет страдать односторонностью, а сами рассматриваемые в них отношения, лишенные формы своего выражения, останутся безликими. *Во-вторых*, если эстетическая сторона явления в социологическом исследовании игнорируется, то внешнюю форму выражения социального будут придавать (создавать) социологи, используя те или иные методы исследования, которые становятся в таком случае «заместителями» эстетической формы, и тем самым приобретают их черты. Эти два обстоятельства является одной из причин того, почему так остра в эмпирических исследованиях необходимость в различного рода схемах, графиках, диаграммах, презентациях и прочих наглядных образах, позволяющих завершить ту форму эстетизации, которая инициирована применяемым методом эмпирического исследования. Разрушая естественную эстетическую форму изучаемого социального явления, социологическое исследование придает ему свою.

Но если это так, то это значит, что даже в случае их игнорирования эстетические отношения остаются в поле зрения социальных наук. Но только попадают они в социологию не с парадного, а с черного входа в виде все большей необходимости использования так называемых «качественных» методов исследования, применения методов социальной феноменологии, составления различного рода «социальных портретов» и «нарративов». Эстетические отношения изучаются, но только различными прикладными науками, отделившимися от социологии в качестве коммерциализированных (адвертология, маркетинг, PR, дизайн и др.) или политизированных (политтехнология, пропаганда и др.) дисциплин. И поскольку в современной культуре эстетический фактор приобрел доминирующий характер [3], то его игнорирование в теории ведет к методологическим издержкам двоякого рода. *Во-первых*, социология видится изолированной от социокультурного контекста, в котором она формируется и воспроизводится; *во-вторых*, происходит отставание теоретической социологии от социальных дисциплин прикладного порядка, которые успешно «оседлали» эстетические отношения и достигли больших практических успехов.

Таким образом, когда эстетизм есть уже политика [4, 228], и современная экономика существует в виде «культурного империализма», склонного, как еще было замечено Р. Макмулленом в 80-е годы прошлого века, эпоху рождения постмодернизма, «превращать эстетику в этику» [5, 213], слабая теоретическая разработанность эстетического фактора в социологии представляется архаикой. В такой ситуации желание исследователей уйти от решения возникшей проблемы видится нечто мистическое. Но, скорее всего, дело не в мистике, а в самых банальных причинах, которые известны всем, но не всеми признаются. И состоит одна из них в том, что теоретическая социология сама поддалась эстетизации, поэтому не стремится «рубить сук на котором сидит».

Да и не получается уйти от эстетического фактора. Несмотря на то, что теоретическая социология игнорирует эстетический фактор, а нередко и общий культурный контекст в целом, вопреки воле социологов складывается эстетизированная социология, включенная в общий процесс эстетизации всей современной культуры. Только в этом случае связь социологии с эстетикой становится превращенной и не осознаваемой. И чем энергичнее социология убегает от эстетики, тем ее эстетизм более интенсивен. Каковы же истоки сложившегося положения, имеет ли оно исторические корни?

Социально-романтические корни эстетизма социологии. Обратимся к истокам эстетизма в социологии. Мне уже приходилось обращаться к проблеме генезиса социологии во взаимосвязи с эстетизмом [6]. Его зародышевые формы можно найти в античной и средневековой культуре. Но в своем зрелом виде эстетизм есть явление позднее для истории культуры. Он появляется тогда, когда впервые осознается кризис культуры (Ж.-Ж. Руссо, Ф. Шиллер и др.) и само понятие культуры входит в интеллектуальный оборот как одна из форм общественного самосознания. Собственно, рождение самой эстетики как науки тоже связано именно с той эпохой, которая предшествовала Великой французской революции, сопровождала ее и была ее следствием. Эстетика и эстетизм в его ранней форме формировались одновременно как духовные формы становления новой культуры и нового общественного устройства, связанного со становлением «третьим сословием» в качестве новой общественной силы. Эстетика не могла бы и появиться, если бы эстетические отношения не приобрели социально значимого характера в такой степени, что сочинения по эстетике стали рождаться одно за другим.

В этой связи можно еще раз упомянуть слова Гете, которые мы уже приводили: «В области эстетики снискать себе похвалу и имя легче: для этого нужно только понравиться, а короткое время нравится все» [6, 11]. Но для нас в данном контексте еще раз важно подчеркнуть, что эстетика становится новой формой общественного самосознания восходящего третьего сословия, городской буржуазии, заявляющей о себе громко, смело и ярко. В этой новой области духовной жизни третьему сословию не уступали и те, кто не желал разрушения «старого порядка», поэтому эстетика стала духовным пространством столкновения двух об-

щественных сил, которые своим художественным произведениям, эстетическим эссе, трактатам, суждениям и речам отдавали потаенные чувства, идеи и замыслы. Так рождались ранние романтические тенденции в развитии культуры, революционные и консервативные. Развитие социальной мысли в этих условиях, когда духовная культура начинает дифференцироваться, порождая новые формы общественного самосознания, не могло не изменить своей формы. В результате на смену обремененным различными религиозными и политическими элементами ранним формам социальной науки (Вико, Гоббс, Монтескье и др.) приходит социальная наука в своей дисциплинарной форме. Или уходит от этой дисциплинарности, отчасти, в соответствии с логикой развития культуры романтизма.

Так что в результате мы получаем, с одной стороны, социологию О. Конта, изложенную в «Курсе позитивной философии» (1830–1842), а с другой, в ту самую эпоху – форму социальной мысли, воплощенную в произведениях основателя герменевтики Ф. Шлейермахера «Речи о религии к образованным людям, ее презирающим» (1799), продолжателя сенсуализма Дестюта де Трасси «Элементы идеологии» (1801), ученика А. Смита, Ж.-Ш. Сисмонди, «Новые начала политической экономии, или О богатстве в его отношении к народонаселению» (1819 г.), основателей анархизма Ж. Прудона «Что такое собственность?» (1840) и М. Штирнера «Единственный и его собственность» (1844). Все эти и многие другие работы в той или иной степени выражали и развивали духовную культуру романтизма и поэтому носили эстетизированную форму. В дискуссии, скрытой или открытой, с этой эстетизированной тенденцией социальной мысли формировалась и развивалась научная форма социальной мысли в творчестве Кетле, Конта, Маркса и др. Но было бы методологически неверным полагать, что при этом в романтизме не было ничего такого, что потом не перешло в идейное наследие Конта или Маркса, Спенсера или Вебера. Романтизм не был «пустой» формой, которую можно было просто отбросить и развивать социологию в ее дисциплинарной чистоте. Как показывает история социологии, черты романтизма и, как следствие, эстетизма, были на всех этапах ее развития. Точно так же, как воспроизводятся социальные корни эстетизма в виде «третьего сословия», которое давно уже не третье, а первое, но родимые пятна его культуры не стираются временем. И если неогельянец Руге в эпоху романтизма писал, что «народ тем более романтичен и элегичен, чем менее благополучно его положение» [7, 114], то в настоящее время эту оценку можно применить к современному обществу, но только добавить к неоромантизму мощное воздействие СМИ, PR и политтехнологий. Понятно, что под воздействием такой духовно-технологической мощи не устоит ни одна социальная наука, трансформируясь в соответствии с новым духом эпохи. Впрочем, не таким уж и новым. Или романтик Стендаль в произведении «Расин и Шекспир» (1823), описывая спор романтика и классика, приводит мнение классика о том, что «зрелое поколение, которое, как и молодежь, не любит читать новых шедевров, требующих работы мысли, но также хочет готовых фраз» [8, 87]. Как это мнение хорошо знакомо по нынешним временам, когда современное поколение тоже не хочет читать книг, требующих работы мысли и «также хочет готовых фраз». Подобных фраз, звучащих очень актуально, в сочинениях романтиков можно найти множество. Уже одно это совпадение духа времени говорит о многом, когда мы ищем корни современного эстетизма.

Эстетизация науки и новые возможности социального познания. Мы отметили, что в романтизме не все было плохо, и социальная наука в своем становлении не могла не опереться на его творческий потенциал. Мало утверждения, что эстетизации социальной мысли происходила в общем социокультурном контексте, в котором художественная форма сознания, достигнув в романтизме своего апогея, затронула и науку в целом, сыграв свою позитивную роль. Доминирование романтического фона в культуре оказало свое особое воздействие на форму становления социологии: научный рационализм стал уступать эстетизму и морализму; или их диалогу, в котором каждый из участников активно обращался к воображению. Таким образом, воображение – вот тот потенциал, который вызвал к жизни новую социальную науку. Но в начале затронем кратко воздействие воображения на развитие науки в целом, чтобы не было искушения обвинить нас в тенденциозности.

В философии науки уже давно признано, что научное исследование невозможно без воображения и без апелляции к феномену красоты [9–10]. Для такого признания нужно было пройти немалый путь, начало которому было положено культурой романтизма, в которой впервые была обоснована идея о том, что научное познание не может довольствоваться только экспериментальными, рациональными и строго логическими формами мышления. Проиллюстрирую это общее соображение конкретными примерами.

Так, известно, что физик И.В. Риттер (1776–1810), создатель электрохимии, считая своими учителями И. Гердера, постоянного оппонента И. Канта, и романтика Новалиса, наиболее поэтичного из теоретиков. В Баварской академии наук Риттер прочитал знаменитую речь «Физика как искусство» (1805), характерную для романтического естествознания. В ней утверждалось, что «воссоединение с расчлененной природой, возвращение к первоначальной гармонии с ней, к чему издавна стремится человек, каждодневно заполняя этим стремлением свои чувства и мысли, – такое воссоединение с ней будет следствием понимания природы и господства над ней... В этом состоянии его жизнь и его дела достигнут высшей истины и красоты. Он сам станет художественным произведением и одновременно художником в отличие от прежнего искусства, которое хотя и служило идеалом для человека, но все же не сливалось с ним. Искусством обычно называют то, что не достигло еще своей высшей точки, а физика в своей целостности не имеет иной цели, как осуществить высшую жизнь и высшие дела, поэтому я осмелюсь дать ей имя искусства, причем более высокого, чем все другие» [11, 165–166]. Возведение физики в ранг искусства звучит не только в духе классического романтизма, но и вполне вписывается в современный социокультурный контекст, когда идет спор о том, способна ли физика действительно стать источником эстетического возвышения природной среды обитания человека или она станет источником ее гибели. Как выясняется, ответить не могут ни физика, ни искусство, поскольку ответ на этот вопрос надо искать в социальной плоскости, а не в природной и не в художественной.

Новаторским толкованием взаимосвязи эстетического и научного познания явились идеи В. Гумбольдта, основоположника теории языкознания. Как справедливо отмечается в популярной ныне Википедии, «он считал, что наука в некотором смысле может совпадать с эстетикой, и выработал свою теорию исторического познания» [12]. Такая гносеологическая позиция позволила В. Гумбольдту довольно точно и дальнорочно оценить предпосылки и характер французской революции, связывая ее с контекстом развития культуры в целом, а не только с особенностями Франции или даже Европы. В частности, немецкий мыслитель в 1797 г. писал: «Пока за пределами человечества многое еще держится прочно и непоколебимо, это внешнее и дает надежные критерии для сравнения, и непосредственно необходим только вопрос: грозит ли опасность этим опорным столпам человеческого благополучия? Но когда все окружающее нас теряет устойчивость, надежное убежище остается только внутри нас, и с тех пор, как в одной из самых важных и развитых частей света произошла фактическая переориентация всех отношений, остается неясным, в какой мере они сохранили стабильность в других местах, тем более что в наш философский век эта переориентация выглядит как нечто единственно правомерное, абсолютно и морально необходимое» [13, 337]. Ясно, что речь идет о революционных событиях во Франции. И мысль о том, что в этих условиях «произошла фактическая переориентация всех отношений», которая есть «нечто единственно правомерное, абсолютно и морально необходимое», звучит социологически точно и актуально до сих пор.

Даже математика не могла не отреагировать на изменившийся дух эпохи с ее «бурей и натиском», связанный с революционным романтизмом во всех его социальных и духовных проявлениях. Классическая наука, развиваясь на основах строгого рационализма, каноны которого задавались математикой, совершила невероятный грех: она стала прибегать к воображению. Для классического типа научного познания это был сильнейший удар. Причем, этот удар был нанесен со стороны самой математики, чего от нее никто не ожидал. В конце 30-х годов прошлого столетия вышло произведение Н.И. Лобачевского, которое он назвал

«Воображаемая геометрия» (1837 г., на французском языке). В области геометрии русский ученый сделал то, что Наполеон в политике: он разбил веками сложившиеся каноны науки и задал новые, невозможные без деятельности воображения.

В этой связи Э.В. Ильенков, ссылаясь на Гете, писал о воображении, что «главная его функция позволяет нам видеть то, что есть, то, что лежит перед глазами, – делать то, что "труднее всего на свете", по словам Гете» [14]. Такая ссылка Э.В. Ильенкова на Гете не случайна, поскольку именно во времена Гете теоретиками культуры романтизма была разработана категория воображения, ставшая, наряду с иронией, самосознанием, игрой и др. понятиями основой классической формы эстетизма. И не случайно, что такую оценку роли воображения делает именно Э. Ильенков, много посвятившего сил для раскрытия природы идеального, диалектике абстрактного и конкретного в марксистском наследии. Именно Марксу, прошедшему в юности школу романтизма, а затем диалектики Гегеля одному из первых удалось «видеть то, что есть, то, что лежит перед глазами» в социальной области.

Следовательно, при всех последующих издержках, эстетизация науки, культивирование в ней функций воображения сыграла позитивную роль в культуре в целом, включая ее научную составляющую в виде формирующейся социологии. Этот факт важно отметить, так как обычно проводят прямую зависимость возникновения социологии от классической естественной науки как экстраполяцию ее методологии на социальную сферу. Нам же важно подчеркнуть опосредованность этого влияния через эстетическую область культуры, в частности, через усиление роли воображения.

В то же время, художественная форма познания в эпоху романтизма далеко не сразу приобрела себе оппонента в виде профессиональной социальной мысли (социологии). Но как только это случалось, то в этой интеллектуальной конкуренции победу одерживало чаще всего искусство. Социология еще только формировалась, а те ее формы, которые существовали, не имели такого авторитета и воздействия, как творчество великих писателей, поэтов, композиторов и художников романтической эпохи, имена которых стали известны всему миру: Шиллер и Гете, Бетховен и Глинка, Андерсен и Гофман, Делакруа и Брюллов и др. Что касается социологов, то его идеи вскорости потеряли свою популярность. Социологические работы Маркса («Экономическо-философские рукописи 1844 г.», «Немецкая идеология» (1845-46 гг.) и др.) были опубликованы только в XX веке, а те, которые получили распространение, часто догматизировались в политическом духе.

Основные направления становления социальной науки. Итак, создалась социокультурная ситуация, в которой развитие науки было невозможно без синтеза с искусством, в котором всегда культивировалось воображение как способ познания. Но в первую очередь этот синтез был необходим для создания социальной науки, о необходимости которой говорили все просветители, и было немало высказано гениальных идей для ее создания (Вико, Монтескье, Гоббс, Руссо, Гельвеций, Гердер, Кондорсе и др.). В начале XIX века, в эпоху романтизма, развернулась интенсивная духовная работа по созданию этой науки в нескольких направлениях.

Одно направление рассматривало создание социологии как «надстраивание» еще одной науки над уже существующими науками, где важнейшей основой является математика (Кетле, О. Конт и др.). Второе направление за основу выбрало эстетический подход, который во многом уже культивировался просветителями, но достиг своего апогея в культуре романтизма (Бальзак, Стендаль, Скотт и др. писатели романтики). Третье направление связано с синтезом возможности искусства и математики, что стало возможно на основе диалектики (Гегель, Маркс). Наша задача состоит в том, чтобы понять логику взаимосвязи этих направлений.

Строго говоря, между первым и вторым направлением нет принципиальной разницы. Поэтому можно сказать, что в действительности были выбраны и стали культивироваться в общественном сознании в самом общем виде два пути и два способа познания: эстетизм и диалектика. Каждый из них включает в себя различные оттенки, которые не размывают и, тем более, не отменяют этих двух общих тенденций. Но сведя все многообразие к двум основным направлениям, мы сможем рассмотреть эстетизм и диалектику не внешним образом,

а социологически, социокультурно, не вдаваясь в философские или филологические тонкости анализа их проявления в культуре.

Итак, выделяются два стиля, два способа мышления, два типа духовности, которые, однажды возникнув, сопровождают человечество уже два столетия, то сталкиваясь, то расходясь в крайние позиции. Это, конечно, не значит, что после исторического выбора исчезли все остальные формы мышления. Наоборот: новые идеи и возникают в критике идей старых, в их преодолении с замыслом, что вместе с идеями исчезнут и старые отношения, которые они, собственно, и выражают.

Предромантизм как предпосылка социологии. В литературе по истории социологии в качестве непосредственных истоков социологии обычно называются те идеи и творчество тех мыслителей, которые логично назвать: Кондорсе, Сен-Симона, Кетле и др. просветителей социальной направленности. Содержание идей этих авторов тождественны по своему типу с идеями Конта или Маркса. Казалось бы, иначе и быть не может: если кто-то высказал социологическую идею в современном понимании существа социологичности, то в последующие годы любое совпадение с ней будет ее продолжением, поэтому кто-то сразу попадает в ряд предшественников. Но история не протекает так линейно и гладко. Новые идеи в определенную эпоху, когда возникла необходимость в этих идеях, рождаются в разное время и независимо от их приоритетности. Поэтому метод «филиации идей», который часто используется для объяснения становления социологии, может совсем не сработать. Он что-то объясняет, но для создателей социологии, с их амбициозностью, он совсем не подходит. Поэтому мы снова вернемся к романтикам, но на этот раз к предпосылкам самого романтизма, так как называть идеи просветителей прямыми предпосылками социологии не диалектично и ненаучно. Между тем, в литературе такой подход был использован еще Г.В. Плехановым в его работах, посвященных истории общественной мысли [15–16].

Итак, снова романтизм. Но прежде чем сложиться в своей зрелой форме, романтизм прошел ряд стадий, в том числе и стадию, когда о романтизме еще и речи не было. Он формировался в таких еще не названных формах, которые явились духовными предпосылками романтизма как доминирующей формы культуры в дальнейшем. Такой романтизм мы могли бы назвать предромантизмом, как это уже стало принято называть в современной филологической науке [17–19]. Только к оценке этого периода мы должны подойти социологически. В этом случае романтизм будет отличаться от предромантизма не набором определенных имен и черт их творчества, как это можно заметить, читая филологические работы, а его местом в духовной структуре общества.

