

**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**

№ 1 (108)

Нижний Новгород 2015

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, 2015. № 1 (108). – 300 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), М.В. Ширяев (зам. гл. редактора), Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора),
О.В. Пугина (отв. редактор), А.В. Крылова (глав. редактор выпуска)

Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Д. Вавилов, А.М. Грошев, В.М. Галкин, А.Е. Жуков,
А.Б. Дарьенков, В.Е. Колотилин, А.А. Куркин, Д.Н. Лапаев, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов,
В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов, Е.А. Чернышов

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Федор Михайлович Митенков

(академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор ОКБМ Африкантов)

Заместитель председателя

Сергей Михайлович Дмитриев

(д-р техн. наук, проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Ответственный секретарь

Владимир Викторович Беляков

(д-р техн. наук, проф., начальник УНИИР)

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ СОВЕТА

Дмитрий Ефимович

Пелиновский

Ласло Палкович

Варлаки Петер

Виджай Кумар

Ялчнер Ахмед К.

PhD, проф. Математики, Университет Мак Мастера,
Хамилтон, Онтарио, Канада

Проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

Проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

Д-р философии, проф. – исследователь,

Шив Надар Университет, Индия

Д-р, профессор, METU, директор OERC, Турция

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Гуляев Юрий Васильевич

Гринберг Руслан Семенович

Бабанов Николай Юрьевич

Ширяев

Михаил Виссарионович

Ивашкин

Евгений Геннадьевич

Митяков Сергей Николаевич

Куркин Андрей Александрович

Воротынцев

Владимир Михайлович

Кондратьев

Вячеслав Васильевич

Рындык Александр Георгиевич

Раевский Сергей Борисович

Кошелев Олег Сергеевич

Кулепов Виктор Федорович

Член Президиума РАН, академик, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор Института радиоэлектроники РАН им. В.А. Котельникова

Член-кор. РАН, д-р эконом. наук, проф.,

Директор Института ФГБУН экономики РАН

Канд. техн. наук, доцент, проректор на научной работе НГТУ

Канд. техн. наук, доцент, проректор по развитию НГТУ

Канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе НГТУ

Д-р физ.-мат. наук, проф., директор ИНЭУ НГТУ

Д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой ПМ

Д-р хим. наук, проф., зав. кафедрой ФТМКЭТ

Член-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВСТ

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИР

Д-р техн. наук, профессор

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТКОДСП

Д-р техн. наук, профессор, директор ДПИ (филиал НГТУ)

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания:
ПИ № ФС 77-56417

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2015

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.E. ALEXEEV

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

№ 1 (108)

Nizhni Novgorod 2015

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD

N.Y. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), M.V. Shiryaev (Deputy Editor-in-Chief),
Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief), V.V. Belyakov (Executive Secretary),
O.V. Pugina (Executive Editor), A.V. Krylova (Executive Editor),

Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.D. Vavilov, V.M. Galkin, A.M. Groshev, A.B. Darenkov,
A.E. Zhukov, V.Y. Kolotilin, A.A. Kurkin, D.H. Lapaev, M.G. Mikhalenko,
A.Y. Panov, V.P. Khranilov, A.E. Khrobostov, Y.A. Chernyshov,

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

Fedor Mikhailovich Mitenkov

Member of Russian Academy of Sciences
Head of OAO I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
(Nizhniy Novgorod, Russia)

Vice – chairman

Sergei Mikhailovich Dmitriev

Doctor of technical sciences, professor
Rector of NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Executive Secretary

Vladimir Viktorovich Beliakov

Doctor of technical sciences, professor
Head of NSTU Research and innovative works office
(Nizhniy Novgorod, Russia)

*Dmitri Efimovich
Pelenovski
Laslo Palkovich
Varlaki Peter
Vidzhai Kumar*

Foreign members of Editorial council

PhD, Doctor of mathematical sciences, professor
McMaster University (Ontario, Canada)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
PhD, Doctor of philosophical sciences, professor
Shiv Nadar University (India)
professor, head of Ocean Engineering Research Center
Middle East Technical University (Turkey)

Ialchner Akhmed K.

Members of Editorial council

Guliaev Yuri Vasilevich

Member of Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Institute of Radio Engineering and Electronics (IREE) named after Academician V.A. Kotelnikov
(Moscow, Russia)

Grinberg Ruslan Semenovich

Associate member of the Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Director of the Institute for International Economic and Political Studies at the Russian Academy
of Sciences
(Moscow, Russia)

Babanov Nikolai Iurevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Shiriaev

Mikhail Vissarionovich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for perspective projects
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ivashkin

Evgeni Gennadevich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for teaching and learning enhancement
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Mitiakov Sergei Nikolaevich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kurkin Andrey Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Vorotyntsev

Vladimir Mikhailovich

Doctor of chemical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kondratev

Viacheslav Vasilevich

Associate member of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ryndyk Alexander Georgievich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Raevski Sergei Borisovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Koshelev Oleg Sergeevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kulepov Viktor Fedorovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

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

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

№ 1 (108)

Нижний Новгород 2015

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, 2015. № 1 (108). – 300 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), М.В. Ширяев (зам. гл. редактора), Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора),
О.В. Пугина (отв. редактор), А.В. Крылова (глав. редактор выпуска)

Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Д. Вавилов, А.М. Грошев, В.М. Галкин, А.Е. Жуков,
А.Б. Дарьенков, В.Е. Колотилин, А.А. Куркин, Д.Н. Лапаев, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов,
В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов, Е.А. Чернышов

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Федор Михайлович Митенков

(академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор ОКБМ Африкантов)

Заместитель председателя

Сергей Михайлович Дмитриев

(д-р техн. наук, проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Ответственный секретарь

Владимир Викторович Беляков

(д-р техн. наук, проф., начальник УНИИР)

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ СОВЕТА

Дмитрий Ефимович

Пелиновский

Ласло Палкович

Варлаки Петер

Виджай Кумар

Ялчнер Ахмед К.

PhD, проф. Математики, Университет Мак Мастера,
Хамильтон, Онтарио, Канада

Проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

Проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

Д-р философии, проф. – исследователь,

Шив Надар Университет, Индия

Д-р, профессор, METU, директор OERC, Турция

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Гуляев Юрий Васильевич

Гринберг Руслан Семенович

Бабанов Николай Юрьевич

Ширяев

Михаил Виссарионович

Ивашкин

Евгений Геннадьевич

Митяков Сергей Николаевич

Куркин Андрей Александрович

Воротынцев

Владимир Михайлович

Кондратьев

Вячеслав Васильевич

Рындык Александр Георгиевич

Раевский Сергей Борисович

Кошелев Олег Сергеевич

Кулепов Виктор Федорович

Член Президиума РАН, академик, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор Института радиоэлектроники РАН им. В.А. Котельникова

Член-кор. РАН, д-р эконом. наук, проф.,

Директор Института ФГБУН экономики РАН

Канд. техн. наук, доцент, проректор на научной работе НГТУ

Канд. техн. наук, доцент, проректор по развитию НГТУ

Канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе НГТУ

Д-р физ.-мат. наук, проф., директор ИНЭУ НГТУ

Д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой ПМ

Д-р хим. наук, проф., зав. кафедрой ФТМКЭТ

Член-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВСТ

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИР

Д-р техн. наук, профессор

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТКОДСП

Д-р техн. наук, профессор, директор ДПИ (филиал НГТУ)