В частности, нельзя не заметить, что в творчестве Руссо доминирует моральный фактор, а не эстетический, поэтому он осуждает общественный прогресс. « Науки и искусства, ..., – утверждает Руссо, – обязаны своим происхождением нашим порокам: мы бы меньше сомневались в их достоинствах, если бы своим происхождением обязаны они были нашим добродетелям» [20]. Для Шиллера сама эстетика тоже еще служит моральному воспитанию, поэтому он призывает: «Не время теперь так заботиться о своде законов для эстетического мира, когда гораздо больший интерес представляют события мира морального» [21]. Дешан прямо отмечает, что «искусства эти нужны были для осуществления истины и состояния нравов» [20, 105], «между тем истинная мораль для человека в обществе – все» [21, 138]. Таким образом, на стадии предромантизма мораль выше искусства. Не случайно и то, что сама эстетика еще только возникает. Для романтизма стадии зрелости этим «все» становится искусство и выражаемые (творимые!) им эстетические отношения. Следовательно, предромантизм важен для становления социологии своей моральной мотивацией, которая стала исчезать в период зрелого романтизма, а в период неоромантизма (Леонтьев, Ницше и др.) она была вытеснена вообще мотивацией эстетической. Эстетика стала этикой. Но для эпохи классического романтизма, но со стремлением критически преодолеть его (Конт, Маркс им др.), сильная моральная мотивация сохраняет свое значение. Без нее не было бы ни позитивистской социологии Конта, ни материалистического понимания истории К. Маркса.

Важно обратить внимание еще на одно обстоятельство. Обычно отмечается, что романтизм стал ответом на крах рационалистического познания, который потерпела социальная мысль в ходе Великой Французской революции, идеи которой были возвращены Просвещением с его культом рациональности и прав человека. Приведу лишь одно типичное высказывание: «Возникновение романтизма связано с разочарованием в идеях просветительства, возлагавшего надежды на строительство справедливого общества на разумных началах, с реакцией на углубление острых противоречий цивилизации. Романтики резко дистанцировались от современного им экономического и социального порядка, считая его недостойным человеческой личности». В шестой главе этого же труда автор подчеркивает: «Творчество романтиков, пришедшее на смену просветителям, не только формулирует принципиально новый взгляд на искусство, но и вырабатывает особый язык теоретической мысли об искусстве, обогащенный новыми понятиями и категориями» [22]. Но если это так, то довольно трудно будет понять, чем обусловлен специфический характер самой французской революции, в чем состоит ее духовная мотивация и чем обусловлен социально-художественный облик этой революции. Но как только мы будем исходить из того, что Французская революция вдохновлялась романтизмом, так многое в революции получит свое теоретическое объяснение. Ее эмоциональная яркость, идеологические метания и пугающая жестокость вызваны тем, что идеология этой революции была не только рационалистическо-просветительская, но и рационалистическо-романтическая. Так, известно, что Маркс называл якобинцев «фантазирующими террористами» [7, 55].

Таким образом, в предромантизме создается эстетика как особая форма познания и сильны художественные элементы, но *нет еще эстетизма*, поэтому все эстетические идеи подчинены морали. Социологически значима именно эта сторона проблемы. Для социологии суть романтизма не в том, что говорят сами о себе романтики и что они дают в своих произведениях с точным реестром того, чем отличается романтизм одного автора или страны от романтизма другой. Для нас важно подчеркнуть, что романтизм стал формироваться уже в недрах Просвещения и своими ранними формами оказал влияние на ход многих событий конца XVIII – начала XIX веков, приведших к необходимости и возможности создания социологии. Оказал влияние, но не имел еще статуса осознанной и доминирующей формы культуры и общества.

Как только романтизм становится частью и господствующей формой общей культуры, выйдя из зародышевого состояния, так его суть приобретает социальный характер и начинает фиксироваться историками, философами и социологами (Берк, Кант, Гегель, Луи Блан, Минье, Тьерри и др.). И эта суть не в том, что только просветительская идеология была предпосылкой французской революции, а романтики ее духовными могильщиками, как это обычно понимается. Скорее, наоборот: именно романтически ориентированная идеология просветителей стала духовным истоком французской революции, придав ей весь блеск, величие и трагизм. И просветители в эту революцию вошли не своей рациональностью, а иррационалистической составляющей. Если бы вожди французской революции не были романтиками в социальной области, то они, подобно Вольтеру и Руссо, свою жизнь закончили бы в тиши кабинетов при написании теоретических трудов и воспоминаний, а не под ножом гильотины. Скорее всего, рационалистами в этот период были Сен-Симон, Фурье, Оуэн и другие утописты, верившие в то, что с помощью разума можно разработать проект наилучшего устройства общества и убедить в необходимости его построения все общество.

Источники общественного развития глазами историков-романтиков. Хорошо известно, что социологическая мысль еще очень молода по сравнению с исторической наукой. Поэтому становление социологии не могло произойти вне влияния «матери всех наук». И такое влияние было и очень сильное, если не доминирующее. Только не всей исторической науки, а ее отдельного направления, которое, опять-таки, близко к романтизму или включается в него. Была у этих авторов сильна и социологически значимая составляющая, которая непосредственно примкнула к своду социологических идей.

Что касается социологически точных констатаций, то их можно будет найти в работах названных уже первых историков-романтиков Минье, Тьерри, Карлейля, которые показали, что весь ход и результаты Французской революции определялись борьбой сложившихся классов и партий, а не социально-философскими идеями.

Например, О. Тьерри, ученик Сен-Симона, которым стал после Тьерри О. Конт. С работ Тьерри в исторической науке стала распространяться идея классовой борьбы. В 1820 г. Он опубликовал «Письма об истории Франции», в которых утверждалось, что «лучшая часть наших анналов. Самая трудная, самая поучительная, должна быть еще написана; нам еще не хватает истории граждан, истории подданных, истории народа» [24, 10]. Понятно, что подобные идеи не могли не повлиять на становление социологии. В этих идеях видно влияние Сен-Симона на творчество Тьерри, но характер изложения, методы, которые он использует, безусловно, носили романтический характер. На творчестве Тьерри мы видим ранний опыт взаимодействия социологии и исторической науки. И для нас важно то, что этот опыт осуществлен в эпоху, когда господствовали романтические идеи, которые способствовали взаимодействию различных наук, поскольку метод воображения и синтеза, диктуемый эстетизмом, неизбежно ведет к интеграции всех социальных знаний.

В подобном же духе рассуждали и писали другие историки-романтики. Например, Т. Карлейль писал: «Что касается формулы жирондистов, предлагающей respectable республику для средних классов теперь, когда всякая аристократия основательно разгромлена, то мало оснований ожидать, чтобы дело остановилось на этом. Свобода, Равенство и Братство — таков выразительный, пророческий лозунг. Может ли быть осуществлением их республика для почтенных, белолицых средних классов? Главными двигателями Французской революции, как всегда будет при подобных революциях во всех странах, были голод, нищета и тяжелый кошмарный гнет, давивший 25 миллионов существ, а не оскорбленные самолюбия или спорные воззрения философствующих адвокатов, богатых лавочников и земельного дворянства» [23, 431]. Под этими словами мог бы подписаться любой ортодоксальный марксист, а сказаны они были в 1837 г., когда Маркс еще был студентом Берлинского университета и приверженцем философии Гегеля. И звучит для современной России актуально.

И все же нельзя недооценивать и роль идейных предпосылок во Французской революции, которые представлены творчеством предромантиков. Иначе как объяснить, например, следующий пассаж у самого Т. Карлейля, если игнорировать настроения, чувства этого этапа культуры, которые стали источником вдохновения всех активных участников Французской революции: «Надежда наша была тогда ярка, как солнце; теперь она стала злобно красной, как пожирающий огонь. О боже, что за чары, что за дьявольское наваждение делают то, что полное счастье, которое так близко, что до него рукой подать, никогда, однако, нельзя схватить, а вместо него лишь раздоры и нужда? Одна шайка предателей за другой! Трепещите, изменники; бойтесь народа, называющегося терпеливым, многострадальным, он не может вечно покоряться тому, чтобы у него вытаскивали таким путем из карманов Золотой Век! Да, читатель, в этом-то и чудо. Из этой вонючей свалки скептицизма, чувственности, сентиментальности, пустого макиавеллизма действительно выросла такая вера, пылающая в сердце народа. Целый народ, живущий в глубокой невзгоде, проснувшись к сознательности, верит, что он у преддверия братского рая на земле. Он протягивает руки, стремится обнять невыразимое и не может сделать это по известным причинам. Редко бывает, чтобы про целый народ можно было сказать, что он имеет какую-нибудь веру, за исключением веры в те вещи, которые он может съесть или взять в руки. А когда он получает какую-нибудь веру, то история его становится захватывающей, замечательной» [23, 433–434]. Я специально выписал эту длинную тираду, чтобы показать ее контраст ранее приведенному фрагменту о борьбе классов в революции. Тут мы видим Карлейля-романтика, который верно уловил своим настроением и оценкой характера этой революции — духовный настрой самой революции. И видно, как в этой длинной цитате перечисляются те духовные элементы, которые и составляют содержание идей ран-

них романтиков: метафоричный стиль речи, нагромождение контрастных ситуации, эмоциональная приподнятость, переходящая в экстаз. Короче, как говорит сам Карлейль, «свалка скептицизма, чувственности, сентиментальности, пустого макиавеллизма». Как можно видеть, Карлейль мог быть и романтическим, и пронизательным, одновременно.

Таким образом, историки-романтики стали рассуждать социологически раньше, чем появилось само слово «социология». Мы об этом уже говорили, когда отмечали, что Ж. де Сталь в 1808 г. создала труд «О литературе, рассмотренной в связи с общественными установлениями», который с полным правом можно отнести к отрасли, которая сейчас называется «социология литературы». Данный факт уже отмечался в отечественной литературе [24, 20]. Добавим только, что данный «заход» становления социологии важен для понимания процесса становления русской социологии, в которой социология с самого начала приобрела художественно-критическую форму.

Причины дифференциация типов социальной рациональности. Сделаем определенные выводы из проведенного анализа. В частности, мы можем отметить, что на этапе становления социологии обнаруживаемая рациональность оказалась различной. Так что обращение к разуму, к здравому смыслу, как критерию истины, чего было достаточно в век Просвещения для «вынесения приговора» над историей или в понимания социальных явлений в новую эпоху уже не срабатывало. Рациональность, которую культивировали просветители, наследуя ее от Декарта, имела успех в области естественных наук, но пасовала перед социальными проблемами. Поэтому просветители – это социальные романтики, дополняющие свое социальное творчество художественными произведениями. Историки-романтики нашли новую рациональность в деятельности народа, основной движущей силы истории, и все сделали для того, чтобы заложить принципы толкования и описания характера нового здравого смысла, источником которого является не социальная элита, а массовые и действующие исторические субъекты. Что касается рационализма утопистов, то он имеет социальную направленность, но по отношению к будущему, а не к прошлому. Между тем как романтики времен революции черпали свои образы, мысли и примеры из подражания героям времен античных республик и революционного прошлого других стран (Нидерланды, Англия, США). И в таком подражании они не могли избежать эстетизма ив своей социальной деятельности

Известно, что толчком к разворачиванию революционных событий во Франции стало освободительное движение в США. Но при этом важно напомнить и тот факт, что социальная мысль этой поры выражалась больше не в научных трактатах, а художественным языком декларативного типа. Важно было не доказать, а убедить, заставить поверить. Сами эти декларации, став государственными документами, затем превращались в культовые тексты, которые до сих пор рассматриваются таким образом. Поэтому американские просветители в революции – это уже социальные романтики, дополняющие свое социальное творчество яркими образами и культовыми произведениями, которые брались за основу принятия решений и действий. Источником аргументации и мотивации чаще были личные примеры и живое художественное слово, чем ученые трактаты. Иначе говоря, духовными предпосылками, толчком к действиям были примеры освободительного движения времен античности или в США (Ж. Лафайет, Т. Пейн и др.) или художественные произведения (Ф. Вольтера, Ф. Шиллера, Ж.-Ж. Руссо, А. Попа и др.). Таким образом, в действительности не выдержали испытания революцией не просвещение, а его иррациональные элементы вместе с их носителями. Просветители, став революционерами, добивались поддержки своих идей не путем научного убеждения, а примером и художественным словом. В революции эстетический фактор действует эффективнее, чем научный. Но как только наступает период преобразования общества, так требуется жесткая рационализация, которая по отношению к обществу во время французской революции носила утопичный характер: как по отношению к прошлому, так и по отношению к будущему.

Поэтому на ход Французской революции, ее характер и результаты оказал воздействие ранний романтизм эпохи просвещения, придав ей иррациональную яркость, религиоз-

ную экзальтированность и личностную радикальность. По сути дела сама революция была результатом руководящей деятельности социальных романтиков, поверившись в возможность одним махом и быстро осчастливить все человечество.

И все же революция потерпела поражение, поэтому обычно отмечается, что романтизм был реакцией на это поражение. Что не вполне справедливо, так как революция потерпела поражение с точки зрения ее идейных вдохновителей, радикальных вождей и их сторонников, но только не тех, кто воспользовался плодами этой революции (третье сословие) или тех, кто иного исхода и не ждал от этой революции (деятели Реставрации). Видимо, утверждение о том, что романтизм с его культом воображения был одним из следствий революции, объясняется чисто логически: раз строгий рационализм, якобы, терпит поражение в действительности, то беспокойная мысль людей, недовольных результатами общественной деятельности, неизбежно начинает метаться в поисках другого пути и способов познания. Но дело в том, что строгого рационализма в Просвещении не было, так как в толковании социальных явлений доминировала иррациональность. Так что метания мысли у вождей и вдохновителей французской революции было не меньше, чем у романтиков. Скорее всего, романтики стремились преодолеть метания мысли, но не достигли этого, поэтому социальная мысль романтиков так и осталась мятущейся. И эти метания мысли объявляются содержанием романтизма. Все это было бы верным, сели бы мы не знали, что романтики выразили себя не только в области социальной мысли, а в особой культуре, духом которой до сих пор держится вся современная культура. Так что социальная мысль, существуя в контексте культуры романтизма, имела ту форму и тот уровень развития, который определялся во многом границами самой этой культуры, очертания которой мы до сих пор очень плохо знаем.

И еще один вывод: романтизм с социокультурной точки зрения имел свои более ранние и глубокие корни, поэтому его появлению в конце XVIII века было переходом романтизма в его морализаторской форме – в форму эстетизированную, с которой связан романтизм в его классической форме. Именно на этой стадии развития романтизма и возникает социология. Наша задача состоит в том, чтобы показать не случайность этого процесса. В следующей статье будет продолжено решение этой задачи.

Библиографический список

1. История уродства / под ред. У. Эко. – М.: Слово, 2007. – 456 с.
2. **Розенкранц, К.** Гармония в карикатуре / К. Розенкранц // <http://www.ec-dejavu.net/c-2/Caricature.html>
3. **Козырьков, В.П.** Социокультурная трансформация эстетизма в становлении информационного общества // Управление в социальных системах. Коммуникативные технологии: тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород 2010. №2. С. 6–16.
4. **Дьяков, А.В.** Жан Бодрийяр: Стратегии радикального мышления / А.В. Дьяков. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2008. – 357 с.
5. **Шестаков, В.П.** Мифология XX века: Критика теории и практики буржуазной «массовой культуры» / В.П. Шестаков. – М.: Искусство, 1988. – 213 с.
6. **Козырьков, В.П.** Генезис эстетизации общества и социологии // Управление в социальных системах. Коммуникативные технологии: тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2010. Т. 81. С. 6–15.
7. **Лифшиц, М.** Собр. Соч.: в 3 т. Т. 1 / М. А. Лифшиц. – М.: Изобразительное искусство, 1984. – 432 с.
8. Стендаль. Собр. соч.: в 15 т. Т. 7. – М.: Изд-во «правда», 1959. – 390 с.
9. **Маньковская, Н.Б.** Постмодернизм в науке. Эстетизация науки / Н.Б. Маньковская // http://www.i-u.ru/biblio/archive/mankovskaja_estetika/05.aspx
10. **Глазычев, В.Л.** Гемма Коперника. Мир науки в изобразительном искусстве / В.Л. Глазычев. – М.: Советский художник, 1989. – 416 с.
11. **Гулыга, А.В.** Немецкая классическая философия / А.В. Гулыга. – М.: Мысль, 1986. – 166 с.
12. http://ru.wikipedia.org/wiki/Гумбольдт,_Вильгельм.

13. Гумбольдт, В., фон. О духе, присущем человеческому роду / В. фон Гумбольдт // Гумбольдт В., фон. Язык и философия культуры. СПб.: С.-ПбГПУ им. А.И. Герцена, 2000. – 450 с.
14. Ильенков, Э.В. О воображении / Э.В. Ильенков // <http://caute.net.ru/ilyenkov/texts/imaginat.html>
15. Плеханов, Г.В. К вопросу о развитии монистического взгляда на историю // Плеханов Г.В. Избр. филос. произв.: в 5 т. Т. 1. – М.: Политиздат, 1956. – 730 с.
16. Плеханов, Г.В. Очерки по истории материализма / Г.В. Плеханов // Плеханов Г.В. Избр. филос. произв.: в 5 т. Т. 2. – М.: Политиздат, 1956. – 194 с.
17. Ладыгин, М.Б. Предромантизм в мировой литературе / М.Б. Ладыгин. – М.: НОУ Полярная звезда, 2000. – 74 с.
18. Соловьева, Н.А. История зарубежной литературы. Предромантизм / Н.А. Соловьева. – М.: Academia, 2005. – 272 с.
19. Луков, В.А. Предромантизм / В.А. Луков. – М.: Наука, 2006. – 683 с.
20. Руссо, Ж.Ж. Рассуждение, получившее премию Дижонской академии в 1760 году по вопросу, предложенному этой же академией: «Способствовало ли возрождение наук и искусств очищению нравов?» Ж.Ж. Руссо // <http://www.kursach.com/biblio/0001009/000.htm>
21. Дешан, Л.-М. Истина, или Истинная система / Л.-М. Дешан. – М.: Мысль, 1973. – 532 с.
22. Кривцун, О.А. Эстетика / О.А. Кривцун // <http://www.deol.ru/users/krivtsun/aest6.htm>
23. Карлейль, Т. История французской революции / Т. Карлейль. – М.: Мысль, 1991. – 575 с.
24. Шиллер, Ф. Письма об эстетическом воспитании человека / Ф. Шиллер // <http://vpn.int.ru/files-view-3549.html>
25. Сад М. де. Сто дней содома / Маркиз де Сад // <http://lib.ru/INOOLD/DESAD/120dnej.txt>
26. Асмус В.Ф. Шиллер об отчуждении в культуре XVIII в. // Асмус В.Ф. Историко-философские этюды. М.: Мысль, 1984. – 182 с.
27. Лукач, Д. Молодой Гегель и проблемы капиталистического общества. – М.: Наука, 1987. – 615 с.
28. Фейербах, Л. Избр. филос. произв.: в 2 т. Т. 2. – М.: Политиздат, 1955. – 935 с.
29. Далин, В.М. Историки Франции XIX–XX веков / В.М. Далин. – М.: Наука, 1981. – 327 с.
30. Аникст, А.А. О жизни и творчестве Жермены де Сталь / А.А. Аникст // Сталь Ж. де. О литературе, рассмотренной в связи с общественными установлениями. – М.: Искусство, 1989. – 476 с.

*Дата поступления
в редакцию 28.06.2011*

V.P. Kozirkov

**AESTHETICISM AS A FACTOR IN FORMATION AND DEVELOPMENT
OF SOCIOLOGY: ROMANTICISM AS ASOCIOCULTURAL SPACE
FORMATION OF SOCIOLOGY**

Traced the inner interaction of the process of public relations and aesthetic development of sociology in the context of the development of spiritual culture.

Key words: aestheticism, SOCIOLOGY, romanticism, social and cultural analysis, aesthetic quality, the types of social rationality.

УДК 378.1: 15 9.9

Т.Г. Мухина

**МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Алексеева

Предлагается анализ опыта международного сотрудничества в области дополнительного высшего профессионального образования. Определены приоритетные направления европейских и международных программ в области профессионального образования. Выявлены основные тенденции дополнительного высшего образования в процессе реализации международных проектов подготовки преподавателей.

Ключевые слова: дополнительное высшее профессиональное образование, международное сотрудничество, международные образовательные программы.

Международное сотрудничество является одним из ключевых направлений государственной политики в высшем и дополнительном профессиональном образовании, науке. Данная стратегия закреплена в соответствующих законодательных документах и нормативных актах. Основные концептуальные положения по проблемам современного высшего и дополнительного профессионального образования были обозначены на Всемирной конференции ЮНЕСКО "Высшее образование в XXI веке: подходы и практические меры" (г. Париж 09 октября 1998 г.). Итогом конференции стало провозглашение «Всемирной декларации о высшем образовании для XXI века: подходы и практические меры» [1].

Высшее образование, история которого насчитывает несколько столетий, убедительно продемонстрировало свою жизнеспособность и свою способность к изменениям, к содействию преобразованиям и прогрессу в обществе. Масштабность и темпы преобразований таковы, что общество все больше зиждется на знаниях, так что высшее образование и научные исследования в настоящее время выступают в качестве важнейших компонентов культурного, социально-экономического и экологически устойчивого развития человека, сообществ и наций. В связи с этим перед самым высшим образованием встают грандиозные задачи, требующие его самого радикального преобразования и обновления, подвергать которым его еще никогда не приходилось, с тем чтобы наше общество, которое ныне переживает глубокий кризис ценностей, могло выйти за рамки чисто экономических соображений и воспринять более глубокие аспекты нравственности и духовности [1].

Впервые на конференции были сформулированы новые подходы и «рамки приоритетных действий, направленных на реформу и развитие высшего образования», в том числе и дополнительного профессионального образования, приобретающие активное развитие в настоящее время. В частности: приоритетными мерами на национальном уровне объявлены: 1) укрепление связей между высшим образованием и научными исследованиями; 2) использовать высшее образование в качестве катализатора всей системы образования; 3) высшие учебные заведения следует рассматривать в качестве составной части системы образования, начинающейся с дошкольного воспитания и начального образования и продолжающейся на протяжении всей жизни; 4) сами высшие учебные заведения должны вести в своих стенах соответствующую работу, чтобы быть компонентом этой системы и содействовать ее развитию. Учебные заведения должны располагать потенциалом обеспечения широкого многообразия возможностей в сфере образования и подготовки кадров, таких как традиционные степени, краткосрочные курсы, обучение в течение неполного дня, гибкое расписание, модульные курсы, дистанционное обучение с соответствующей поддержкой и т. д. [1].

Особый статус отводится политике в области дополнительного высшего профессио-

нального образования, обеспечивающей установление новых партнерских отношений и участие всех соответствующих партнеров в деятельности, касающейся всех аспектов высшего образования: процесса оценки, включая обновление учебных планов и программ, повышения педагогической квалификации, обеспечения профессиональной ориентации и консультирования. Приоритетным направлением является создание соответствующей структуры и механизмов, программ, обеспечивающих повышение квалификации преподавательского персонала; поскольку образование на протяжении всей жизни требует от профессорско-преподавательского состава обновления и совершенствования своего педагогического мастерства и методов обучения в гораздо большей степени, нежели при нынешних системах, рассчитанных главным образом на короткие периоды преподавания в высшей школе. В связи с этим необходимо содействовать и благоприятствовать национальной и международной мобильности профессорско-преподавательского состава и студентов в качестве одного из необходимых условий обеспечения высокого качества и адекватности высшего образования [1].

Обозначенные положения, на наш взгляд, являются ключевыми в осмыслении современных позиций и реформ в области высшего и дополнительного образования. Международное сотрудничество следует рассматривать в качестве неотъемлемой составной части задач, стоящих перед учреждениями и системами высшего образования. Каждому высшему учебному заведению следует предусмотреть создание соответствующей структуры или механизма для содействия развитию международного сотрудничества и управления им.

В частности, в настоящее время можно выделить три основных блока в международной деятельности Министерства образования: многостороннее сотрудничество и взаимодействие с ведущими международными организациями (экономического, научно-технического и образовательного профиля), 2) двустороннее сотрудничество со странами дальнего зарубежья; 3) сотрудничество с государствами - участниками СНГ [2].

Изучение нормативных документов, дополнительных образовательных программ, опыта работы в области профессионального образования позволило констатировать факт, что в настоящее время можно наблюдать период становления этапа международного сотрудничества в области дополнительного высшего образования. Все программы, а точнее подпрограммы или специальные программы в области высшего дополнительного образования функционируют в составе более крупных проектов. Обобщая опыт научных исследований современных зарубежных и отечественных ученых – можно выделить следующие основные тенденции в организации сотрудничества:

1. В силу исторических особенностей развития северо-западный и центральный регионы всегда имели предпочтительную ориентацию на европейскую культуру и европейскую систему образования. В качестве иллюстрации такого опыта можно привести пример Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов (СПбГУЭФ) и его партнерства с французскими университетами в сфере экономики и управления (например, Университет Париж-Дофин и Университет им. Пьера Мендес Франса (УПМФ) г. Гренобля). Университет является инициатором и участником международных проектов по подготовке специалистов, имеет партнерские отношения с 80 зарубежными вузами [3]. Для проведения занятий привлекаются французские и российские преподаватели, владеющие иностранным языком. Снимается проблема языкового барьера, так как в процессе обучения широко используется французский язык. Ученые, реализующие данную программу к ее достоинствам относят и установление сотрудничества между преподавателями специальных кафедр по основным направлениям совместной работы в преподавании учебных дисциплин, совместном руководстве аспирантами и докторантами, научно-исследовательской работе. В качестве перспектив развития Французской программы по экономике и управлению определены: формирование компетенций выпускаемых дисциплин, компетенций преподавателей, увеличение числа франкоговорящих студентов из других стран (в том числе из Франции, Канады и т.д.); повышении мобильности студентов и преподавателей; привлечение вузов-партнеров из других стран и введение в программу курсов на английском языке [3].

Зарубежные – Борганс Лекс [4], Кёрверс Фрэнк [4] др. – и отечественные – (Е.В. Бодрова, [5]. Г.У. Матушанский [6] – ученые фиксируют изменения в структуре науки и высшего образования в Европе в связи с международной ориентацией, обосновывают интеграцию европейской и российской моделей обучения с британо-американской моделью подготовки высококвалифицированных кадров, научно-педагогических работников. По мнению Борганс Лекс, Кёрверса Фрэнка: « ярче всего международная ориентация науки и образования проявляется в изменении языка, используемого в преподавании и научных публикациях, – с родного (государственного), латыни, немецкого и французского на английский. Небольшие языковые зоны совершили этот переход раньше. Кроме того, отдельные области науки различались по скорости перехода на английский в научной коммуникации. Точные науки и медицина переключились на английский язык первыми, за ними последовали экономика и общественные науки, а в гуманитарных науках и в области права в настоящее время наблюдаются лишь первые признаки такого перехода. Это означает, что отдача от масштаба и возможность распространения научных результатов оказывают большое влияние на принятие решения о переходе на международные стандарты» [4–6].

Вместе с тем, Дальневосточный федеральный и Сибирский округа успешно в течение многих лет сотрудничают в области высшего профессионального образования с Китайской народной республикой, Канадой и США. Так, Тихоокеанский государственный университет уже более 20 лет сотрудничает с Китайской Народной Республикой по направлениям: наука, архитектура, сельское хозяйство. Сотрудничество осуществляется в рамках международного проекта «Форумы ректоров вузов Востока России и Северо-Восточных провинций КНР», объединяющих вузы-партнеры из соседних регионов России и Китая [7].

В условиях глобализации на мировом рынке образовательных услуг конкурентоспособными являются крупные университеты с численностью студентов до 100–200 тысяч. Это связано с тем, что на данном рынке в условиях жесткой конкуренции, как и на любом другом глобальном рынке, происходят процессы поглощения и слияния. А значит, ведущим стратегическим направлением развития университетов в условиях глобализации является необходимость активной конкуренции на рынках абитуриентов развивающихся стран. Для этого крупные университеты должны создавать свои представительства в этих государствах, которые могут заниматься не только отбором, но и предварительной подготовкой будущих студентов. Данная стратегия становится очень актуальной в условиях предстоящего дефицита своих абитуриентов; В связи с этим международный опыт, в том числе и по программам дополнительного высшего образования, должен осуществляться в соответствии с вхождением России в Европейский статус университетов, т.е. развитые страны, а также альянсы с развивающимися странами Азии – Китай, Индия и т.д. [8].

Повышение качества образования предполагает реализацию новых образовательных технологий, изменение системы подготовки и переподготовки специалистов высшей квалификации; ориентация на принципы непрерывного образования, которая предполагает как внедрение новых педагогических технологий, так и поиск новых способов предоставления образовательных услуг, учитывающих потребности выпускников средних школ и студентов (дистанционное образование, компьютерные обучающие программы, использование сети Интернет-технологий и др.) [9, 10]. Рассматриваемые тенденции сотрудничества в области высшего и дополнительного образования стратегии должна сочетаться с политикой мобильности профессорско-преподавательского состава, активного привлечения иностранных преподавателей и ученых в сфере дополнительного профессионального образования.

Описанные тенденции в системе образования проявляются в содержании международных дополнительных образовательных программ. Принято выделять европейские и национальные, а также международные группы программ. Ведущими европейскими и национальными программами являются: «Седьмая рамочная программа научно-технологического развития» (7РП) (The Seventh EU Framework Programme for Research and Technological Development (FP7). Напомним, что рамочные программы – основной финансо-

вый инструмент Европейского Союза (ЕС) для поддержки и развития научных исследований и технологических разработок в странах ЕС. Источником финансирования является бюджет ЕС. Реализуются с 1984 г. пятилетними циклами. В соответствии с целями седьмой рамочной программы выделены четыре специальные программы, одна из которых «FP7 «PEOPLE»: направлена на количественное и качественное укрепление кадрового потенциала европейской науки и технологий через серию акций Мари Кюри. Соответственно поддержка академической мобильности и карьерного роста ученых, усиление привлекательности Европы как исследовательского центра для ученых всего мира, подготовка профессорско-преподавательского состава является приоритетной задачей данного проекта [11].

Программа Tempus финансирует межуниверситетское сотрудничество в области развития учебных планов, управления университетами, взаимодействия научных кругов и гражданского общества, а также структурные реформы в области высшего образования. Мобильность студентов, преподавательского и административного состава вузов как из стран – членов ЕС, так и из стран-партнеров может стать частью проекта в рамках программы Tempus. Целями программы является развитие сети центров европейских исследований в российских вузах-партнерах, повышение квалификации преподавательского состава, а также разработка учебных курсов, связанных с вопросами различных сфер европейской политики в области международного сотрудничества [12]. Успешно функционируют программы с конкретными вузами - партнерами, на базе которых открываются филиалы в России. Например, в рамках реализации проекта международного сотрудничества с Германским историческим институтом в Москве (German historical institute in Moscow) осуществляется повышение квалификации университетских преподавателей и выпускников вуза, изучающих вопросы новой и новейшей истории Германии [12]. Предполагаем, что такая форма сотрудничества наиболее перспективна в ближайшее время для развития проектов дополнительной профессиональной подготовки преподавателей и студентов.

Основная цель Федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы" (ФЦП) Federal Target Programme «Research and Development in Priority Fields of S&T Complex of Russia for 2007–2012» – развитие научно-технологического потенциала Российской Федерации в целях реализации приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Основные задачи программы: обеспечение ускоренного развития научно-технологического потенциала по приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации в соответствии с перечнем критических технологий Российской Федерации; реализация приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации на основе крупных проектов коммерциализации технологий; консолидация и концентрация ресурсов на перспективных научно-технологических направлениях на основе расширения применения механизмов государственно-частного партнерства, в том числе путем стимулирования заказов частного бизнеса и инновационно-активных компаний на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы; обеспечение притока молодых специалистов в сферу исследований и разработок, развитие ведущих научных школ; развитие исследовательской деятельности в высших учебных заведениях и др.

Среди международных программ выделим Консорциум экономических исследований и образования Economics Education & Research Consortium. Консорциум экономических исследований и образования был создан в 1996 году для повышения стандартов обучения и поддержки прикладных исследований в области экономики. Научная сеть Консорциума предлагая молодым ученым финансовую поддержку, доступ к необходимым данным и научной литературе, обширные возможности для повышения квалификации и общения с признанными специалистами [13].

Австрийская служба по обменов Austrian Exchange Service, Agency for International Cooperation in Education and Research. Австрийская служба обменов – крупнейшая организа-

ция Австрии в сфере международного сотрудничества. Австрийская служба обменов (АСО) была основана в 1961 г. на основе совместного решения австрийских университетов. С 2000 г. АСО включает не только университеты, но и другие высшие учебные заведения, а также школы Австрии. АСО имеет статус некоммерческой организации. Органы управления АСО включают Генеральную Ассамблею, Президиум и Президента. Она вносит значительный вклад в развитие образовательного и научного потенциала Австрии и представляет образовательную систему Австрии на международном уровне. Главной целью организации является научный и образовательный обмен. В число основных задач организации входят содействие международному научному и культурному обмену, интеграционным процессам в области образования, академической мобильности студентов и преподавателей [13].

В целом, характеризуя целевой и содержательный аспект европейских, национальных, международных программ в области дополнительного профессионального образования профессорско-преподавательского состава отметим, что ведущим направлением является в подготовке профессионально компетентного, творческого, стремящегося к самостоятельной инновационной деятельности учителя (преподавателя). С точки зрения концептуальных подходов к обучению на курсах повышения квалификации выделяют: технократическая педагогика повышения квалификации (обучение рассматривается как более или менее жесткое императивное руководство учителями, формированием заданных обществом и государством свойств личности и форм поведения); персонологическая (личностно-ориентированная) школа повышения квалификации (обучение как целенаправленный непрерывный процесс личностных и профессиональных изменений, трансформаций учителя в ходе совместной деятельности и межличностного общения); третье направление- социально-психологической (обучение рассматривают в русле идей социальной коммуникации, т.е. как процесс социально-психологического взаимодействия обучающего и обучаемого, направленного на изменение среды) [14].

Изучение целевого, содержательного и организационного компонентов представленных выше программ (с учетом регионального компонента) по проблемам высшего дополнительного профессионального образования позволяет сделать вывод, что благодаря международному опыту, приобретенному высшими образовательными учреждениями в ходе реализации совместных образовательных, в том числе и дополнительных программ, успешно решается задача интеграции российского образования в единое европейское образовательное пространство. Перспективным международным опытом является создание альянсов с развивающимися странами Азии – Китай, Индия и т.д.

На современном этапе реформирования профессионального образования большее внимание уделяется стажировке и повышению квалификации студентов и магистрантов. Набирает обороты и дополнительная подготовка профессорско-преподавательского состава вузов, однако данное направление становится перспективным в тех вузах и регионах, где представлен мощный научно-технический потенциал.

Библиографический список

1. Декларация организации объединенных наций по вопросам образования, науки и культуры от 09.10.1998г. № 6/н «Всемирная декларация о высшем образовании для XXI века: подходы и практические меры» [Электронный ресурс] / Федеральное государственное учреждение «Федеральный центр образовательного законодательства». – Режим доступа: <http://www.lexed.ru>
2. Выступление Директора Департамента международного сотрудничества в образовании и науке В.В. Ничкова на заседании коллегии 13.04.2005 года "О международной деятельности в области образования и науки в 2005 году"[Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://dic.edu.ru>
3. Россия и Европа на пути интеграции в единое образовательное пространство: опыт международных образовательных программ: сб. материалов межвузовского семинара, Санкт-Петербург, 5 ноября 2004 г. / под ред. И.Д. Демидовой, В.Н. Мининой. – СПб.: Борей Арт, 2007. – 173 с.