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания:
ПИ № ФС 77-56417

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2015

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.E. ALEXEEV

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

№ 1 (108)

Nizhni Novgorod 2015

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD

N.Y. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), M.V. Shiryaev (Deputy Editor-in-Chief),
Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief), V.V. Belyakov (Executive Secretary),
O.V. Pugina (Executive Editor), A.V. Krylova (Executive Editor),

Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.D. Vavilov, V.M. Galkin, A.M. Groshev, A.B. Darenkov,
A.E. Zhukov, V.Y. Kolotilin, A.A. Kurkin, D.H. Lapaev, M.G. Mikhalenko,
A.Y. Panov, V.P. Khranilov, A.E. Khrobostov, Y.A. Chernyshov,

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

Fedor Mikhailovich Mitenkov

Member of Russian Academy of Sciences
Head of OAO I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
(Nizhniy Novgorod, Russia)

Vice – chairman

Sergei Mikhailovich Dmitriev

Doctor of technical sciences, professor
Rector of NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Executive Secretary

Vladimir Viktorovich Beliakov

Doctor of technical sciences, professor
Head of NSTU Research and innovative works office
(Nizhniy Novgorod, Russia)

*Dmitri Efimovich
Pelenovski
Laslo Palkovich
Varlaki Peter
Vidzhai Kumar*

Foreign members of Editorial council

PhD, Doctor of mathematical sciences, professor
McMaster University (Ontario, Canada)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
PhD, Doctor of philosophical sciences, professor
Shiv Nadar University (India)
professor, head of Ocean Engineering Research Center
Middle East Technical University (Turkey)

Ialchner Akhmed K.

Members of Editorial council

Guliaev Yuri Vasilevich

Member of Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Institute of Radio Engineering and Electronics (IREE) named after Academician V.A. Kotelnikov
(Moscow, Russia)

Grinberg Ruslan Semenovich

Associate member of the Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Director of the Institute for International Economic and Political Studies at the Russian Academy
of Sciences
(Moscow, Russia)

Babanov Nikolai Iurevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Shiriaev

Mikhail Vissarionovich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for perspective projects
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ivashkin

Evgeni Gennadevich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for teaching and learning enhancement
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Mitiakov Sergei Nikolaevich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kurkin Andrey Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Vorotyntsev

Vladimir Mikhailovich

Doctor of chemical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kondratev

Viacheslav Vasilevich

Associate member of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ryndyk Alexander Georgievich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Raevski Sergei Borisovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Koshelev Oleg Sergeevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kulepov Viktor Fedorovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

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

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.061.2(075.8)

В.И. Есипенко, Л. Ю. Богомолова

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ДЧМ ПРИ НАЛИЧИИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ПОМЕХИ В КАНАЛЕ СВЯЗИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводится теоретическая и экспериментальная оценка помехоустойчивости системы связи с дискретной частотной манипуляцией (ДЧМ) при наличии в канале связи белого шума и сосредоточенной по спектру помехи. Развита методика оценки помехоустойчивости, которая будет использована в следующих работах, посвящённых новому методу повышения помехоустойчивости на основе дополнительной нелинейной обработки рассматриваемой смеси сигнала и помех.

Ключевые слова: частотная манипуляция, приём, гауссовский шум, сосредоточенная по спектру помеха, узкополосная фильтрация, оценка помехоустойчивости.

Стремительный рост числа радиосредств в настоящее время выдвигает ряд чрезвычайно трудных проблем. Одна из них состоит в необходимости обеспечить эффективную работу систем связи в условиях «перенаселенности» эфира. Это в свою очередь требует ответа на вопрос, как обеспечить уменьшение взаимных помех между радиосредствами, работающими совместно как в пространстве, так и во времени [1].

В данной работе выполнена оценка помехоустойчивости приёма сигналов с двоичной частотной манипуляцией (ДЧМ) при некогерентном приёме без умножения частоты при наличии на входе гауссовского шума и сосредоточенной по спектру помехи в одном из его подканалов [2, 3]. Структурная схема приёмника приведена на рис. 1.

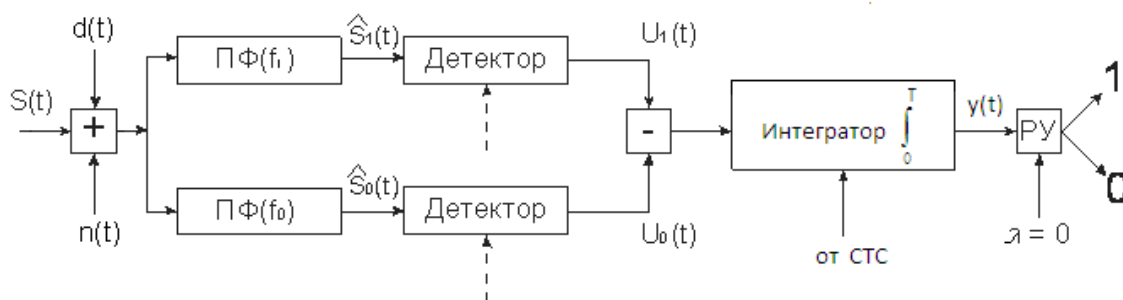


Рис. 1. Схема демодулятора сигнала ДЧМ

На вход поступает аддитивная смесь ДЧМ сигнала, узкополосной помехи (в одном из подканалов) и гауссовского шума. Полосовые фильтры настроены соответственно на частоты f_1 и f_0 с полосами пропускания, равными ширине спектра сигнала. Детекторы выделяют огибающие $U_1(t)$ и $U_0(t)$ соответствующих входных высокочастотных сигналов, а вычита-

ющее устройство и интегратор формируют низкочастотный сигнал $y(t)$ на входе решающего устройства (РУ).

Можно показать, что решающее устройство имеет равный нулю пороговый уровень. Оценим помехоустойчивость приёма сигнала, имеющего следующие параметры:

P_A, B^2	α, c^{-1}	Способ передачи	Частота, МГц		Способ приема	Функция корреляции сообщения $B_A(\tau)$
			f_0	f_1		
4,4	20	ЧМ	2,9	3,2	НП	* $P_A \cdot e^{-\beta \cdot |\tau|} \cdot \cos \omega_a \tau, \beta = \alpha \cdot 10^3,$ $\omega_a = \pi\beta / 3$

* $P_A = \sigma_A^2$ – мощность (дисперсия) сообщения; β – показатель затухания функции корреляции.

Энергетический спектр и функция корреляции связаны между собой парой преобразований Винера-Хинчина. Спектральная плотность мощности сообщения определяется выражением

$$G_A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B_A(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = P_A \beta \left(\frac{1}{\beta^2 + (\omega_a + \omega)^2} + \frac{1}{\beta^2 + (\omega - \omega_a)^2} \right). \quad (1)$$

С учётом (1) начальная энергетическая ширина спектра сообщения

$$\Delta\omega_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} G_A(\omega) d\omega}{G_{\max}} = 52995,8 \text{ рад/с}. \quad (2)$$

Считая, что исходное сообщение воздействует на идеальный фильтр нижних частот (ИФНЧ) с единичным коэффициентом передачи и полосой пропускания, равной начальной энергетической ширине спектра сообщения, и, полагая, что для передачи сигнала с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) по непрерывному каналу связи (НКС) используется гармонический переносчик, рассчитаем спектр модулированного сигнала и его начальную ширину.