4. **Борганс, Лекс.** Американизация европейского высшего образования и науки: [пер. с англ.] / Борганс Лекс, Кёрверс Фрэнк // Вопросы образования. 2010. № 2. С. 5–43.
5. **Бодрова, Е.В.** Высшее образование для XXI века (Ответы эксперта на заданные вопросы) / Е.В. Бодрова [и др.] // Alma mater: Вестник высшей школы. 2009. № 3. С. 25.
6. **Матушанский, Г.** Модели подготовки научно-педагогических и инженерных кадров в зарубежной высшей школе // Alma mater. – М., 2002. № 2. С. 42–43.
7. Вузовская инноватика и международное партнерство: Российско-Китайский опыт взаимодействия/Выступление ректора ТОГУ профессора С. Иванченко на VIII Международном форуме ректоров университетов Дальнего Востока и Сибири Российской Федерации и Северо-восточных провинций Китайской Народной Республики Далянь, сентябрь 2009 года //Пресс-центр Тихоокеанского государственного университета [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://press.khstu.ru/rector-interview>
8. **Карпенко, М.** Новая роль высшего образования в эпоху развития инновационной экономики, глобализации и депопуляции //Alma mater (Вестник высшей школы). 2007. № 9. С. 12–17.
9. **Московкин, В.М.** Университетские стратегии в условиях глобализации и депопуляции //Alma mater (Вестник высшей школы). 2009. № 11. С. 29–32.
10. Крухмалева. Некоторые аспекты вхождения российского образования в мировое образовательное пространство, Альма матер, 2008. №11. С. 75.
11. **Баденкова, Ю. А.** Седьмая рамочная программа научно-технологического развития Европейского союза// Бюллетень «НГТУ Информ». 2006. №10 (158). С. 42.
12. Программа ТЕМПУС-ТАСИС завершает свою работу // Бюллетень «НГТУ Информ». 2006. №5 (153).
13. Европейские и российские программы, фонды и организации научно-технологического сотрудничества[Электронный ресурс] / Режим доступа: // <http://www.sgu.ru/node/30331>
14. **Гаргай, В.Б.** Развитие системы повышения квалификации учителей в Великобритании (конец XIX – конец XX вв.): дисс. ... д-ра пед. наук: 13.00.01 / Гаргай В.Б. – Новосибирск, 2006. – 446 с.

*Дата поступления
в редакцию 28. 06.2011*

T.G. Mukhina

THE INTERNATIONAL COOPERATION IN THE FIELD OF ADDITIONAL HIGHER VOCATIONAL TRAINING

In article the analysis of experience of the international cooperation in the field of additional higher vocational training is offered. Priority directions of the European and international programs in the field of vocational training are defined. The basic tendencies of additional higher education in the course of realisation of the international projects of preparation of teachers are revealed.

Key words: additional higher vocational training, the international cooperation, the international educational programs.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Д. Вавилов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОСИСТЕМНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ОТРАБОТКОЙ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексева

Разработан интегральный компенсационный акселерометр с электростатической отрицательной обратной связью. Получены расчетные соотношения для микромеханической и электрической частей. Приведена программа оптимизации параметров акселерометра по переходному процессу.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы (МЭМС), критерий оптимальности, линеаризация характеристики, электростатический преобразователь силы.

Электростатическая отрицательная обратная связь может эффективно применяться как для линейных, так и для угловых акселерометров [1]. При этом тип ЧЭ может быть осевым или маятниковым, а упругий подвес может быть выполнен для работы на изгиб или кручение.

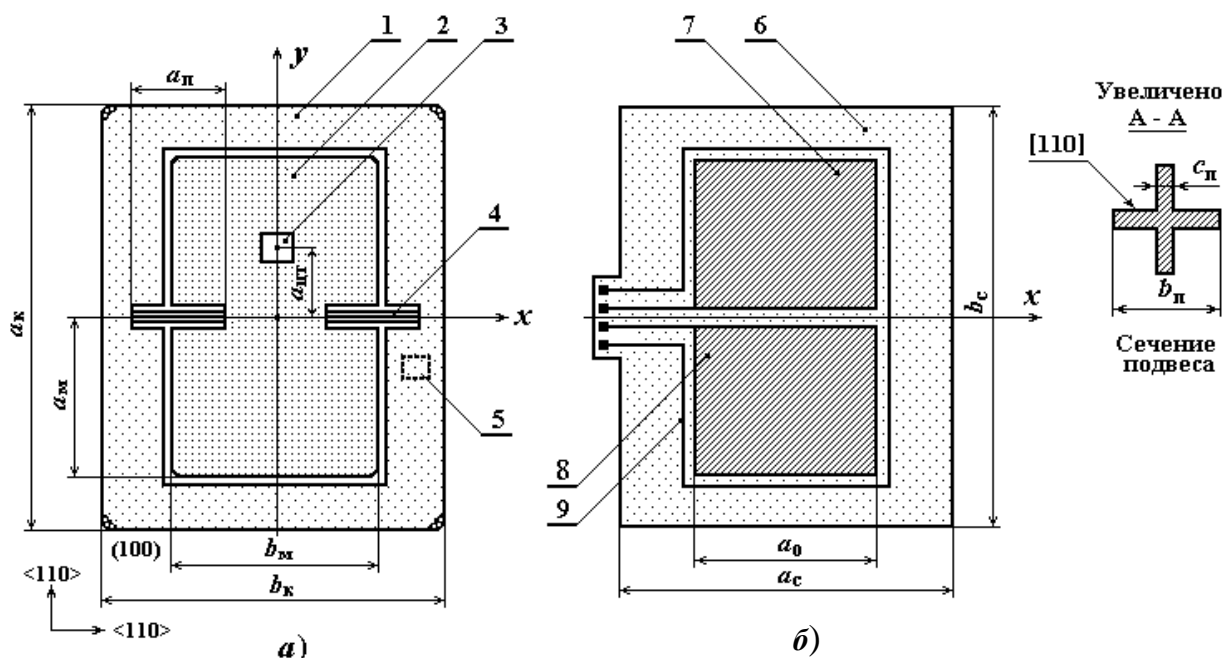


Рис. 1. Подвижный узел (а): 1 - корпусная кремниевая пластина; 2 - чувствительная масса (маятник), 3 - участок разбаланса массы маятника; 4 - упругий торсион; **Неподвижная пластина(б):** 5 - датчик температуры; 6 - стеклянная обкладка; 7 - неподвижный электрод датчика перемещений; 8 - неподвижный электрод силового датчика; 9 - охранный контур

Электростатические преобразователи силы (момента) обладают многими положительными свойствами, которых нет у других типов силовых преобразователей. Например, малые габаритные размеры и масса, повышенная точность преобразования и большая удельная сила делают силовые электростатические преобразователи силы вне всякой конкуренции.

Рассмотрим пример построения маятникового акселерометра, предназначенного для измерения линейных ускорений с использованием электростатического преобразователя момента. На рис. 1 приведены детали ЧЭ, состоящего из кремниевой корпусной пластины 1, в которой выполнен методом анизотропного травления проводящий маятник 2, Маятник является несимметричным относительно оси качания (оси x) за счет выполнения сквозного отверстия 3 в одной из его частей. Отверстие является разбалансом, посредством выбора его размеров задают диапазон измерений.

С корпусной пластиной маятник представляет единое целое и соединены между собой упругими подвесами-торсионами 4, которые в поперечном сечении представляют симметричный крест и работают на кручение. Проводящая корпусная пластина и соответственно выполненные в ней маятник соединены с общей шиной питания (землей). После размерного травления маятника поверхность его подвергают химической полировке и окислению с целью изоляции внешней поверхности от проводящего тела. На внешней поверхности маятника отсутствуют, какие либо надстройки или проводники соединений с другими узлами акселерометра. Все связи выполнены беспроводными.

На рис. 1, б приведена одна из стеклянных обкладок 5, на которой выполнены неподвижные электроды 6 емкостного преобразователя перемещений и неподвижные электроды 7 электростатического преобразователя момента. Между подвижным проводящим электродом, которым является маятник и неподвижными электродами образован зазор h . Неподвижные электроды выполнены на стеклянной обкладке 5 посредством металлизации и соединены с помощью контактных площадок и проводящих дорожек с электрической схемой акселерометра.

Одним из недостатков электростатического преобразователя момента является нелинейность его характеристики по напряжению. Соответственно разработан линеаризатор (рис. 2) с использованием резистивного сумматора и опорных напряжений.

Реализация демпфирования подвижного узла в компенсационном акселерометре с электромагнитной силовой обработкой возможна как с заполнением ЧЭ газом, например сухим азотом, так и в электрическом контуре для случая вакуумирования чувствительного элемента.

Работа акселерометра с электростатической силовой обработкой осуществляется следующим образом. В нейтральном состоянии маятник 2 находится в среднем положении между неподвижными электродами 7 емкостного датчика перемещений. На выходе устройства сигнал равен нулю. Поскольку электроды обработки питаются выходным напряжением, сила электростатического преобразователя равна нулю и никакого влияния на маятник 2 не происходит.

При действии ускорения возникает сила инерции, создающая момент, который отклоняет маятник. Этот момент определяется произведением силы инерции на плечо небаланса:

$$M_{ин} = m_{неб} a_{цт} j, \quad (1)$$

$m_{неб}$ - массы небаланса 3 (на рис. 1 это сквозное отверстие); j - действующее ускорение.

Угол отклонения маятника является пропорциональным действующему ускорению. Соответственно выходной сигнал является также пропорциональным углу отклонения маятника и поступает на проводники обработки 7. Возникающая электростатическая сила $F_{эл}$ имеет противоположное направление, по сравнению с направлением силы инерции, и определяется в следующем виде:

$$M_{эл} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U_{оп} U_{вых} F a_{цт}}{h^2}, \quad (2)$$

$\varepsilon_0 = 8.85418782e-12$ Кл/(В·м) - диэлектрическая постоянная; ε - относительная диэлектрическая проницаемость для материала находящегося между электродами; $U_{оп}$ - опорное напряжение; F - площадь электрода; $a_{цт}$ - длина маятника от центра тяжести до оси качения.

Сила электростатического преобразователя задается нагрузочным резистором и напряжением источника опорного напряжения, которое в основном влияет на точность задаваемого тока. Поскольку сила тока в подвижном проводнике является величиной постоянной $I = U_{оп}/R_H = const$, то этим осуществлена линеаризация выходной характеристики акселерометра. Сила тока во втором проводнике задается нагрузочным резистором и выходным напряжением. Величина ускорения, которое может отработать устройство с электростатическим датчиком момента, определяется следующим соотношением:

$$j = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U_{оп} U_{вых} F a_{цт}}{m_{неб} h^2}. \quad (3)$$

При конструктивных размерах $a_M = b_M = 2,5...4 \cdot 10^{-3}$ м, $c_M = 2...4 \cdot 10^{-4}$ м, для диапазона 100 г требуется выполнить зазор между электродами порядка $h = 10 \cdot 10^{-6}$ м, что вполне приемлемо для реализации при современном технологическом уровне. Вторые концы всех электродов на маятнике должны быть соединены с проводящим телом маятника и подключены к общему контакту источников опорного напряжения.

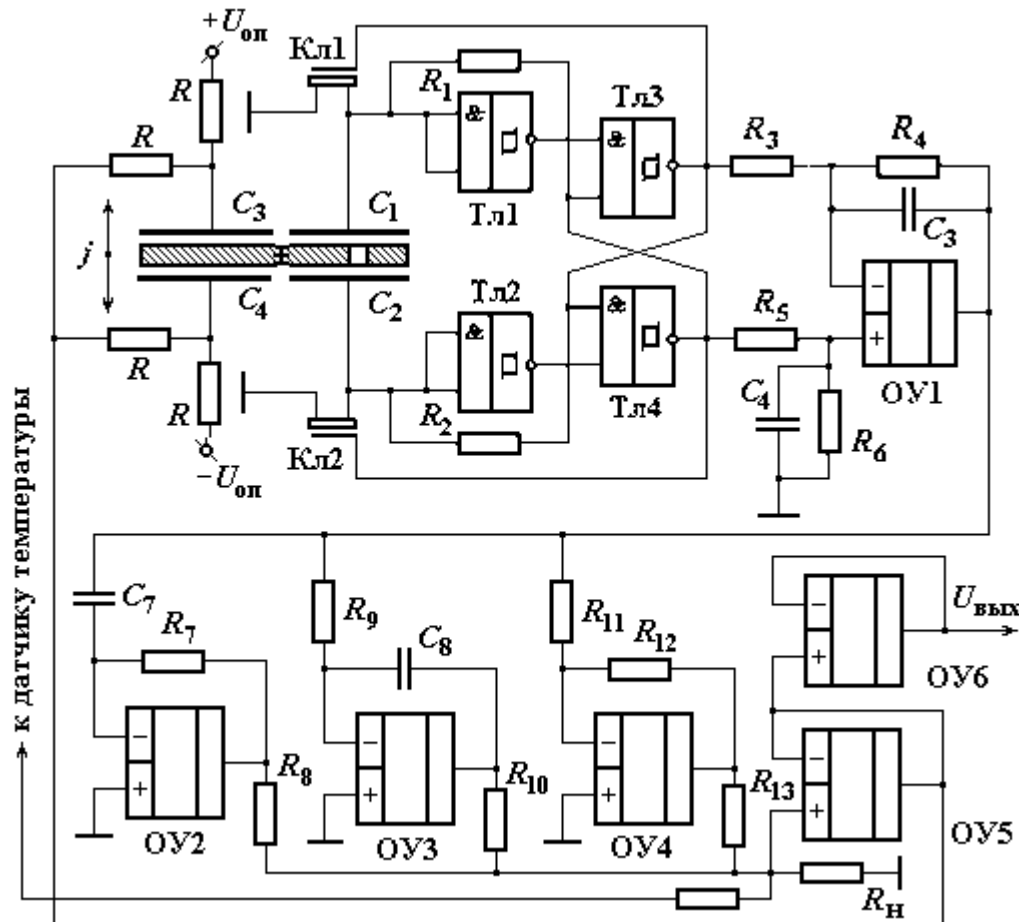


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема акселерометра

Электрод 8, размещенный вдоль всех кромок стеклянной крышки, является охраняемым. Маятник линейного акселерометра отличается от маятника углового акселерометра наличием разбаланса, выполненного в виде локального сквозного травления или применения дополнительных пластин на одном из плеч маятника. Вторая стеклянная крышка, расположенная с другой стороны кремниевой пластины, является аналогичной первой.

Передаточная функция подвижного узла, а также математические соотношения для расчета ее коэффициентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Функциональное звено	Передаточная функция	Параметры
Чувствительный элемент	$K_{чэ} = m_0 a_{цг}$	$m_0 = \gamma_m a_0 b_0 c_0$
Момент инерции маятника	$J_x = m(4a_m^2/3 + c_m^2/12) - m_0(a_0^2/3 + c_0^2/12 + a_{цг}^2)$	$m = \gamma_m a_m b_m c_m$
Подвижный узел	$W_{пу}(s) = 1 / \left(J_x s^2 + K_{ду} s + G_{кр} \right)$	
Коэффициент демпфирования	$K_{ду} = \mu a_m^6 / (4h^3)$	μ - вязкость газа
Механическая жесткость подвеса	$G_{кр} = \frac{E_{[100]} b_{п} c_{п}^3}{96(1 + \gamma) a_{п}}$	$G_{кр}$ - жесткость на кручение
Датчик перемещений и электронный блок	$W_{yc} = \frac{U_{оп} a_{цг} K_{yc}}{h(1 + \tau_s)}$	$U_{оп} = U_{ст}$ $K_{yc} = R_4/R_3 = R_5/R_6$
Корректирующее устройство	$W_{кор}(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s + \frac{1}{\alpha_3 s}$	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - параметры корректирующего устройства
Датчик момента	$K_{ос} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U_{оп} F a_{цг}}{h^2}$	$\varepsilon = 1$ - относительная диэлектрическая проницаемость азота
Идеальный оператор	$H(s)$	$e(t)$ - погрешность акселерометра

Электрическая схема акселерометра (рис. 2) включает в свой состав следующие узлы: подвижные и неподвижные электроды емкостного преобразователя перемещений с повторителем (ОУ1); электрические цепи корректирующего устройства; усилитель мощности, он же апериодический фильтр нижних частот; силовые электроды обратной связи (C_3 и C_4); резисторы нагрузки R_n и источники опорного напряжения ($\pm U_{оп}$). В схеме применен встроенный датчик температуры. Принципиально схема электростатического акселерометра идентична с магнитоэлектрическим. Вся разница этих двух акселерометров в физической основе и параметрах их звеньев обратной связи.

Известно, что для маятникового акселерометра, наиболее эффективным корректирующим устройством является устройство по принципу ПИД-регулятора [2]. И тогда передаточная функция корректирующего устройства может быть записана в следующем виде:

$$W_{кор}(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s + \frac{1}{\alpha_3 s}, \quad (4)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - постоянные времени звеньев: пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего. Алгоритм и компьютерная программа расчета постоянных времени ПИД-

регулятора посредством оптимизации переходного процесса приведены в приложении. Структурная схема датчика с ПИД-регулятором не зависит от типа звена обратной связи и для всех компенсационных акселерометров приведена на рис. 3.

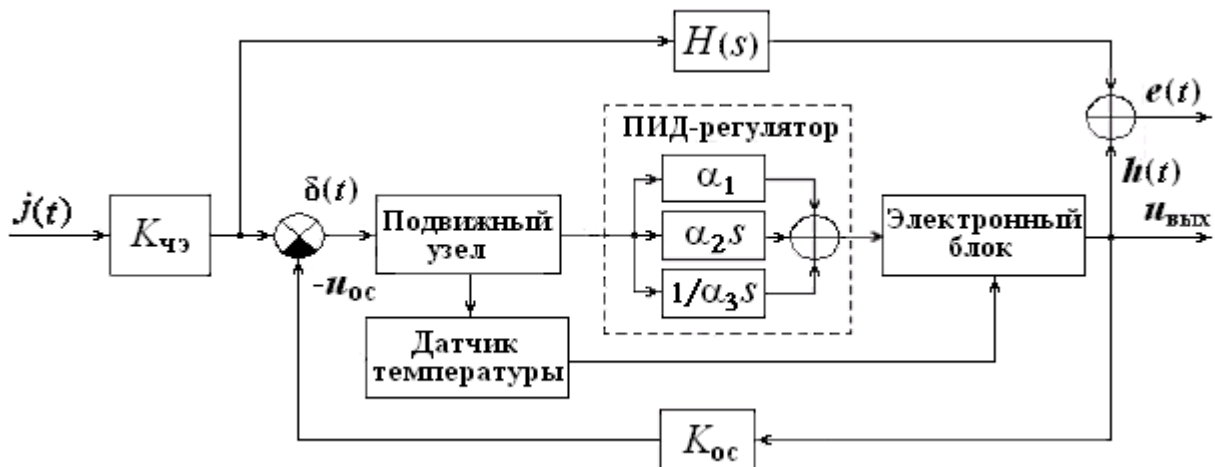


Рис. 3. Структурная схема датчика с ПИД регулятором

Измеряемая величина при наличии ПИД-регулятора будет отработана пропорциональной составляющей обратной связи, а ошибка стабилизируется на значении, близком к нулю. Выходной же сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая регулятора. Дифференциальная составляющая противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, которые могут произойти в будущем. Эти отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему. Чем быстрее регулируемая величина отклоняется от измеряемого значения, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей. Математические описания узлов электрической схемы, а также формулы для расчетов параметров приведены в табл. 1.

Пользуясь структурной схемой и типовой методикой описания управляемых технических систем с отрицательной обратной связью, полную передаточную функцию акселерометра в замкнутом контуре, с учетом передаточных функций отдельных звеньев и принципиальной электрической схемы (рис. 2) можно получить в следующем виде:

$$W_{\text{акс}}(s) = \frac{K(\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0)}{\alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}, \quad (5)$$

где

$$K = K_{\text{чз}} K_{\text{мп}} K_{\text{yc}}, \alpha_4 = J\tau; \alpha_3 = K_{\text{дy}} T\tau + J\tau; \alpha_2 = GT\tau + K_{\text{дy}} T + \alpha_0 T^2; \\ \alpha_1 = (G_y + \alpha_0) T; \alpha_0 = K_{\text{ос}} K_{\text{мп}} K_{\text{yc}}; \beta_2 = T^2; \beta_1 = T, \beta_0 = 1.$$

Таким образом, с учетом соотношений для параметров полная передаточная функция компенсационного акселерометра с электростатической обратной связью и с ПИД-регулятором в прямой цепи идентична с передаточной функцией акселерометра с магнитоэлектрической обратной связью. Из (5) видно, что все коэффициенты передаточной функции однозначно определяются через конструктивные и физические параметры акселерометра.

Ввиду малости зазоров, требуемых для обеспечения достаточной силы отработки, в варианте с заполнением, как правило, имеет место передемпфирование. При вакуумировании ЧЭ абсолютный коэффициент демпфирования $K_{\text{д}}$ значительно снижается, поскольку в нем остается только гистерезисная составляющая. Физически коэффициент $K_{\text{дy}}$ никогда не равен

нулю, так как в подвесе маятника имеет место внутреннее трение. При этом из (5) следует, что постоянную времени τ необходимо увеличивать.

Приложение. Компьютерная программа для моделирования характеристик микро-стемного акселерометра с электростатической обработкой.

```

function [Wopt,K,CKO]=CKO(x,y,z);
% transmission function of the detector element

clc
% Accelerometr with feedback:
% density of silicon
rho=2328;
gamma=0.27
% The module of elasticity of silicon (100)
E100=1.295e11;
% acceleration of gravitation
g=9.80665;
% length and width of a pendulum
am=3.5e-3; bm=3.5e-3; cm=1e-3;
am0=1e-4; bm0=1e-4;
m=rho*am*bm*cm;
m0=rho*am0*bm0*cm;
% length elastic springs
ap=15e-4;
bp=5e-4;
% the maximal and minimal thickness of an
elastic spring
cp=1e-5;
% length of a shoulder of a pendulum
act=am/2;
% viscosity of nitrogen
% mu=17.9e-6;
mu=0;
% weight of a pendulum
% the moment of inertia of a pendulum
J=m*((4*am^2)/3+(cm^2)/12)-m0*((am0^2)/3+
+(cm^2)/12+act^2)
% number of springs
k=2;
% angular rigidity
Gkr=k*E100*bp*cp^3/(96*(1+gamma)*ap)
% Gy=k*(5*(sqrt(3))*E100*cp^4)/(32*(1+gamma)*ap)
h=15e-6;
% axial factor of attenuation
Kd=mu*(am*bm)^2/h^3;
% angular factor of attenuation
Kdy=Kd*act^2;
% factor of transfer of a sensitive element
Kche=m0*act;
% basic voltage
Uop=5;
eps0=8.85418782e-12;

T=(J/Gkr)^(1/2)
tau=0.00000005
x
y
z
b0=x
b1=y
b2=z
a0=N*x
a1=Gkr+N*y
a2=Kdy+Gkr*tau+N*z
a3=J+Kdy*tau
a4=J*tau
% The closed transfer function
W=tf(M*[b2 b1 b0],[a4 a3 a2 a1 a0])
% Not closed transfer function
% R=W/(1-W)
K=dcgain(W)
% damp(W/K)
otn=N/Gkr
% figure(1)
% bode(R/K),grid
% figure(2)
% step(W/K),grid
% figure(3)
% nyquist(R/K),grid
jmax=Koc*Uop/(m0*act*g)
Umax=(Kche*g/Koc)*jmax
polosa=sqrt(Gkr/J)
Wopt=minreal(W);
% вычисление CKO
dt=.00001;
t=[0:dt:2]';
u=1-dirac(t+1e-15);
h=lsim(Wopt/K,u,t);
CKO=dt*sum((h-u).^2)
clear
k=1;
rand('seed',0);
xn=1000; yn=1; zn=0.005;
CKOmax=1e15;
while k<200
x0=xn*(1+rand(1,1));
y0=yn*(1+rand(1,1));
z0=zn*(1+rand(1,1));
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x0,y0,z0);
if CKO<CKOmax

```

```

epsazota=1;
F=am*bm;
%Factor of transfer of a link of a feedback
Koc=2*eps0*epsazota*Uop*F*Xc/(h^2);
%Factor of transfer of a link of a feedback
Koc=2*mi*Uop*act*avit*n/(pi*Rn^2*h)
Kyc=2
%Factor of transfer of the gauge of a corner
Kpp=Uop*Q/h;
M=Kche*Kpp*Kyc
N=Koc*Kpp*Kyc
CKOmax=CKO;
x=x0; y=y0; z=z0;
end
k=k+1;
end
clc
x
y
z
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x,y,z)
step(Wopt/K),grid

```

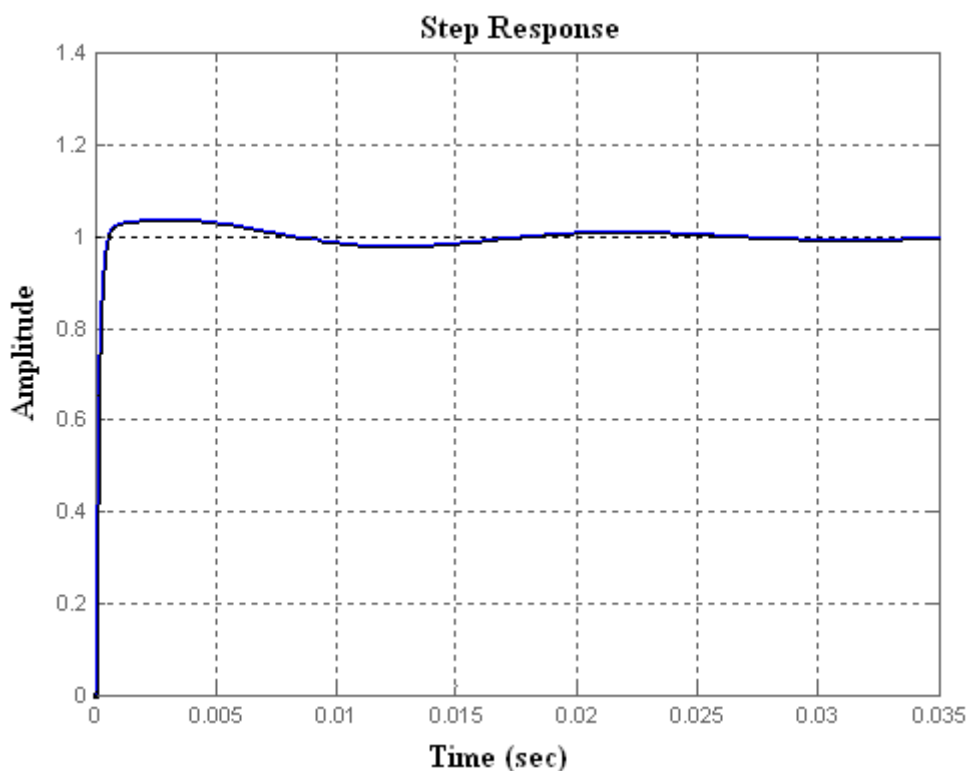


Рис. 4. Переходный процесс микросистемного акселерометра с электростатической обработкой

Оптимизация характеристик микросистемного акселерометра осуществлялась с помощью метода Монте-Карло, заключающегося в переборе случайных вариантов постоянных времени звеньев ПИД-регулятора α_1 , α_2 , α_3 - приближающих искомый переходный процесс к прямоугольной ступеньке [3]. Критерием выбора постоянных времени является минимум СКО.

Выводы

1. Разработана математическая модель и компьютерная программа для моделирования характеристик микросистемного акселерометра с электростатической обработкой.
2. Исследования на модели показали, что электростатические преобразователи силы (момента) обладают многими положительными свойствами, которых нет у других типов силовых преобразователей. Например, малые габаритные размеры и масса, повышенная точ-

ность преобразования и большая удельная сила делают электростатические преобразователи вне всякой конкуренции.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учеб пособие / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород., 2003. – 504 с.
2. **Вавилов, В.Д.** Компьютерное моделирование характеристик микросистемных датчиков: учеб. пособие / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н.Новгород, 2007. – 80 с.
3. **Вавилов, В.Д.** Теоретические основы микросистемных акселерометров и гироскопов: учеб. пособие / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2011. – 204 с.

*Дата поступления
в редакцию 24.06.2011*

V.D. Vavilov

MATHEMATICAL MODEL INTEGRAL AKSELEROMETRE WITH ELECTROMAGNETIC WORKS

It was designed integral compensation accelerometer with electrostatic by negative feedback. Accounting correlations are Received for mikromechanic and electric parts. Broughted program optimums parameter accelerometers on connecting process

Key words: mikroelectromechanic of the system (MEMS), criterion optimums, linearization of the feature, electrostatic converter of power.

УДК 621.398.694

А.В. Корнилов

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВНЫХ СИСТЕМ
ОРИЕНТАЦИИ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКАХ**

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА»

Рассмотрен принцип повышения надежности систем ориентации летательных аппаратов за счет введения устройств обработки аналогового и цифрового сигналов, логического и запоминающего устройств, что позволяет в процессе полета ЛА периодически записывать состояние системы на запоминающее устройство и восстанавливать состояние системы из данных, находящихся в ней, что обеспечивает полную автономность системы.

Ключевые слова: система ориентации, потребителей электропитания 2-й категории, запоминающее устройство.

Обеспечение безопасности полетов является наиглавнейшей задачей современной авиации. В данном направлении предпринимаются всевозможные меры, от улучшения характеристик уже применяемых приборов, до проектирования новейших систем.

Однако печальная статистика авиакатастроф свидетельствует о недостаточной эффективности в решении данной проблемы.

При анализе авиакатастроф обычно выделяют две основные причины: ошибка пилота, членов экипажа или персонала наземных служб (человеческий фактор) и отказ оборудования. Под отказом оборудования понимается любая техническая неисправность летательного аппарата (ЛА), начиная от отказа двигателей и выхода из строя всей системы энергоснабжения (как пример, экстренная посадка ТУ-154М в республике Коми в сентябре 2010), до мелких неисправностей отдельных датчиков и элементов.

Эффективным методом повышения надежности служит резервирование, при котором происходит введение дополнительных частей объекта (блоков, узлов, элементов) по сравнению с минимально необходимыми для выполнения объектом заданных функций при определенных условиях работы.

Системы измерения пространственной ориентации и курса ЛА является первоочередными узлами, чью надежность повышают с помощью резервирования. В связи с этим на борту ЛА различают системы ориентации основного и резервного контуров.

В настоящее время в системах ориентации ЛА применяют электромеханические авиагоризонты и гировертикали. Однако все активнее осуществляется разработка систем на инерциальных датчиках с применением цифровой обработки данных. Они более просты в обращении, многофункциональны, имеют меньшие габариты и массу. Точность применяемых в них датчиков первичной информации на порядок ниже, но с помощью способов программной обработки сигнала и специальных методик калибровки удается добиться необходимых характеристик. Примерам могут служить датчик курса и вертикали ДКВ и интегрированная система резервных приборов ИСПП (рис. 1) производства ОАО АНПП «Темп-авиа». Оба изделия представляют собой инерциальный измерительный комплекс, содержащий датчики первичной информации ДПИ (датчики угловой скорости, датчики линейных ускорений), измерительные оси которых ориентированы по связанным осям объекта, блок вычисления приращений угловой ориентации и скорости для преобразования электрических сигналов ДПИ в цифровые значения приращений угловой ориентации и скорости ЛА по трем осям, датчик магнитного поля Земли для получения измерений вектора магнитного поля

Земли и вычислитель, на который поступают обработанные цифровые данные со всех датчиков для получения данных о движении ЛА, включая данные об углах пространственного положения, местоположения и курса.



**Рис. 1. Системы ориентации производства
ОАО АНПП «Темп-Авиа», Россия**

Структурная схема реализации системы ориентации приведена на рис. 2.

Измерительные оси гироскопов и акселерометров ориентированы по связанным осям объекта.

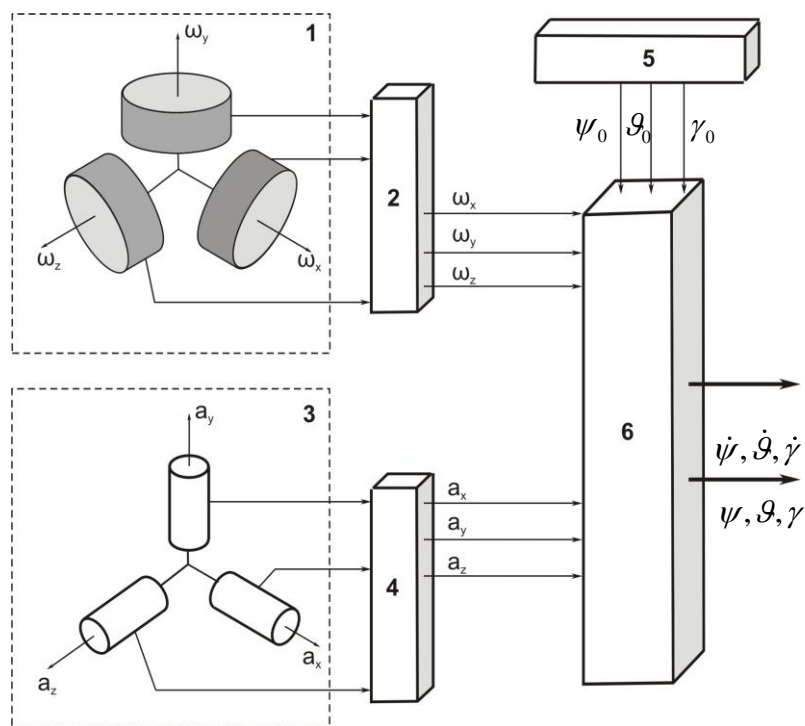


Рис. 2. Обобщенная структурная схема систем ориентации:

- 1 – блок гироскопов; 2 – блок предварительной обработки информации гироскопов;
- 3 – блок линейных акселерометров; 4 – блок предварительной обработки информации акселерометров;
- 5 – блок внешней информации и начальных данных;
- 6 – вычислитель (БЦВМ)

Недостатком подобных устройств является их невысокая надежность, так как в случае даже кратковременного пропадания питания во время полета (что допускается для потребителей электропитания 2 категории [3]) приходится снова проводить начальную выставку си-

стемы, т.е. производить начальное угловое согласование, а также производить оценку дрейфов датчиков, что невозможно сделать достаточно точно без использования внешней информации о пространственном положении ЛА.

Для обеспечения защиты от полного пропадания электропитания предлагается устанавливать в системы ориентации резервные источники питания, способные поддерживать работоспособность системы ориентации ЛА около 30 минут. Установка таких источников осуществляется на иностранных системах ориентации основного контура (потребители первой категории).

Поэтому поставленной задачей было повышение надежности систем ориентации резервного контура за счет автоматического восстановления рабочего состояния системы после кратковременного пропадания бортового питания в процессе эволюции пространственного положения ЛА.

Данную проблему возможно решить за счет того, что в систему для определения пространственного положения и курса ЛА, содержащую блок датчиков угловой скорости, блок датчиков ускорения и трехкомпонентный магнитометр, подключенные через аналого-цифровой преобразователь к вычислителю, необходимо ввести устройства обработки аналогового и цифрового сигналов, входы которых соединены с блоком бортового оборудования, а также запоминающее и логическое устройства, выходы которых подключены к вычислителю, при этом вход логического устройства должен быть соединен с выходами устройств обработки аналогового и цифрового сигналов.

К существенным отличиям данного решения, по сравнению с известными, относится введение устройств обработки аналогового и цифрового сигналов, логического и запоминающего устройств, что позволяет в процессе полета ЛА периодически записывать состояние системы на запоминающее устройство и восстанавливать состояние системы из данных, находящихся в ней, что обеспечивает полную автономность системы за счет использования только собственных датчиков, не прибегая к данным от внешней инерциальной системы, и повышает надежность системы.

Далее представлена блок-схема предлагаемой системы для определения пространственной ориентации и курса ЛА (рис. 3).