Из (1) и (2) следует, что интервал временной дискретизации отклика ИФНЧ и частота его временной дискретизации определяются так:

$$\Delta t = \frac{\pi}{\Delta\omega_0} \Rightarrow \Delta t = 5,996 \cdot 10^{-5} \text{ с}, \quad (3)$$

$$f_\delta = \frac{1}{\Delta t} \Rightarrow f_\delta = 16676,66 \text{ Гц}. \quad (4)$$

На интервале дискретизации Δt при блочном безызбыточном кодировании должно уместиться l элементарных кодовых символов, где $l = \log_2 L$ ($L=16$ число уровней квантования) [4,5]. Следовательно, длительность кодового символа должна быть равна $\tau_u = \Delta t / L = \Delta t / \log_2 L$. Так как ширина спектра элементарного прямоугольного импульса обратно пропорциональна τ_u , то с учетом (1) – (4) ширина спектра сигнала с ИКМ определяется следующим образом:

$$\Delta f_{\text{ИКМ}} = f_\delta k_1 \log_2 L, \text{ где } k_1 = 1.667 \Rightarrow \Delta f_{\text{ИКМ}} = 111200 \text{ Гц}. \quad (5)$$

Модель сигнала ДЧМ можно записать так:

$$b_1 = 1, \dots S_{\text{дчм}}(t) = \begin{cases} s_1(t) = U_m \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \dots 0 \leq t \leq T, \\ s_0(t) = U_m \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \dots T \leq t \leq 2T, \end{cases} \quad (6)$$

где φ_0 и φ_1 – случайные фазы с равномерным распределением в интервале $(0, 2\pi)$, но постоянные для каждого интервала T ; их влияние при данном рассмотрении несущественно, поэтому в дальнейшем мы их опускаем.

Учитывая (5) и (6), для ширины спектра сигнала ДЧМ получим [3]

$$\Delta f_s = \Delta f_{\text{дчм}} = f_1 - f_0 + 2\Delta f_{\text{укм}} = 0,5224 \text{ МГц.} \quad (7)$$

Полагая, что на интервале $(0, T)$ передаётся сигнал $s_1(t)$ (см. (6) и (7)), сосредоточенная по спектру помеха $d_1(t)$ имеет место в подканале с центральной частотой $\omega_1 = 2\pi f_1$ и отстроена от частоты ω_1 на величину $\Delta\omega$, т.е. $\omega_n = \omega_1 + \Delta\omega$, а узкополосный гауссовский шум $n_i(t) = V(t)\cos(\omega_i t + \varphi_i)$ имеет место в каждом из подканалов. Запишем результирующий случайный процесс $x_1(t)$ в виде [3]

$$\begin{aligned} x_1(t) &= s_1(t) + n_1(t) + d_1(t) = U_m \cos(\omega_1 t) + V(t) \cos(\omega_1 t + \varphi_{u,1}) + D \cos(\omega_n t) = \\ &= U_m \cos \omega_1 t + V(t) \cos \varphi_{u,1} \cos \omega_1 t - V(t) \sin \varphi_{u,1} \sin \omega_1 t + D \cos \Delta\omega t \cos \omega_1 t - \\ &- D \sin \Delta\omega t \sin \omega_1 t = [U_m + A(t) + D \cos \Delta\omega t] \cos \omega_1 t - [B(t) + D \sin \Delta\omega t] \sin \omega_1 t \end{aligned} \quad (8)$$

где $U_m, V(t) \in D$ – амплитуды полезного сигнала $s_1(t)$, гауссовского шума и сосредоточенной помехи соответственно; $A(t) = V(t) \cos \varphi_{u,i}$ и $B(t) = V(t) \sin \varphi_{u,i}$ – гауссовские огибающие квадратурных компонент узкополосного гауссовского шума с параметрами $m_A = m_B = 0$ и $\sigma_A^2 = \sigma_B^2 = \sigma_n^2$, $i = \overline{0,1}$.

Огибающая $U_1(t)$ суммарного процесса $x_1(t)$ в (8) определится так:

$$U_1(t) = \sqrt{(U_m + A(t) + D \cdot \cos \Delta\omega t)^2 + (B(t) + D \cdot \sin \Delta\omega t)^2}. \quad (9)$$

Найдём плотность распределения огибающей (ПРВ) $U_1(t)$ в (9). Введём следующие обозначения и определим соответствующие ПРВ [3]:

$X_1(t) = U_m = \text{const}$, соответствующая ПРВ

$$p(X_1) = \delta(X_1 - U_m), \quad (10)$$

$X_2(t) = A(t)$ – гауссовская величина, соответствующая ПРВ

$$p(X_2) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{X_2^2}{2\sigma^2}\right), \quad (11)$$

$X_3(t) = D \cos(\Delta\omega t)$, соответствующая ПРВ $p(X_3) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{D^2 - X_3^2}}, & |X_3| \leq D, \\ 0, & |X_3| > D \end{cases}$, (12)

$X_4(t) = B(t)$ – гауссовская величина, соответствующая ПРВ $p(X_4) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{X_4^2}{2\sigma_n^2}\right)$, (13)

$X_5(t) = D \sin(\Delta\omega t)$, соответствующая ПРВ $p(X_5) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{D^2 - X_5^2}}, & |X_5| \leq D, \\ 0, & |X_5| > D \end{cases}$, (14)

$\mu(t) = X_1 + X_2$, соответствующая ПРВ $W_1(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} p(X_1)p(\mu - X_1)dX_1 =$
 $= \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(X_1 - U_m) \cdot \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\mu - X_1)^2}{2\sigma_n^2}\right] dX_1 = \frac{1}{\sigma_n \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu - U_m)^2}{2\sigma_n^2}\right], \quad (15)$

$\mu_1(t) = \mu(t) + X_3$, соответствующая ПРВ

$$\begin{aligned}
 W_1(\mu_1) &= \int_{-\infty}^{+\infty} W_1(\mu) \cdot p(\mu_1 - \mu) d\mu = \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\mu - U_m)^2}{2\sigma_x^2}\right] \cdot \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 - (\mu_1 - \mu)^2}} d\mu = \\
 &= \int_{-D}^{+D} \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 - X_3^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[(\mu_1 - X_1) - U_m]^2}{2\sigma_x^2}\right\} dX_3 = \\
 &= \int_{-D}^{+D} \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 - X_3^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[X_3 - (\mu_1 - U_m)]^2}{2\sigma_x^2}\right\} dX_3.
 \end{aligned} \tag{16}$$

$\mu_2(t) = X_4 + X_5 = B(t) + D \cdot \sin \Delta\omega t$, соответствующая ПРВ находится аналогично

$$W_1(\mu_2) = \int_{-D}^{+D} \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 - X_5^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\mu_2 - X_5]^2}{2\sigma_x^2}\right\} dX_5. \tag{17}$$