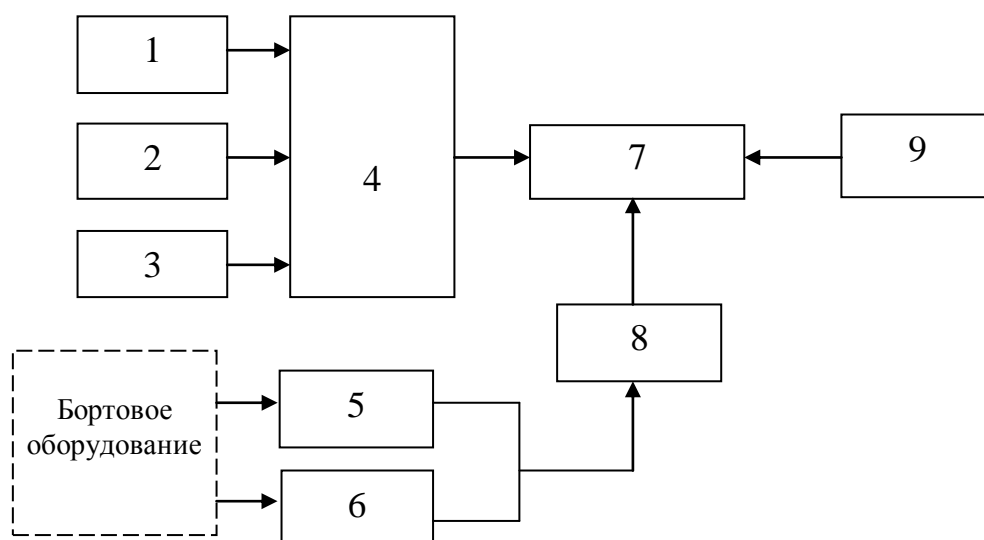


Рис. 3. Блок-схема предлагаемой системы ориентации

Система для определения пространственной ориентации и курса ЛА содержит блок 1

датчиков угловой скорости, блок 2 датчиков ускорения, трехкомпонентный магнитометр 3, аналого-цифровой преобразователь 4, устройство 5 обработки аналогового сигнала, устройство 6 обработки цифрового сигнала, вычислитель 7, логическое устройство 8, запоминающее устройство 9.

Выходы блока 1 датчиков угловой скорости, блока 2 датчиков ускорения и трехкомпонентного магнитометра 3 через аналого-цифровой преобразователь 4 соединены со входами вычислителя 7. На входы устройства 5 обработки аналогового сигнала и устройства 6 обработки цифрового сигнала подаются информационные сигналы с блока бортового оборудования ЛА, а выходы этих устройств подключены к входу логического устройства 8, которое может входить в состав вычислителя 7, но для наглядности изображено как отдельный блок. Выходы логического устройства 8 и запоминающего устройства 9 подключены ко входам вычислителя 7, с выхода которого снимаются навигационные данные.

Система для определения пространственной ориентации и курса ЛА будет работать следующим образом.

После подачи питания на систему напряжения с блока 1 датчиков угловых скоростей, пропорциональные скорости вращения ЛА, с блока 2 датчиков ускорений, пропорциональные ускорениям по каждой из 3-х осей, и с трехкомпонентного магнитометра 3, пропорциональные напряженности магнитного поля Земли, с помощью аналого-цифрового преобразователя 4 преобразуются в цифровую форму. В вычислителе 7 происходит расчет крена, тангажа и гиромантического курса, с учетом компенсации погрешностей датчиков, а также девиационной погрешности магнитометра 3. Сигналы из бортового оборудования с помощью преобразователя 5 аналогового сигнала и преобразователя 6 цифрового сигнала поступают на логическое устройство 8. Логическое устройство 8 производит сравнение данных аналогового и цифрового сигнала и выдает результирующий сигнал с соответствующим признаком. Вычислитель 7 анализирует сигнал с логического устройства. В случае выдачи сигнала с признаком нахождения на земле, система автоматически переходит в режим начальной выставки. В этом режиме вычислитель 7 проводит оценку смещения нулевого сигнала датчиков угловых скоростей и проводит угловое начальное согласование, после чего записывает эти значения в запоминающее устройство 9. В случае выдачи сигнала с признаком нахождения в полете, вычислитель 7 считывает данные, записанные в запоминающем устройстве 9. Далее проведение начальной выставки блокируется, вычислитель 7 в качестве смещения нулевого сигнала датчиков угловых скоростей использует считанные из запоминающего устройства 9 данные и проводит ускоренное угловое согласование, используя вычисленный магнитный курс и данные с блока 2 датчиков ускорения.

Вывод

Предложенная система повышает надежность пилотажно-навигационного комплекса ЛА, так как предоставляет возможность не переходить в режим начальной выставки в полете после прерывания питания, а сразу выходить в режим автономной работы. Единственным условием является обеспечение прямолинейного полета ЛА в течение одной минуты, чтобы не допустить влияния выраженных погрешностей.

В настоящее время ведется работа для практической апробации и применения данного метода на отечественных резервных системах ориентации.

Библиографический список

1. Пат. США № 6522992 МПК G06F7/00, НПК 702/141, опубликован 18.02.2003 (прототип)
2. **Матвеев, В.В.** Основы построения платформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. – 280 с.

3. ГОСТ 19705-89 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии». – М.: Изд-во стандартов, 1989.

*Дата поступления
в редакцию 24.06.2011*

A.B. Kornilov

STANDBY SYSTEM FOR INTEGRATED SENSORS RELIABILITY INCREASE

The principle of improving the reliability of attitude of aircraft due to the introduction of processing devices of analog and digital signals, logic and memory devices, which allows the flight of the aircraft from time to time to record the system state to memory and restore the system state of the data contained in it, which provides complete autonomy of the system, has been considered.

Key words: attitude control system, power consumers of the 2nd category, the storage device.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 515.12

М.Е. Сангалова

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЯМИ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАК ОСНОВА ПОНИМАНИЯ ИХ СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ

Арзамасский государственный педагогический институт им. А.П. Гайдара

Рассматривается организация экспериментальной работы студентов при изучении топологии в курсе «Дифференциальная геометрия и топология». Эксперименты с бумажными моделями топологических поверхностей открывают новую грань восприятия свойств этих поверхностей.

Ключевые слова: топология, эксперимент, образование в высшей школе.

Одной из тенденций инновационной школы (в том числе и высшей) является приобщение учащихся к научно-исследовательской деятельности, привитие интереса и развитие вкуса к такой деятельности. Эксперимент является классическим методом и обязательным элементом научного исследования. Однако он редко используется при обучении математике. Хотя в некоторых случаях именно эксперимент способен дать впечатляющие результаты и устранить затруднения.

При изучении курса «Дифференциальная геометрия и топология» студентам трудно понять многие топологические свойства поверхностей. Например, как «дыру» на сфере заклеить листом Мебиуса? Особенно сложны для восприятия односторонние поверхности: лист Мебиуса, бутылка Клейна, проективная плоскость.

Устранению имеющихся затруднений способствует усвоение учащимися метода моделирования топологических поверхностей. Были выделены действия, составляющие этот метод [2]:

- 1) изготовление модели исследуемой фигуры (поверхности);
- 2) анализ модели: выделение существенных и несущественных признаков, выделение топологического строения поверхности;
- 3) использование топологических свойств поверхности;
- 4) сравнение топологических свойств различных поверхностей (проведение классификации);
- 5) эксперимент с моделью, подтверждающий правильность проведенного анализа.

Для успешного использования метода моделирования студенты должны овладеть каждым из этих действий. Это требует целенаправленной работы по формированию указанных действий.

Ключевым моментом усвоения метода моделирования поверхностей является формирование у учащихся понятия топологической модели. Для этого полезно предложить тестовые упражнения на разграничение понятий метрической и топологической модели. Приведем пример.

Задача 1. Какие из перечисленных предметов можно рассматривать как топологические модели плоскости: а) смятый в комок лист бумаги; б) резиновый мяч с прорезанной в нем дырой; в) треугольник; г) банка; д) прямоугольный параллелепипед; е) лист бумаги с двумя дырами?

В формировании понятия топологической модели поверхности у студентов важно, чтобы они не путали эту модель с метрической (то есть отображающей метрические свойства поверхности). Для этого, в частности, нужны упражнения на варьирование несущественными для топологии признаками (различными метрическими свойствами и прямолинейностью). Метрической моделью плоскости является лист бумаги (с допущением, что он имеет бесконечное продолжение во все стороны). Но смятый в комок лист бумаги все равно остается двусторонней поверхностью с одним краем, то есть является топологической моделью плоскости. Это же относится и к вариантам б), в), г). Прямоугольный параллелепипед не отображает свойство наличия краев, лист бумаги с двумя отверстиями имеет три края, что также не характеризует плоскость.

Изготовление топологической модели требует некоторой изобретательности. Если модель плоскости из бумаги изготовить легко (смотрите задачу 1), то с другими поверхностями это может оказаться не так.

Задача 2. Изготовьте бумажную модель поверхности тора.

Понятно, что изготовить из бумаги модель тора в ее традиционном представлении не получится. Однако если пренебречь его метрическими свойствами, а также прямолинейностью, то такую модель изготовить довольно просто: нужно лишь склеить свободные края бумажного цилиндра.

Очень важным является действие анализа модели. На начальном уровне сформированности это действие выглядит как анализ готовой модели (рассматриваются вопросы: какие свойства модели существенны и несущественны с точки зрения топологии, что надо изменить в модели, чтобы получить новую топологическую поверхность, что можно менять, не нарушая топологии поверхности). На высшем же уровне сформированности – это анализ мысленно созданной модели (правильность этого анализа может быть проверена с помощью изготовления модели). Приведем примеры.

Задача 3. Дана модель листа Мебиуса. Назовите топологические свойства этой поверхности. Какие манипуляции с моделью: а) не изменяют ее топологическую структуру; б) изменяют топологическую структуру. Как из этой модели получить модель плоскости?

Задача 4. Изготовить из бумаги модель для исследования топологических свойств сферы.

Такая модель должна обладать теми же топологическими свойствами, что и сфера: имеет две стороны, 0 краев, не имеет сквозных отверстий и ручек. То есть должна быть топологически эквивалентна сфере. Несущественными с точки зрения топологии являются метрические свойства и прямолинейность. Проведенный анализ позволяет выяснить, что в качестве требуемой модели может быть использована модель любого многогранника, изучаемого в школьном курсе геометрии: например, тетраэдра или куба. Подойдет даже заклеенный конверт.

При выполнении сравнения поверхностей ключевым является выделение топологического инварианта – основания для сравнения. А для этого необходимо развивать математическую интуицию, которая зачастую и указывает путь к решению. На начальном уровне это действие формируется решением задач на выбор основания для сравнения из некоего перечня.

При дальнейшей работе по усвоению учащимися данного действия основание для сравнения находится ими самостоятельно. Приведем пример.

Задача 5. Ученик, посещающий кружок, получил задание раскрасить модели поверхностей плоскости (прямоугольник), цилиндра, тора, сферы и листа Мебиуса. Причем красить он должен, не отрывая кисточку от бумаги, а, если переходит через край, менять цвет краски. Ученик также должен ограничиться минимальным количеством красок. Какие результаты он получит?

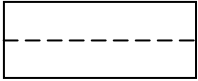
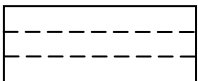
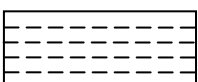
Очевидно, результаты зависят от наличия у поверхности края и числа ее сторон. У плоскости две стороны и край, значит, для ее закрашивания понадобится два цвета. Аналогичная ситуация у цилиндра. А вот лист Мебиуса можно закрасить одной краской, так как он является односторонней поверхностью. В иную ситуацию мы попадаем с тором и сферой – двусторонние поверхности без края – для их раскрашивания потребуется одна краска, а внутренняя сторона останется незакрашенной в силу невозможности туда попасть.

Переходя непосредственно к топологическим экспериментам, следует отметить следующее. На начальном уровне сформированности действие эксперимента с моделью выглядит как эксперимент с реальной моделью, на высшем же уровне – это виртуальный эксперимент с мысленно представимой моделью.

Топологические эксперименты можно проводить на практических занятиях по геометрии. Оборудование для этого занятия доступно каждому: листы бумаги, самоклеющаяся лента и ножницы. Модели основных топологических поверхностей (двумерных топологических многообразий) довольно легко изготовить из бумаги [1]. Затем студентам раздают индивидуальные бланки (рабочие листы), которые заполняются в ходе занятия. На бланках представлены незаполненные таблицы. Приведем пример заполнения таблицы.

Таблица 1

Разрезание листа Мебиуса

№ п/п	Описание эксперимента	Предполагаемый результат эксперимента	Действительный результат эксперимента
1	 разрез на $\frac{1}{2}$	два листа Мебиуса	лента с двумя перекручиваниями
2	 разрез на $\frac{1}{3}$	лента с тремя перекручиваниями	лист Мебиуса, зацепленный за ленту с двумя перекручиваниями
3	 разрез на $\frac{1}{5}$	лист Мебиуса и две зацепленные за него ленты с двумя перекручиваниями	взаимнозацепленные лист Мебиуса и две ленты с двумя перекручиваниями

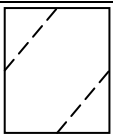
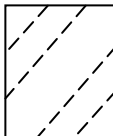
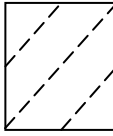
Выводы: _____

В таблице четыре столбца: номер, описание эксперимента, предполагаемый результат и действительный результат эксперимента. Разработаны серии из нескольких взаимосвязанных экспериментов с моделями следующих поверхностей: листа Мебиуса, бутылки Клейна, тора. Нередко результат следующего эксперимента легче предвидеть, имея результат предыдущего. Возможно несколько вариантов представления экспериментальных заданий в таблице.

Вариант 1. В таблицах изначально заполнен только столбец описание эксперимента (табл. 2). Здесь пунктиром обозначены линии разреза на развертке модели. Перед проведением каждого эксперимента студенты записывают в таблицу предполагаемый результат. Затем изготавливают бумажную модель, предварительно наметив линии разреза. Проводят разрезание и заполняют последний столбец таблицы. Сравнивают предполагаемый и действительный результат. Если они не совпадают, то анализируют причины ложного предположения и делают соответствующие выводы, а потом переходят к следующему эксперименту. Таким образом, с каждым следующим опытом расхождение между предположениями и действительными результатами нивелируется.

Таблица 2

Разрезание тора

№ п/п	Описание эксперимента	Предполагаемый результат эксперимента	Действительный результат эксперимента
1			
2			
3			

Выводы: _____

Вариант 2. Этот вариант несколько сложнее, чем первый и требует наличия некоторого опыта в проведении экспериментов. Студенты получают задание.

Задача 6. На бумажной модели бутылки Клейна показать разрез, при котором получаются два листа Мебиуса, являющиеся зеркальным отображением друг друга (левый и правый листы). Как нужно провести разрез, чтобы образовался всего один лист Мебиуса? Как получить два листа Мебиуса и цилиндр, если можно проводить два разреза.

Исходя из полученной задачи, в таблице заполняется только столбец *предполагаемый* (желаемый) *результат* – цель эксперимента (табл. 3). Далее при работе студенты дают описание эксперимента в таблице, затем изготавливают модель и проводят разрезание. Последним заполняется столбец с действительными результатами. Сравнивая записи в двух последних столбцах таблицы, студенты делают выводы о достижении или не достижении поставленной цели эксперимента.

Таблица 3

Разрезание бутылки Клейна

№ п/п	описание эксперимента	Желаемый результат эксперимента	Действительный результат эксперимента
1		два листа Мебиуса, являющиеся зеркальным отражением друг друга	
2		один лист Мебиуса	
3		два листа Мебиуса и цилиндр	

Выводы: _____

При выполнении этих заданий у студентов рождаются идеи новых экспериментов с интересными результатами. Их также добавляют в таблицу. Итогом экспериментальной работы является формулировка студентом выводов о свойствах топологических поверхностей.

Эксперимент позволяет, что называется «почувствовать собственными руками» строение поверхностей, открывает новую грань восприятия этих свойств. Более того, самостоятельная деятельность с моделями делает полученные знания лично значимыми для учащегося. Эксперимент дает студентам знания, приобретенные на основе собственного опыта. Источниками знаний выступают: наблюдение, опыт, анализ и обсуждение полученного материала. Это приводит к более глубокому осмыслению учебного материала.

Вузовская геометрия подразумевает достаточно высокий уровень абстракции в изложении материала. Поэтому не следует пренебрегать ни малейшей возможностью «приблизить» к студенту эти абстракции. Топологический эксперимент дает такую возможность: живое динамичное существование и преобразование поверхностей в руках студента!

Обобщая точку зрения Ф. Клейна, геометрию понимают как теорию структур более богатых, чем структура топологического пространства, т.е. все пространства, изучаемые в геометрии, прежде всего топологические пространства. Более того, это топологические пространства с обогащенной структурой. То есть топологические свойства фигур – в известном смысле это самые глубокие, самые основные геометрические свойства.

Поэтому топологические эксперименты (в некотором объеме) целесообразно проводить и со школьниками. Есть опыт обучения элементам топологии учащихся средней школы на занятиях кружка [2]. Разработаны методические аспекты организации и проведения дополнительных занятий по топологии.

Библиографический список

1. **Гарднер М.** Математические головоломки и развлечения / М. Гарднер. – М.: Мир, 1971.
2. **Сангалова М.Е.** Теория и методика обучения элементам топологии / М.Е. Сангалова. – Арзамас: Арзамас. гос. пед. ин-т, 2005.

*Дата поступления
в редакцию 02.08.2011*

М.Е. Sangalova

EXPERIMENTS WITH THE MODELS OF TOPOLOGICAL SURFACES AS A BASIS FOR UNDERSTANDING OF THEIR STRUCTURE AND PROPERTIES

This paper is about the experimental work of students in studying topology aware "Differential geometry and topology». Experiments with paper models of topological surfaces offer a new dimension of perception properties on those surfaces.

Key words: topology, experiment, education in higher school.

УДК 510.6:656.13

М.Е. Елисеев¹, А.В. Липенков¹, Е.М. Елисеев²**О МОДЕЛИ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА:
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИКИ ПАССАЖИРА**Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
Арзамасский государственный педагогический институт им. А. П. Гайдара²

Рассматриваются модели пассажирских автобусных маршрутов 52 и Т7, выполненные в среде имитационного моделирования Anylogic. Описываются её основные функциональные блоки. Модель имеет высокую степень детализации и учитывает логику каждого субъекта транспортного процесса.

Ключевые слова: имитационное моделирование, оптимизация, пассажирские перевозки, автобусные перевозки.

Введение

Задача управления городским транспортным хозяйством становится с каждым годом все более сложной в связи с бурным ростом городов, уровнем автомобилизации, меняющимися потребностями граждан в качестве обслуживания. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, важным направлением повышения эффективности функционирования транспортных систем является автоматизация и оптимизация процессов планирования и управления с использованием современной вычислительной техники и методов имитационного моделирования. Методы имитационного моделирования позволяют упростить натуральный эксперимент и обеспечить достаточную достоверность расчетов.

В настоящий момент при моделировании пассажирских перевозок в России в основном используется программный комплекс PTV Vision и AIM Sun. Их основной недостаток – закрытая архитектура, то есть невозможность добавления принципиально новых конструкций. Ряд российских исследователей утверждают, что зарубежные методики требуют адаптации к российским условиям [2], не говоря уже о возможности создания новых методик. Исходя из этого, принято решение о разработке имитационной модели пассажирского автобусного маршрута (и маршрутной сети) в пакете с открытой архитектурой. Такая модель должна наиболее точно отразить реалии российских пассажирских маршрутов, логику пассажиров, диспетчеров и т. д. Для её построения выбран отечественный профессиональный пакет имитационного моделирования Anylogic 6. При её построении была активно задействована стандартная библиотека Anylogic Enterprise Library. Структура модели представлена на рис. 1.

Описание объектов модели

Network – данный объект задает граф маршрутной транспортной сети. На анимации (рис. 2) транспортная сеть представляет собой набор прямоугольников, имитирующих остановочные пункты и ломаных линий, имитирующих перегоны маршрута. Для более наглядного отображения в модель желательно включение ГИС-карты моделируемого участка города, хотя возможна и растровая подложка, при этом функционал остается прежним.

Source в данном случае – генератор автобусов. Автобусы выходят на линию в соответствии с действующим расписанием, которое может задаваться как с помощью специального модуля расписаний Schedule, так и обычной табличной функцией. В последней версии модели расписание считывается из Excel-файла, при прогоне модели, возможны отклонения от него, задаваемые из панели управления.

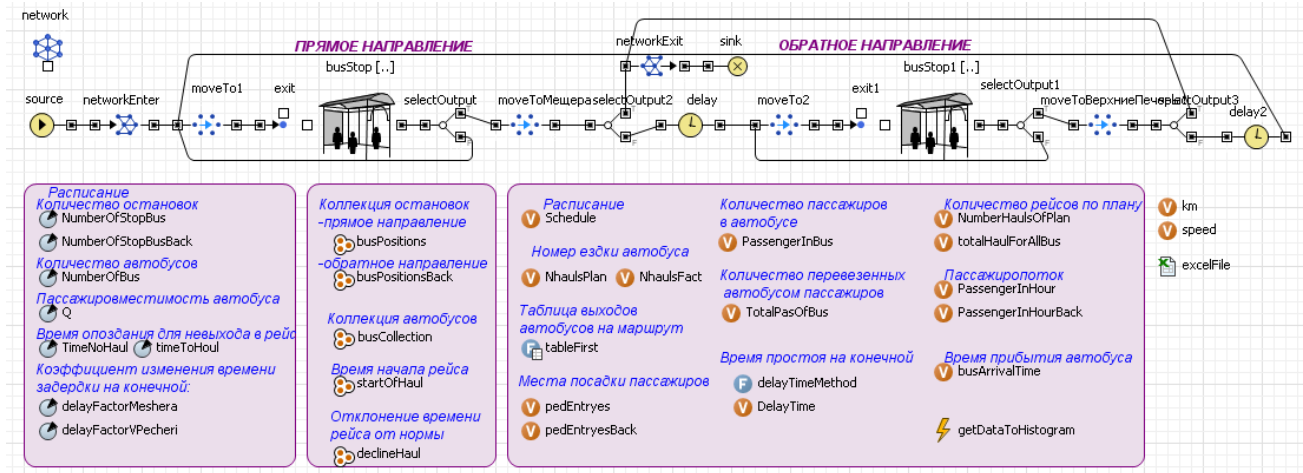


Рис. 1. Логика работы имитационной модели пассажирского маршрута

NetworkEnter – объект задает вход в транспортную сеть. С момента входа транспортные средства начинают отображаться на анимации (рис. 2). Необходимый объект при моделировании транспортных сетей в Anylogic.

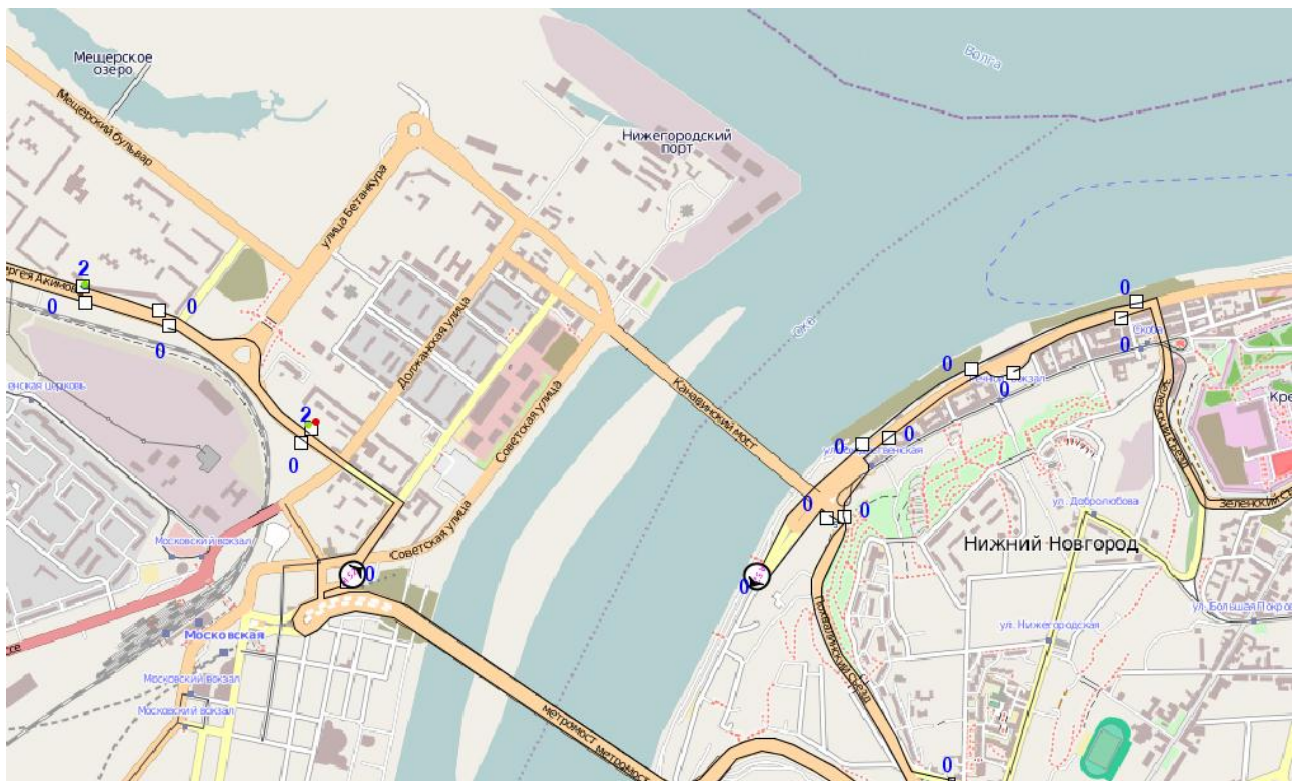


Рис. 2. Анимация имитационной модели

NetworkMoveTo – объект моделирует перегон маршрута. Он указывает транспортному средству путь следования к ближайшему остановочному пункту. В модели заложена возможность менять скорость автобуса в зависимости от времени суток, так как скорость в течение дня и на различных перегонах маршрутов может значительно отличаться.

SourcePed – генератор пассажиров на остановочном пункте. Каждый поступающий на остановочный пункт пешеход (назовем его заявкой) обладает определенными характеристиками: место назначения, наличие проездного билета и т.д. В соответствии с этим пешеход выбирает маршрут движения и вид транспортного средства (либо садится в первый подо-

шедший, либо ждет только муниципальный автобус). Возможно включение в модель любых дополнительных свойств пассажиров. Пассажиры моделируются на остановочном пункте, согласно пуассоновскому распределению, с интенсивностью, определенной в результате обследования пассажиропотока.

Queue – моделирует очередь ожидающих посадки пассажиров. Очередь работает по принципу FIFO (First In First Out) – первым пришел, первым будешь обслужен. Конечно, в реальности это далеко не так, но для построения адекватной модели не существенно, кто из пассажиров не смог осуществить посадку, важен сам факт отказа в обслуживании.

Pickup – вместе с объектом *Dropoff* моделируют посадку-высадку пассажиров. При посадке проверяется несколько условий. *Во-первых*, условие перегруженности автобуса. При высокой загрузке транспортного средства возможен отказ пассажиру в посадке. Количество пассажиров, получивших отказ в обслуживании, фиксируется. Это может быть одним из критериев дальнейшей оптимизации маршрута и всей сети. *Второе условие* посадки пассажиров – возможность добраться на подошедшем автобусе к месту назначения.

Delay – объект моделирует время простоя автобуса на остановочном пункте. Время простоя автобуса при посадке и высадке пассажиров – это случайная величина, зависящая от многих факторов: пассажирообмена остановочного пункта, количества дверей транспортного средства, заполненности салона автобуса, и т.д. Для определения времени простоя автобуса был проведен эксперимент с фиксацией прибытия автобусов на видеокamеры. О результатах эксперимента готовится публикация.

Для удобства построения модели конкретного маршрута или транспортной сети, описанные ранее объекты инкапсулировались в реплицированном объекте BusStop (рис. 3).

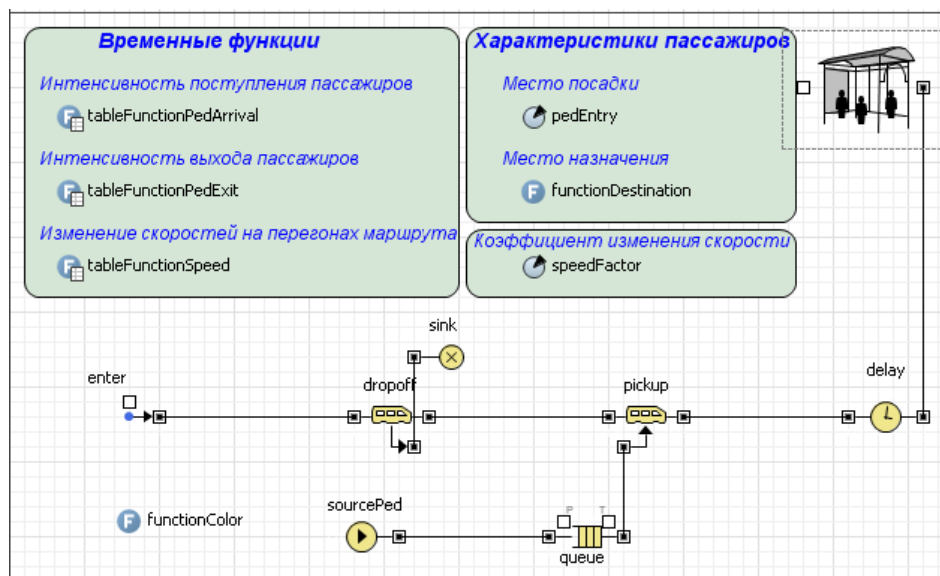


Рис. 3. Логика активного объекта BusStop

После закрытия дверей (окончания посадки пассажиров) транспортное средство направляется на следующую остановку и цикл (остановочный пункт – перегон маршрута – остановочный пункт) повторяется. При выполнении всех заявленных рейсов транспортные средства уничтожаются (объект *Sink*). Тем самым моделируется их заезд в парк.

Логика модели

Особого внимания требует вопрос о распределении пассажиропотоков по маршрутам. У пассажира часто имеется возможность выбора альтернативных маршрутов для перемещения. Возникает задача определения, каким образом пассажиропоток будет распределен между видами транспорта и маршрутами. Она рассматривается в ряде работ, например, в [3].

При построении модели должны учитываться следующие факторы, определяющие выбор пассажира: интенсивность поступления транспорта на остановочный пункт, время поездки, стоимость проезда на различных видах транспорта, наличие льгот на проезд в каком-либо виде транспорта. Отдельного рассмотрения требует описание пересадки пассажира с одного транспортного средства на другое. Модели рассмотрены в следующем порядке:

- Распределение пассажиропотоков по маршрутам одного вида транспорта. Модель опирается на то, что поступление транспорта на остановочный пункт является случайным пуассоновским процессом. Пассажир, находящийся на остановочном пункте, чаще всего не склонен терять время в ожидании, и осуществляет посадку в первое подошедшее транспортное средство. При этой гипотезе пассажиры распределяются между маршрутами пропорционально интенсивности движения транспортных средств по ним;

- Распределение пассажиропотока при существовании скоростного вида транспорта (метро). В этом случае выбор пассажиром способа перемещения зависит от его оценки свободного времени. Модель должна прогнозировать, как распределятся пассажиропотоки между видами городского пассажирского транспорта, при изменении стоимости и скорости проезда, интенсивности движения;

- Функционирование двух видов транспорта (муниципального и маршрутного такси) при двух категориях пассажиров: имеющих льготы на проезд в муниципальном транспорте, и не обладающих такой льготой. Категории населения, пользующиеся льготами, ориентированы на перемещение по городу с использованием муниципальных маршрутов. Пассажиры, не имеющие льгот, не обращают внимания на вид транспорта и осуществляют посадку в первое подошедшее транспортное средство следующее в подходящем направлении.

Авторы статьи полагают, что оптимальным вариантом была бы комбинация описанных ранее подходов. Для выбора наиболее подходящего варианта, при поддержке департамента транспорта Нижнего Новгорода, было проведено обследование пассажиропотоков соответствующих двум маршрутам города: 52 и Т7 (маршрутное такси). Данные о пассажиропотоках фиксировались в специально разработанных для обследования бланках. Основное отличие от классических методик обследования – использование опроса пассажиров на предмет места следования, что необходимо для построения модели с низким уровнем абстракции.

В модели логика пассажира реализована с помощью созданного нового Java-класса (в основе Anylogic лежит именно Java). В модели этот класс назван *Passenger*. У данного класса были добавлены необходимые поля, такие как: проездной билет (поле булевского типа: *true* – имеется проездной, *false* – проездного нет), место назначения, (пассажир выбирает только тот транспорт, который идет к месту назначения, заданного фигурой анимации типа *ShapeRectangle*) и т.д. С помощью дополнительных полей стало возможным создание «умных» пассажиров, умеющих выбирать маршрут, тип транспортного средства, выбирающих остановку для пересадки.

Проведенное обследование пассажиропотоков позволило оценить адекватность разработанной модели и скорректировать ее для реальных маршрутов. Информация о вошедших пассажирах и времени прохождения автобусов остановки позволяет вычислить функцию интенсивности поступления пассажиров на остановку. В данном исследовании, весь период движения был разбит на интервалы в один час, в пределах которых интенсивность поступления считалась неизменной, то есть была построена функция поступления «ступенчатого» вида или, иначе говоря, дискретная функция.

В момент генерации экземпляра объекта «пассажир» ему сразу же, вероятностным образом, задается пункт назначения. Вероятности выхода пассажира на той или иной остановке вычисляются на основании информации о выходящих пассажирах из бланков обследования.

Скорости прохождения автобусами пути от одной остановки до другой также определяются экспериментально и задаются ступенчатой (дискретной) функцией.

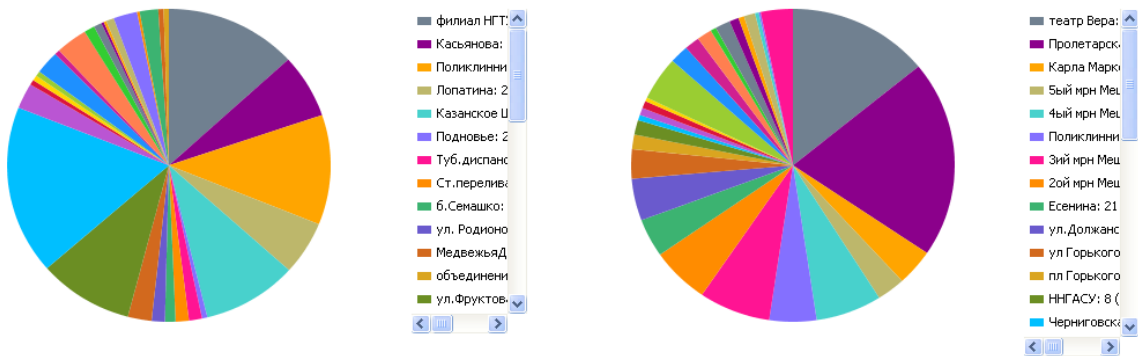
При моделировании реальных маршрутов выяснилось, что расписание имеет лишь приблизительный характер, а в случае маршрутных такси (Т7) формальный характер, то есть четко по расписанию выполняются лишь первые утренние рейсы. Отклонение от расписания и соответственно реальное время выхода автобусов в некоторых случаях регулируется диспетчером, в других случаях самими водителями. Моделирование логики этих субъектов транспортного процесса представляет значительные сложности.

Построенная модель реального маршрута позволяет:

- 1) менять графики движения автобусов, изменяя файл расписания;
- 2) менять вместимость автобусов (т. е. проводить имитационный эксперимент по изменению качественного состава автобусов);
- 3) изменять интенсивности поступления пассажиров;
- 4) увеличивать или уменьшать скорости движения на отдельных участках, в частности, имитировать пробки, в перспективе также пробки вызванные ДТП;
- 5) определять оптимальное число транспортных средств на маршруте с учетом различных критериев, что имеет самостоятельную практическую ценность [4].

В ходе работы модели, в режиме реального времени, отображается статистика работы маршрута: наполняемость работающих автобусов, количество пассажиров на всех остановках, рисуются гистограммы пассажиропотоков в прямом и обратном направлениях по каждому часу, а также круговые диаграммы распределения пассажиров по месту посадки и высадки в прямом и обратном направлениях (рис. 4).