Для вычисления ПРВ огибающей $U_1(t)$ необходимо найти ПРВ квадратов следующих процессов ((10)–(17)): $H(t) = (U_m + A(t) + D \cdot \cos \Delta\omega t)^2 = [\mu_1(t)]^2$,

$$G(t) = (B(t) + D \cdot \sin \Delta\omega t)^2 = [\mu_2(t)]^2. \tag{18}$$

Воспользовавшись в (18) функциональным преобразованием случайных величин [3], получим соответствующие ПРВ $W_1(H)_H$ и $W_1(G)_G$:

$$W_1(H)_H = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{H}} [W(\sqrt{H})_{\mu_1} + W(-\sqrt{H})_{\mu_1}] & , H \geq 0 \\ 0 & , H < 0 \end{cases}, \tag{19}$$

$$W_1(G)_G = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{G}} [W(\sqrt{G})_{\mu_2} + W(-\sqrt{G})_{\mu_2}] & , G \geq 0 \\ 0 & , G < 0 \end{cases}, \tag{20}$$

Из (9) и (18) следует, что

$$U_1^2(t) = H(t) + G(t) = X(t), \quad U(t) \geq 0; \quad X(t) \geq 0. \tag{21}$$

Тогда [1], согласно (19) и (20), имеем

$$W_1(X) = W_1(U_1^2) = \int_{-\infty}^{\infty} W_1(H)_H W_1(U_1^2 - H)_G dH = \int_{-\infty}^{\infty} W_1(H)_H W_1(X - H)_G dH. \tag{22}$$

Из (21) для огибающей имеем

$$U_1(t) = \sqrt{X(t)}. \tag{23}$$

Обратная функция $X(t) = U_1^2(t)$. Якобиан преобразования

$$\frac{dX}{dU_1} = 2U_1. \quad (24)$$

Искомая ПРВ огибающей $U_1(t)$ определится выражением

$$W_1(U_1)_{cn\Sigma} = W_1(X = U_1^2)2U_1 = 2U_1 \int_{-\infty}^{\infty} W_1(H)_H W_1(U_1^2 - H)_G dH. \quad (25)$$

В подканале без сигнала имеет место только шум и огибающая распределена по закону Рэлея [7]

$$W_1(U_n) = \frac{U_n}{\sigma_x^2} \exp\left(-\frac{U_n^2}{2\sigma_x^2}\right), U_n \geq 0. \quad (26)$$

С учётом изложенного вероятность ошибочного приёма при передаче «1» определится так [3, 7, 8]:

$$P(0/1) = \int_0^{\infty} W_1(U_1)_{cn\Sigma} \left[\int_{U_1}^{\infty} W_1(U_n) dU_n \right] dU_1. \quad (27)$$

При передаче «0» вероятность ошибочного приёма определится так:

$$P(1/0) = \int_0^{\infty} W_1(U_{cn}) \left[\int_{U_{cn}}^{\infty} W_1(U_{n\Sigma}) dU_{n\Sigma} \right] dU_{cn}, \quad (28)$$

где $W_1(U_{cn}) = \frac{U_{cn}}{\sigma_x^2} \exp\left[-\frac{U_m^2 + U_{cn}^2}{2\sigma_x^2}\right] I_0\left(\frac{U_m U_{cn}}{\sigma_x^2}\right)$ – ПРВ Райса; U_{cn} – огибающая суммы сигнала и шума; $W_1(U_{n\Sigma}) = W_1(U_1)_{cn\Sigma/U_m=0}$ – ПРВ суммы узкополосного шума и сосредоточенной по спектру помехи в подканале центральной частотой ω_1 .

Оптимальный порог λ для детектирования определен в [1] исходя из того, что он обеспечивает минимальную вероятность ошибки при действии только шумовой помехи, т.е.

$$P_{\text{ош}} = P_{\text{ош}}(\lambda) = p(1) \cdot p(0/1, \lambda) + p(0) \cdot p(1/0, \lambda) = \min P_{\text{ош}}(\lambda), \quad (29)$$

где $P_{\text{ош}}(\lambda)$ – полная вероятность принятия ошибочного решения; $p(1)$ – вероятность передачи символа «1»; $p(0)$ – вероятность передачи символа «0»; $p(0/1, \lambda)$ – вероятность ошибочного принятия решения о передаче 0, если передавалась «1»; $p(1/0, \lambda)$ – вероятность ошибочного принятия решения о передаче 1, если передавался «0».

Будем считать, что априорные вероятности передаваемых символов равны $p(1) = p(0) = 0,5$, тогда, согласно [1] $\lambda_{\text{opt}} = 0$, полную вероятность ошибочного приёма находим для каждого значения h^2 , учитывая, что амплитуда полезного сигнала является постоянной и равна, например, 1 В.

Найдём численные значения вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ [8, 9, 10] при различных отношениях мощностей сигнала и шума (h^2), а также различных значениях амплитуды узкополосной помехи (D). Полученные результаты подтвердим функциональным моделированием. При этом вероятности ошибок $P(0/1)$ и $P(1/0)$ оцениваются при статистических испытаниях.

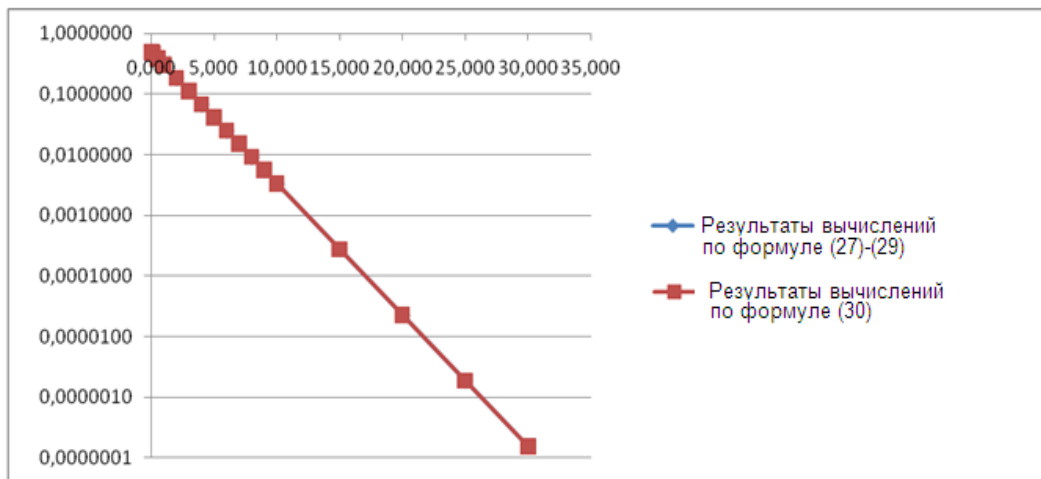
Р_{ош} находится при (22) – (28) из формулы (29).

Отстройку частоты узкополосной помехи от частоты полезного сигнала (для передачи символа «1») будем также рассматривать при различных значениях:

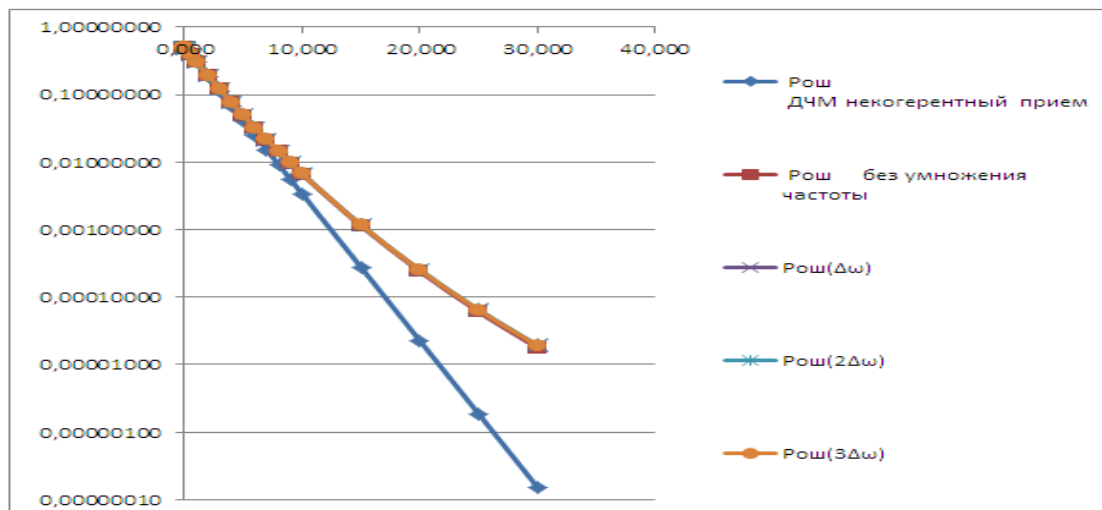
- $P_{ош}(\Delta\omega)$ – значение ошибки приема двоичных символов при $\Delta f = \frac{111200}{3}$ Гц;
- $P_{ош}(2\Delta\omega)$ – значение ошибки приема двоичных символов при $\Delta f = \frac{2 \cdot 111200}{3}$ Гц;
- $P_{ош}(3\Delta\omega)$ – значение ошибки приема двоичных символов при $\Delta f = \frac{3 \cdot 111200}{3}$ Гц).

При принятых условиях вероятность ошибки при отсутствии сосредоточенной помехи ($D = 0$) определяется следующим образом [8, 10]:

$$P_{ош} = 0,5 \exp(-0,5h^2). \tag{30}$$



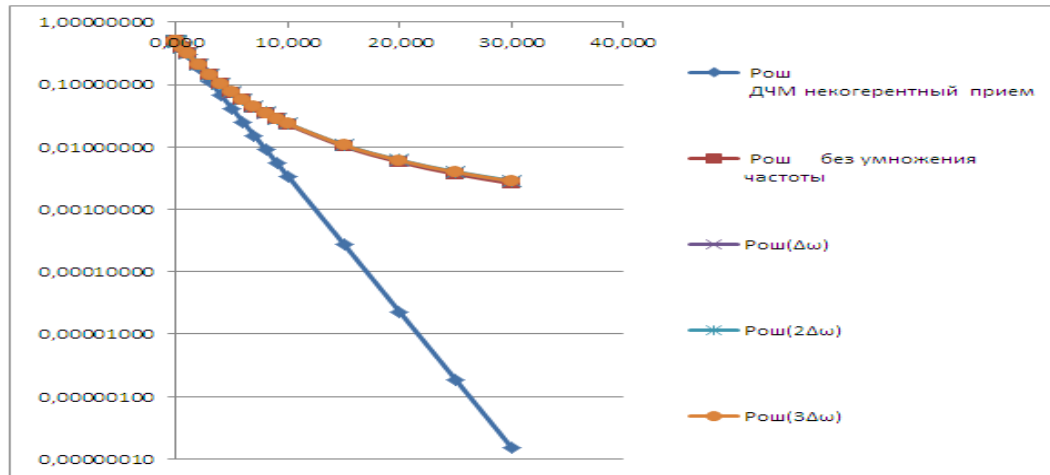
а)



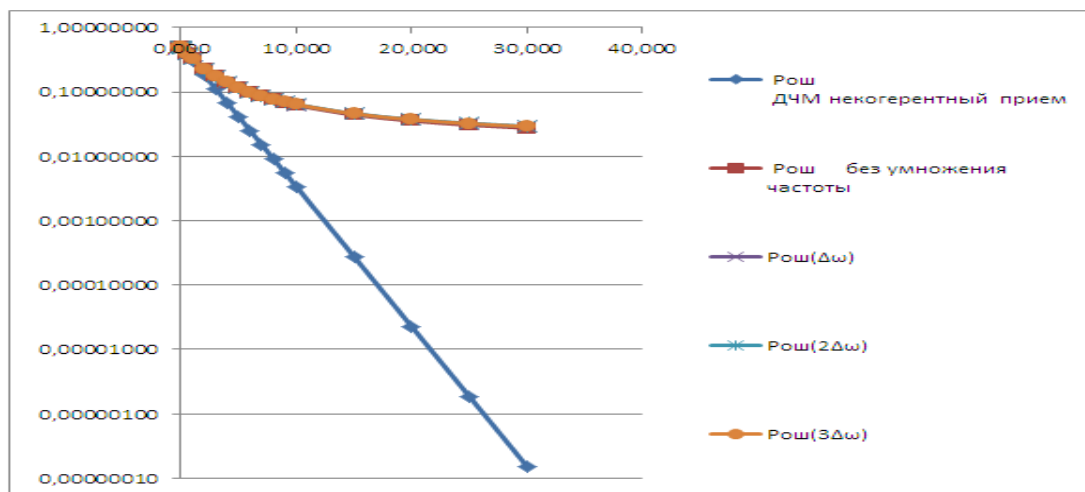
б)

Рис. 2. Зависимость вероятности ошибочного приема $P_{ош}$ передаваемых битов от отношения мощностей полезного сигнала и шума (h^2) при постоянном значении амплитуды узкополосной помехи:

a – ($D=0,0$ В, $\Delta\omega = 0$); *б* – ($D=0,2$ В); *в* – ($D=0,4$ В); *г* – ($D=0,6$ В)



в)



г)

Рис. 2. (Окончание)

Для подтверждения правильности полученных результатов сравним значения вероятности ошибок, полученных из (22)–(24) и (25). Результаты вычислений, полученные по (27)–(29) и (30), отображены графически на рис. 2. Там же отображены результаты эксперимента.

Выводы

1. Развита методика оценки помехоустойчивости системы связи с ДЧМ при наличии в канале связи сосредоточенной по спектру помехи.
2. В работе рассмотрен наиболее худший случай, когда при равенстве частот посылки полезного сигнала и сосредоточенной по спектру помехи они противофазны.
3. Экспериментально показано, что с увеличением амплитуды сосредоточенной помехи помехоустойчивость приёма полезного сигнала существенно снижается.

Библиографический список

1. **Теплов, Н.Л.** Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации / Н.Л. Теплов. – М.: Связь, 1964. – 159 с.
2. **Стейн, С.** Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений / С. Стейн, Дж. Джонс. – М.: Связь. – 376 с.
3. **Левин, Б.Р.** Статистическая радиотехника / Б.Р. Левин. – М.: Сов. радио, 1962. – 250 с.

4. **Гоноровский, И.С.** Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Сов. радио, 1971. – 672 с.
5. **Шварцман, В.О.** Теория передачи дискретной информации / В.О. Шварцман, Г.А. Емельянов. – М.: Связь, 1979. – 424 с.
6. **Тихонов, В.И.** Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И.Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
7. **Баскаков, С.И.** Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 2001. – 448 с.
8. **Коржик, В.И.** Расчёт помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: справочник / В.И. Коржик, Л.М. Финк, К.Н. Щелкунов. – М.: Радио и связь, 1981. – 232 с.
9. **Градштейн, И.С.** Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Наука, 1971. – 1001 с.
10. Теория электрической связи / А.Г. Зюко [и др.]. – М.: Радио и связь, 1998. – 432 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2015*

V. I. Esipenko, L. Y. Bogomolova

**EVALUATION OF THE IMMUNITY OF THE COMMUNICATION SYSTEM
DFM IN THE PRESENCE OF CONCENTRATED INTERFERENCE
IN THE COMMUNICATION CHANNEL**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Theoretically and experimentally to assess the immunity of the communication system DFM in the presence of concentrated on the spectrum of interference in the communication channel.