Распределение пассажиров по месту посадки (прямое направление) Распределение пассажиров по месту посадки (обратное направление)



Распределение пассажиров по месту высадки (прямое направление) Распределение пассажиров по месту высадки (обратное направление)

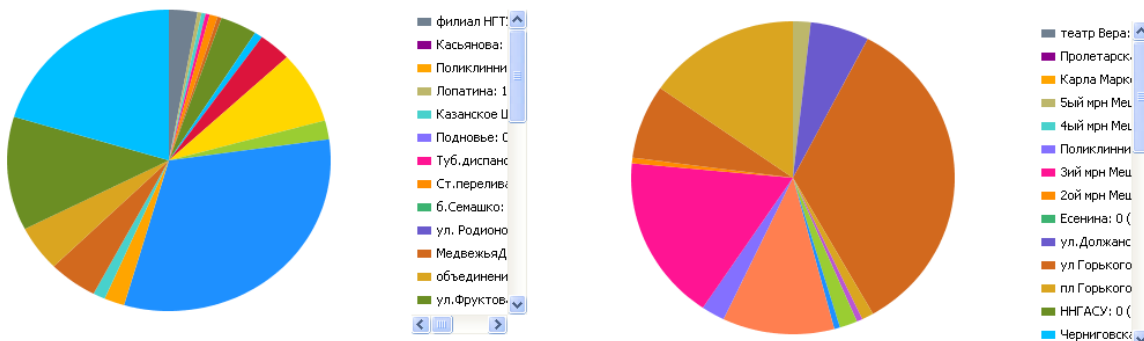


Рис. 4. Визуализация статистики работы модели

Модель автобусов 52 и Т7 может быть использована для составления оптимального расписания, подбора транспортных средств для данных маршрутов и других задач. Перспективное расширение модели на определенный район города или весь Нижний Новгород позволит решать целую группу задач.

Библиографический список

1. **Липенков, А.В.** О разработке имитационной модели городских пассажирских перевозок в Нижнем Новгороде / А.В. Липенков, Н.А. Кузьмин, О.А. Маслова // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса: материалы международной научно-практической конференции Орел, 2011. Т. 2. С. 50–54.
2. **Михайлов, А.Ю.** Адаптация методов расчета остановочных пунктов маршрутного пассажирского транспорта к Российским условиям / А.Ю. Михайлов [и др.] // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах. – С.-Петербург, 2006. С. 302–307.
3. **Власов, Ю.Л.** Моделирование спроса на различные виды транспортных средств / Ю.Л. Власов, В.И. Россоха // Вестник ОГУ. 2006. Т. 2. №6. С. 205–211.
4. **Пыгалева, О. А.** Определение оптимального числа транспортных средств городского пассажирского транспорта // Вестник УрГУПС. 2009. Вып. 4. С. 120–123.

*Дата поступления
в редакцию 02.08.2011*

M.E. Eliseev, A.V. Lipenkov, E.M. Eliseev

ABOUT THE MODEL OF URBAN PASSENGER TRANSPORT: SIMULATION OF THE LOGIC OF PASSENGER

The paper describes the simulation models of the passenger bus route 52 and T7 that was made in Anylogic software. Main functional blocks of the model are described. The model has a high degree of detail and takes into account the logic of each subject of the transport process.

Key words: simulation, optimization, passenger transportation, bus transportation.

УДК 517.51, 519.86

Л.Н. Ерофеева

ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ НЕДИФФЕРЕНЦИРУЕМЫХ ФУНКЦИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Приведены примеры непрерывных недифференцируемых функций и установлена их фрактальная размерность.

Ключевые слова: временной ряд, недифференцируемость, фрактал.

В 70 годах XVII столетия И. Ньютон и Г. Лейбниц ввели понятие производной и заложили основы дифференциального и интегрального исчисления. Созданный математический аппарат обеспечил бурное развитие естественных и точных наук на несколько столетий вперед. Основным объектом изучения классического математического анализа являются гладкие (или дифференцируемые) функции. Математики имели дело со сравнительно небольшим набором функций, которые принято в настоящее время считать элементарными. Возникавшие до недавнего времени практические задачи достаточно хорошо описывались элементарными функциями. Производные от них могут быть найдены с помощью формальных правил и всегда существуют, если не считать некоторых исключительных точек, как, например, $x = 0$ для $y = \sqrt[3]{x}$. Долгое время эти случаи считались досадным исключением, не относящимся к делу.

Конечно, негладкие функции естественным образом появлялись и в самой математике и в ее приложениях, но они представлялись чаще всего досадным исключением, не относящимся к делу. Однако развитие понятия дифференцируемости, начиная со знаменитого спора Эйлера и Даламбера о природе решений уравнения колебания струны и заканчивая введением современного определения функции, изменили положение вещей. Разумеется, что ни у кого не вызывает удивления существование нигде не дифференцируемых функций, таких как функция Дирихле $D(x)$, которая равна нулю или единице в зависимости от рациональности или иррациональности аргумента. Однако интуиция прикладников отказывалась допустить существование нигде не дифференцируемых непрерывных функций до тех пор, пока Вейерштрасс не построил пример. И все же физики, тем не менее, игнорировали подобные результаты, относя их к патологиям, не встречающимся на практике.

Положение изменилось при изучении хаотических явлений, в частности, броуновского движения. В одной из моделей броуновского движения – винеровском случайном процессе – почти все траектории представимы непрерывными, но нигде недифференцируемыми функциями, что привлекло внимание к последним. Впоследствии при исследовании экономических моделей, в частности, так называемых временных рядов возникла необходимость их описания недифференцируемыми функциями.

Для современной науки функция без производной вовсе не абстрактное понятие. Негладкий анализ – это вполне сложившийся и быстро развивающийся раздел современной математики. Негладкая задача – это задача, которая описывается с помощью недифференцируемой функции. Для решения негладких задач разрабатываются специфические методы. Наиболее интересным и содержательным направлением в исследовании представляется связь недифференцируемых функций и фракталов. Самоподобие и другие замечательные свойства фракталов позволяют определять с их помощью различные нетривиальные функции. Наглядность и простота структуры фракталов значительно облегчает изучение свойств полученных функций [4, 5].

Приведем примеры непрерывных недифференцируемых функций, которые могут служить иллюстративным материалом при изложении курса математического анализа в вузе.

Теорема

Функция $f(x) = \sum_{k+1}^{\infty} a^k \varphi(b^k x)$ (*)

является нигде недифференцируемой при следующих условиях:

- 1) $0 < a < 1, ab > 1$,
- 2) $\varphi(x)$ -непрерывная, ограниченная, периодическая функция с периодом $\min \varphi(x) = 0, \max \varphi(x) = 1$
- 3) $\varphi(x)$ -удовлетворяет требованию

$$|\varphi(\beta) - \varphi(\alpha)| \leq \lambda |\beta - \alpha|, \quad (**)$$

при некотором λ .

Рассмотрим доказательство данного утверждения, не вдаваясь в детали арифметического характера. Согласно признаку Вейерштрасса, рассматриваемая сумма ряда $f(x)$ есть непрерывная функция. Без ограничения общности можно рассматривать значения аргумента функции $f(x)$ из $[0;1]$.

Рассмотрим последовательность $x_n = x + \alpha_n$, где $\alpha_n \in (b^{-n-1}; b^{-n})$. Очевидно, что $x_n \rightarrow x$ при $n \rightarrow \infty$.

Приращение $f(x_n) - f(x)$ представимо следующим образом:

$$\begin{aligned} f(x_n) - f(x) &= \sum_{k < n} a^k [\varphi(b^k x_n) - \varphi(b^k x)] + a^n [\varphi(b^n x_n) - \varphi(b^n x)] + \sum_{k > n} a^k [\varphi(b^k x_n) - \varphi(b^k x)] = \\ &= S_n + a^n [\varphi(b^n x_n) - \varphi(b^n x)] + T_n. \end{aligned}$$

Оценим три слагаемых, входящих в приращение.

Используя условие (**), имеем

$$|S_n| = \left| \sum_{k < n} a^k [\varphi(b^k x_n) - \varphi(b^k x)] \right| < \sum_{k < n} a^k b^k |x_n - x| \lambda = \lambda \alpha_n \frac{(ab)^n - 1}{ab - 1} < \lambda \alpha_n \frac{(ab)^n}{ab - 1};$$

$$|T_n| = \left| \sum_{k > n} a^k [\varphi(b^k x_n) - \varphi(b^k x)] \right| \leq \sum_{k > n} a^k = \frac{a^{n+1}}{1-a}, \text{ так как } |\varphi(y) - \varphi(x)| < 1.$$

Далее рассмотрим второе слагаемое, входящее в приращение. Поскольку

$$b^n x_n - b^n x = b^n \alpha_n \in (0,1), \text{ то } \alpha_n \text{ можно выбрать так, что } |\varphi(b^n x_n) - \varphi(b^n x)| \geq \frac{1}{2},$$

тогда $|a^n [\varphi(b^n x_n) - \varphi(b^n x)]| \geq a^n \frac{1}{2}$.

$$\text{Таким образом, } |f(x_n) - f(x)| \geq -\lambda \alpha_n \frac{(ab)^n}{ab-1} + a^n \frac{1}{2} - \frac{a^{n+1}}{1-a} = a^n \left(\frac{1}{2} - \frac{a}{1-a} \right) - \lambda \frac{(ab)^n}{ab-1} \alpha_n.$$

Учитывая, что $\frac{a^n}{\alpha_n} > \frac{a^n}{b^{-n}} = (ab)^n$, имеем

$$\left| \frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x} \right| \geq \frac{a^n}{\alpha_n} \left(\frac{1}{2} - \frac{a}{1-a} \right) - \lambda \frac{(ab)^n}{ab-1} > (ab)^n \left[\frac{1}{2} - \frac{a}{1-a} - \frac{\lambda}{ab-1} \right].$$

Полученное неравенство позволяет сделать вывод, что $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f(x_n) - f(x)}{x_n - x}$

не существует, так как a, b можно выбрать так, что $\left[\frac{1}{2} - \frac{a}{1-a} - \frac{\lambda}{ab-1} \right] > 0$, а значит $f(x)$ нигде не дифференцируемая функция.

Далее перейдем к понятию размерности.

С современной точки зрения странные свойства объектов, изучаемых в негладком анализе, связаны с тем, что они рассматриваются как одномерные. Гладким линиям, в частности, прямой, принято приписывать размерность 1. График недифференцируемой функции гладким не является, а значит неразумно приписывать ему размерность 1. Более естественно считать недифференцируемую функцию объектом более высокой, в том числе и дробной размерности (по современной терминологии – фракталом). При описании негладких объектов место обычной размерности занимает дробная, введенная Хаусдорфом, а место производной – показатель Гёльдера, или дробная производная.

Как уже отмечалось, в классическом математическом анализе размерность равна числу независимых переменных, необходимых для того, чтобы задать точку на рассматриваемом объекте: точка имеет размерность равную нулю, отрезок, окружность, вообще, любая обычная кривая на плоскости или в пространстве – размерность 1, круг, сфера – двумерны, тела – трехмерны. Однако смысл понятия "размерность" шире. Оно характеризует более "тонкие" топологические свойства объектов и совпадает с числом независимых переменных, необходимых для описания объекта только в частных случаях [7].

В 1919 году Феликс Хаусдорф определил α -меру для любого $\alpha \geq 0$, ($\alpha \in R$) и на этой основе каждому множеству в евклидовом пространстве сопоставил число, названное им метрической размерностью. Идеи Хаусдорфа были развиты А.С. Безиковичем, который длительное время был автором или соавтором практически всех работ по данной тематике.

Первый шаг в построении теории дробной размерности состоит в определении d -меры шара радиуса r в R^n , где d - любое неотрицательное вещественное число. Это достигается путем распространения формулы

$$V_d = r^d \frac{\tilde{A}\left(\frac{1}{2}\right)^d}{\tilde{A}\left(1+\frac{1}{2}\right)}, \tag{1}$$

где $\tilde{A}(x)$ - гамма функция Эйлера, $d = 1, 2, 3, \dots$ на все вещественные $d > 0$.

Следующий шаг заключается в переносе понятия d -меры с шара на произвольное множество $A \subset R^n$. Для этого построим покрытие A множеством шаров $B_\varepsilon(x_i)$.

Просуммируем их объемы:

$$\sum_{i=1}^M \varepsilon^d \frac{\tilde{A}\left(\frac{1}{2}\right)^d}{\tilde{A}\left(1+\frac{1}{2}\right)}. \tag{2}$$

Определение. ε -фрактальной d -мерой множества называется число

$$\mu(A, d, \varepsilon) = \min M \cdot \varepsilon^d \equiv \varepsilon^d N(\varepsilon), \tag{3}$$

где $N(\varepsilon) = \min M$, причем $\min M$ берется по всевозможным покрытиям множества A .

$$\mu(A, d, \varepsilon) = \inf \left\{ \sum \frac{\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)^d}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right)} \cdot \varepsilon^d \text{ по всевозможным покрытиям } A \right\}$$

Определение. Фрактальной d -мерной сферической мерой Хаусдорфа называется число

$$\mu_F(A, d) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sup \mu(A, d, \varepsilon) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \sup (\varepsilon^d N(\varepsilon)). \quad (4)$$

Заметим, что часто бывает

$$\mu_F(A, d) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sup \mu(A, d, \varepsilon) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} (\varepsilon^d N(\varepsilon)).$$

Безикович показал, что для каждого X всегда существует число $d_H \in \mathbb{R}$, что d -мерная мера Хаусдорфа компакта X бесконечна при $d < d_H$, и равна 0 при $d > d_H$.

Определение. Число d_H , удовлетворяющее соотношению $d_H = \inf \{d \mid \mu_F(A, d) = 0\}$: называется размерностью Хаусдорфа-Безиковича (метрической или фрактальной размерностью) множества A . Обозначается как d , d_H или d_F .

Выполнив некоторые преобразования, можно показать, что если

$$0 < C_1 \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^d \leq N(\varepsilon) \leq C \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^d, \text{ то}$$

$$d = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \frac{1}{\varepsilon}}. \quad (5)$$

Для большинства "хороших" объектов, пространств, множеств размерность и фрактальная размерность совпадают, однако существуют объекты, для которых размерность меньше, чем фрактальная размерность. Это и есть фракталы.

Чтобы понять формулу (5), умножим обе части на $\ln \frac{1}{\varepsilon}$ и введем d под знак логарифма. В результате получим

$$\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^d \sim N(\varepsilon). \quad (6)$$

Так, для покрытия, например, единичного отрезка, квадрата или куба его копиями размера ε , их потребуется соответственно $\frac{1}{\varepsilon}, \frac{1}{\varepsilon^2}, \frac{1}{\varepsilon^3}$, то возникающий показатель степени можно понимать как размерность, что и отражает формула (5).

Определим фрактальную размерность функции, описанной в теореме, следующим образом.

Если $f(x_n) - f(x) = O((\Delta x)^h)$, с наибольшим h , то $\dim f(x) = 2 - h$.

Поместим приращение Δx в интервал вида $(b^{-n-1}; b^{-n})$. Используя прежнее разбиение приращения функции на три слагаемых, имеем

$$|f(x + \Delta x) - f(x)| < a^n + \frac{\lambda(ab)^n}{ab-1} \Delta x + \frac{a^{n+1}}{1-a}, \text{ следовательно,}$$

$$\begin{aligned} \left| \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \right| &< \frac{a^n}{\Delta x} \left(1 + \frac{a}{1-a}\right) + \frac{\lambda(ab)^n}{ab-1} < \frac{a^n b^{n+1}}{1-a} + \frac{\lambda(ab)^n}{ab-1} = (ab)^n \left(\frac{b}{1-a} + \frac{\lambda}{ab-1} \right) = \\ &= b^{n \log_b(ab)} \left(\frac{b}{1-a} + \frac{\lambda}{ab-1} \right) < \left(\frac{1}{\Delta x} \right)^{\log_b ab} \left(\frac{b}{1-a} + \frac{\lambda}{ab-1} \right), \end{aligned}$$

так как $\frac{1}{\Delta x} > b^n$.

Итак, $|f(x + \Delta x) - f(x)| < (\Delta x)^{1 - \log_b(ab)} \left(\frac{b}{1-a} + \frac{\lambda}{ab-1} \right)$, что позволяет сделать следующий

вывод:

$\dim f(x) = 2 - h = 2 - (1 - \log_b(ab)) = 1 + \log_b(ab)$, т.е. $1 < \dim f(x) < 2$, причем может принимать любое значение из указанного интервала.

Библиографический список

1. **Рыбников, К.А.** История математики. II / К.А. Рыбников. – М.: МГУ, 1963.
2. **Немыцкий, В.** Курс математического анализа / В. Немыцкий, М. Слудская, А. Черкасов. – М.-Л., 1940. Т. 1.
3. **Петерс, Э.** Фрактальный анализ финансовых рынков. Применение теории Хаоса в инвестициях и экономике / Э. Петерс. Интернет-трейдинг, 2004.
4. **Шибинский, В.М.** Фракталы и построение примеров нетривиальных функций // XVI международные Ломоносовские чтения: сб. научн. тр. – Архангельск: Поморский госуниверситет, 2004. С. 262–266.
5. **Шибинский, В.М.** Фрактал и построение всюду непрерывной, но нигде недифференцируемой функции // XVI международные Ломоносовские чтения: сб. научн. тр. – Архангельск: Поморский госуниверситет, 2004. С. 266–273.
6. **Демьянов, В.Ф.** Обобщение понятия производной в негладком анализе // Соросовский образовательный журнал. Математика. 1996. №5. С. 121–127.
7. **Вишик, М.И.** Фрактальная размерность множеств. Соросовский образовательный журнал. Математика. 1998. №1. С. 122–127.

Дата поступления
в редакцию 02.08.2011

L.N. Erofeeva

FRACTAL DIMENSION OF NONDIFFERENTIATED FUNCTIONS

Some examples of continuous nondifferentiated functions are given and their fractal dimension is found.

Key words: time series, nondifferentiated, fractal.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
Тел. 8 312 4367372
E-mail: rio@nntu.nnov.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- Статью необходимо сопроводить актом экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют в редакторе MS Equation 3 –12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, аннотации и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 3 (90)

Редакторы: **Т.В. Третьякова, Е.В. Комарова**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
тел.: 8-312-436-73-72, rio@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 29.08.2011. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 45. Уч.-изд. л. 41. Тираж 300 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 10312
Объединенный каталог «Пресса России»