Design/methodology/approach: Developed methodology for evaluating noise immunity.

Findings: Interpretation of study results. Shown significant reduction in noise with increasing amplitude compact spectrum interference.

Research limitations/implications: The results will be used in subsequent works.

Originality/value: Will be developed a new method to improve noise immunity on the basis of additional non-linear processing of the mixture signal, noise and concentrated interference.

Key words: communication system, communication channel, shown significant reduction, compact spectrum, non-linear processing, mixture signal.

УДК 621.372

Б.А. Абубакиров¹, Л.В. Когтева², А.Е. Львов¹, С.В. Панков¹, Г.И. Шишков²**ВОЛНОВОДНЫЕ И МИКРОПОЛОСКОВЫЕ НАГРУЗКИ
В РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ**

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный
институт «Кварц» им. А.П. Горшкова¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Объект исследования: волноводные нагрузки, микрополосковые нагрузки.

Цель: Описать принципы работы и конструкции современных волноводных и микрополосковых нагрузок СВЧ и КВЧ диапазонов, в том числе эталонных, показать их применение в радиоизмерительной технике.

Результаты: Приведены технические характеристики волноводных и микрополосковых нагрузок различного назначения.

Область применения: Нагрузки применяются при конструировании различных узлов (делителей мощности, направленных ответвителей, стробоскопических преобразователей и др.), обеспечивают прецизионные измерения СВЧ-систем и волноводных устройств, используются при калибровке измерителей комплексных коэффициентов отражения и передачи.

Ключевые слова: волновод, микрополосковая линия, нагрузка, поглотитель, коэффициент отражения, коэффициент стоячей волны напряжения.

Введение

В настоящей статье рассмотрены волноводные и микрополосковые нагрузки как оконечные устройства волноведущих трактов радиоизмерительных систем преимущественно СВЧ- и КВЧ-диапазонов, служащие для полного или частичного поглощения энергии электромагнитных волн. Такие нагрузки, чаще всего, являются широкополосными устройствами (в частности, волноводные нагрузки обычно работают во всем рабочем диапазоне частот применяемого волновода) и предназначены для поглощения передаваемой энергии мощностью порядка 1 Вт и менее.

Волноводные нагрузки широко используются в радиоизмерительной технике в делителях мощности, направленных ответвителях, мостах, в качестве калибровочных устройств таких приборов, как измерители комплексных коэффициентов отражения и передачи, в диодных преобразователях частоты и т.д.

Волноводные нагрузки, как и нагрузки в коаксиальных трактах, в зависимости от назначения и конструктивного исполнения можно классифицировать:

- согласованные, служащие для полного поглощения передаваемой по тракту энергии;
- рассогласованные фиксированные нагрузки, служащие мерой коэффициента отражения;
- подвижные согласованные нагрузки, являющиеся эталонами волнового сопротивления;
- нагрузки с фиксированной величиной коэффициента стоячей волны (КСВН).

Микрополосковые нагрузки нашли применение в интегральных схемах, диодных преобразователях частоты СВЧ и КВЧ диапазонов, направленных ответвителях, как компактные оконечные устройства, работающие в широком диапазоне от постоянного тока до 18 ГГц.

Волноводные согласованные нагрузки

Волноводные согласованные нагрузки выполняют в виде короткозамкнутого отрезка волновода, в котором размещены поглощающие вставки различной формы (рис. 1). В некоторых волноводных нагрузках вставки имеют вид тонких диэлектрических пластин (гетинакс, керамика), покрытых слоем поглощающего вещества (графит, окись олова, металлы с высоким удельным сопротивлением и др.) (рис. 1, а). Пластины располагают параллельно

вектору \vec{E} поглощаемой волны. Такое положение вектора \vec{E} обуславливает возникновение в поглощающем веществе токов проводимости, наличие которых приводит к превращению энергии электромагнитной волны в тепловую энергию.

Для получения наименьшего значения КСВН в широкой полосе частот пластинам на входе придают клиновидную форму, которая подбирается экспериментально.

Существуют объемные поглощающие вставки (рис. 1, б, в, г), которые выполняются из композитных материалов, чаще всего, на основе карбонильного железа.

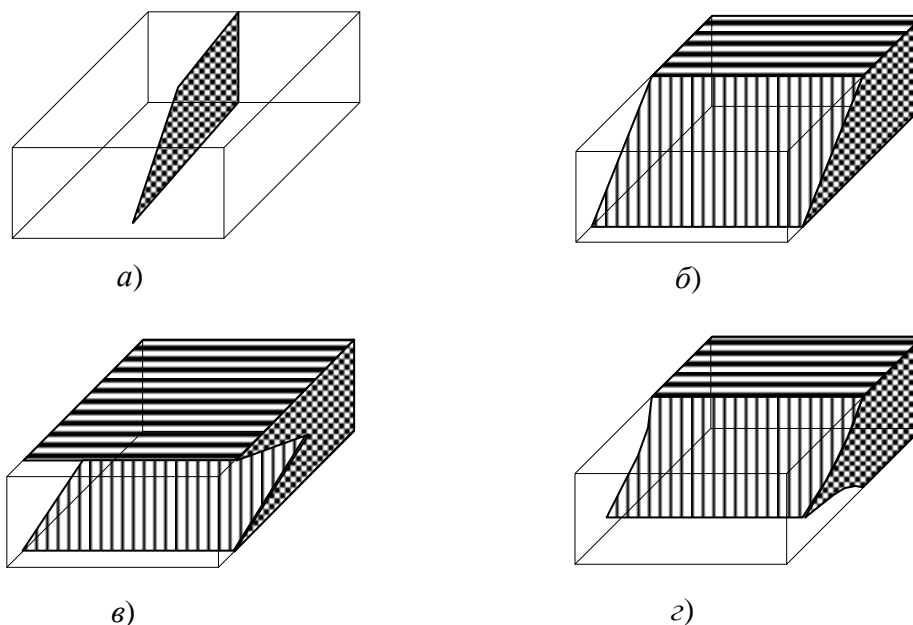


Рис. 1. Конструкции волноводных согласованных нагрузок

Для уменьшения отражений поглощающим вставкам придают вид клиньев или пирамид. Наименьшие отражения в широкой полосе частот обеспечиваются от вставок, входная часть которых имеет форму экспоненциального клина в плоскости вектора \vec{E} или в виде длинных скосов. Вставки должны вносить ослабление не менее 20–25 дБ.

Практически для изготовления объемного поглотителя выбирают негигроскопичный материал, который достаточно легко поддается механической обработке, одновременно сохраняя прочность. Исходя из этих требований, оптимальным является высокочастотный объемный материал [1], изготавливаемый из смеси полиэтилена и карбонильного железа (в порошковом виде) в весовых соотношениях 20 и 80 % соответственно. Из этого материала прессуются заготовки. На фрезерных станках из них изготавливаются клиновидные поглотители. Возможно производство непосредственно отливок готовых волноводных поглотителей. На рис. 2 изображена конструкция наиболее распространенного волноводного объемного поглотителя.

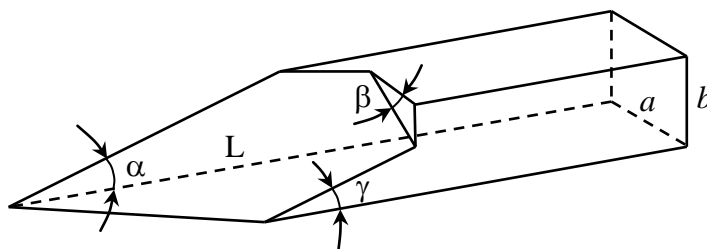


Рис. 2. Волноводный объемный поглотитель

В табл. 1 приведены размеры поглотителей для двух сечений волноводов. Для других сечений волноводов значения углов, приведенных в табл. 1, практически идентичны.

Таблица 1

Геометрические размеры волноводных объемных поглотителей

Сечение волновода $a \times b$, мм	L	α	β	γ
7,2×3,4	78	7°	18°40′	20°
35×15	164	6,5°	21°	17°

Размеры клиньев обрабатываются экспериментально: чем положе и длиннее клин, тем лучше он получается согласованным в нагрузке. Установлено, что длина клина должна быть не менее $2\lambda_{\max}$ (λ_{\max} – наибольшая длина волны в волноводе).

В миллиметровом диапазоне волн обеспечение в волноводной нагрузке КСВН не более 1,01 не является технически сложной задачей. У поглотителей на большие сечения волноводов (72×34 мм) получить КСВН $\cong 1,01$ уже сложнее, а на нижней частоте волновода КСВН возрастает до 1,03 – 1,04.

Коэффициент отражения волноводной нагрузки Γ_n складывается из коэффициента отражения поглотителя ($\Gamma_{\text{погл}}$) и волновода с фланцем (Γ_v):

$$\Gamma_n = \Gamma_{\text{погл}} + \Gamma_v.$$

Величина коэффициента отражения поглотителя $\Gamma_{\text{погл}}$ определяется экспериментально методом подвижного поглотителя, коэффициент отражения волновода складывается из допусков изготовления канала волновода $a \pm \Delta a$, $b \pm \Delta b$ и допусков присоединительных размеров фланцев, из-за которых соединительные волноводы смещаются на величины $\Delta a'$, $\Delta b'$ (рис. 3).

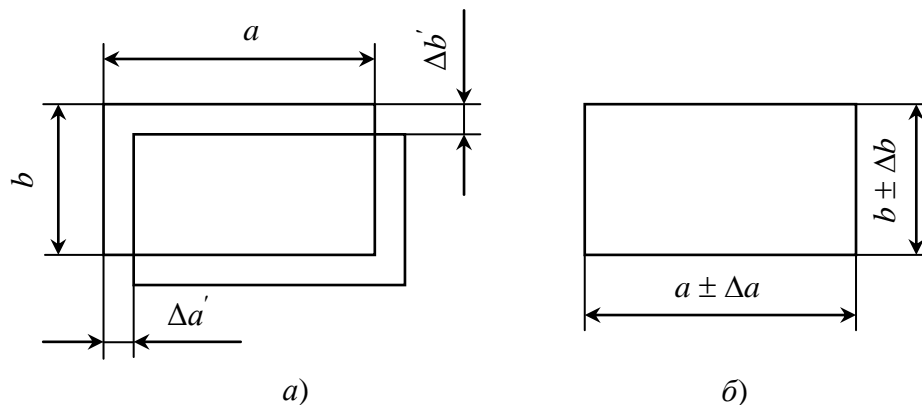


Рис. 3. Допуски на изготовление волноводов:

a – смещения волноводов из-за допусков фланцевых соединений $\Delta a'$, $\Delta b'$;
 b – допуски изготовления волноводного канала Δa , Δb

Значения Δa и Δb устанавливаются из разумного компромисса: чем меньше величины Δa и Δb , тем выше качество волноводного устройства, но тем труднее механическое изготовление. Значения $\Delta a'$ и $\Delta b'$ устанавливаются из правила собираемости волноводных фланцев [2]. В [2] приведены расчетные значения коэффициента отражения фланцевых соединений, пересчитанные в дБ для волноводов по стандарту России и по стандарту Международной электротехнической комиссии (МЭК). На рис. 4 приведен внешний вид, а в табл. 2 – технические характеристики [3] волноводных согласованных нагрузок миллиметрового диапазона волн.

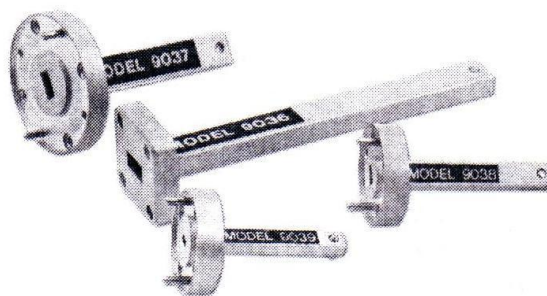


Рис. 4. Волноводные согласованные нагрузки миллиметрового диапазона волн

Таблица 2

Технические характеристики волноводных согласованных нагрузок

Модель	Диапазон частот, ГГц	Сечение волновода*, мм	КСВН	Габариты, мм
4-Э80369	17,44 – 25,86	11 × 5,5	1,03	29 × 29 × 90,5
4-Э80369-01	25,95 – 37,50	7,2 × 3,4	1,03	24 × 24 × 74,5
4-Э81030-01	37,50 – 53,57	5,2 × 2,6	1,03	∅ 20 × 39,6
4-Э81030	53,57 – 78,33	3,6 × 1,8	1,03	∅ 20 × 34,0
4-Э81037-01	78,33 – 118,1	2,4 × 1,2	1,05	∅ 16 × 23,3
4-Э81037	118,1 – 178,4	1,6 × 0,8	1,07	∅ 16 × 21,0

*Технические характеристики фланцев и волноводов даны по ГОСТ 13317-89.

Волноводные согласованные нагрузки разработаны на отечественных волноводах и фланцах, а также на волноводах и фланцах по стандартам МЭК.

Волноводные рассогласованные фиксированные нагрузки

Волноводные рассогласованные нагрузки используются в качестве меры коэффициента отражения. В волноводных линиях передачи рассогласованные нагрузки наиболее просто получают при использовании скачка волнового сопротивления линии. Высоту волновода b уменьшают в n раз до величины d , причем величина n соответствует величине требуемого КСВН. При соединении волноводов сечениями $a \times b$ и $a \times d$, когда волновод меньшего сечения $a \times d$ нагружен согласованным поглотителем, образуется скачок волнового сопротивления с требуемым КСВН (рис. 5).

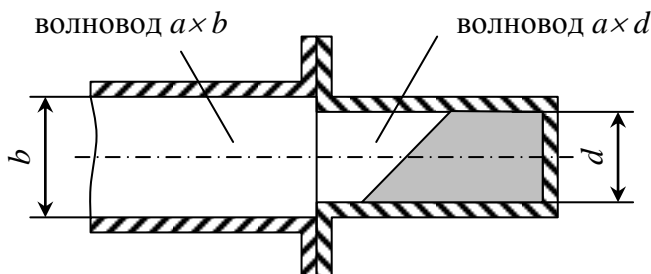


Рис. 5. Рассогласованная волноводная нагрузка со скачком волнового сопротивления

Преимущества такой конструкции следующие:

- небольшая частотная зависимость КСВН рассогласованной нагрузки;
- предельно простая и надежная конструкция;
- модуль и фаза коэффициента отражения строго рассчитываются на основе геометри-

ческих размеров (именно в этом состоит реализация эталона или меры коэффициента отражения);

- наличие возможности учета реальных допусков изготовления волновода $a \times d$, повышая при этом точность аттестации нагрузки по модулю и фазе коэффициента отражения.

К поглотителю нагрузки на волноводе сечением $a \times d$ предъявляются жесткие требования при изготовлении.

Расчет волноводных рассогласованных нагрузок со скачком волнового сопротивления приведен в [4]. Результаты расчета частотных зависимостей КСВН рассогласованных нагрузок даны на рис. 6 и рис. 7.

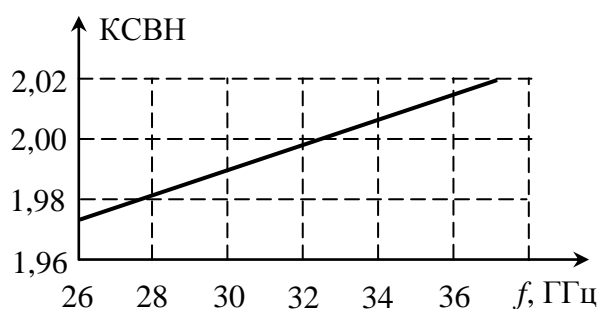


Рис. 6. Частотная зависимость нагрузки с фиксированным КСВН = 2 в диапазоне волновода сечением 7,2×3,4 мм

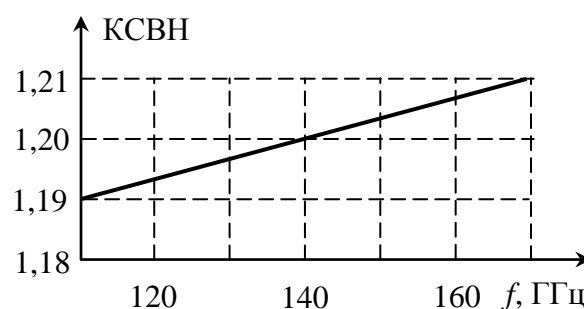


Рис. 7. Частотная зависимость нагрузки с фиксированным КСВН = 1,2 в диапазоне волновода WR-6 (сечение 1,05×0,825 мм)

По ГОСТ 13759-82 для волноводных нагрузок допускаются отклонения величины КСВН от номинального значения для высшего, первого класса в пределах $2,0 \pm 0,2$ и $1,2 \pm 0,1$. Достигнутые результаты существенно ниже допустимого уровня разброса номинального значения.

Предельная простота конструкции фиксированных нагрузок, основанной на скачке волнового сопротивления, обеспечила их массовое применение. Эти нагрузки включались в комплект серийно выпускаемых панорамных измерителей КСВН и ослаблений.

В табл. 3 приведены характеристики рассогласованных волноводных нагрузок с КСВН, равным 1,4 и 2,0 [3].

Таблица 3

Технические характеристики рассогласованных волноводных нагрузок

Модель	Диапазон частот, ГГц	Номинальное значение КСВН	Частотная зависимость КСВН	Погрешность аттестации КСВН, %	Габариты, мм
4-Э67009 4-Э67010	17,44 – 25,95	1,4 2,0	1,38 – 1,42 1,96 – 2,03	2,0 2,0	29×29×147
4-Э67024 4-Э67025	25,95 – 37,50	1,4 2,0	1,38 – 1,42 1,96 – 2,03	2,5 2,5	24×24×123
28-Э5.313 28-Э5.313-01	37,50 – 53,57	1,4 2,0	1,38 – 1,42 1,96 – 2,03	2,5 2,5	∅ 20×89
28-Э5.313-02 28-Э5.313-03	53,57 – 78,33	1,4 2,0	1,38 – 1,42 1,96 – 2,03	3,0 3,0	∅ 20×89
28-Э5.314 28-Э5.314-01	78,33 – 118,1	1,4 2,0	1,38 – 1,42 1,96 – 2,03	3,0 3,0	∅ 16×71

Волноводные подвижные согласованные нагрузки

Волноводные подвижные согласованные нагрузки используются как эталоны волнового сопротивления и обеспечивают прецизионные измерения параметров СВЧ- и КВЧ-систем и волноводных устройств. Их также называют скользящими, или нагрузками с переменной фазой коэффициента отражения.

Конструкция этих нагрузок предельно проста: вдоль высокочастотной волноводной линии перемещается объемный поглотитель. Поглотитель служит как средство сличения измеряемого объекта с волновым сопротивлением прецизионного волновода. Коэффициент отражения поглотителя нагрузки из результатов измерения исключается, поэтому к поглотителю не предъявляются высокие требования по согласованию.

Пусть требуется определить коэффициент отражения Γ_x перехода, фильтра, вентиля и т.д. Измеряемое изделие подключается к измерителю КСВН – ответвителю или к измерительной линии. К другому концу подключается подвижная согласованная нагрузка. Коэффициент отражения связан с величиной КСВН соотношением

$$\Gamma = \frac{\text{КСВН} - 1}{\text{КСВН} + 1}.$$

Перемещая поглотитель нагрузки, измеряют два экстремальных значения коэффициента отражения:

$$\Gamma_{\text{макс}} = \Gamma_x + \Gamma_{\text{погл}},$$

$$\Gamma_{\text{мин}} = \Gamma_x - \Gamma_{\text{погл}}.$$

Складывая два последних соотношения, получаем

$$\Gamma_x = \frac{\Gamma_{\text{макс}} + \Gamma_{\text{мин}}}{2}.$$

Таким образом, параметр $\Gamma_{\text{погл}}$ из результатов измерения исключается. При этих измерениях погрешность направленного ответвителя или измерительной линии не исключаются. Исключается только погрешность за счет коэффициента отражения согласованной нагрузки.

В НИИПИ «Кварц» подвижные нагрузки разработаны в диапазоне от 26 до 170 ГГц как на волноводах по стандартам России, так и по стандартам МЭК. Внешний вид нагрузки миллиметрового диапазона изображен на рис. 8. Технические характеристики приведены в табл. 4.

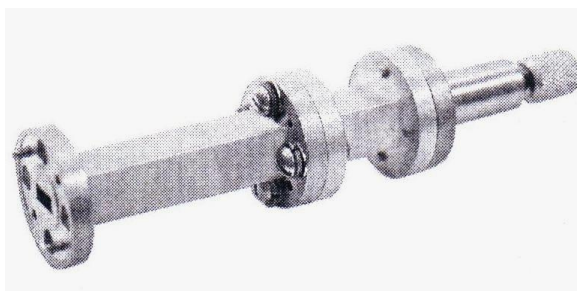


Рис. 8. Подвижная волноводная нагрузка миллиметрового диапазона

Таблица 4

Технические характеристики подвижных волноводных согласованных нагрузок

Модель	Диапазон частот, ГГц	Сечение волновода*, мм	КСВН поглотителя	Габариты, мм
4-Э67115	37,50 – 53,57	5,2×2,6	1,03	24×24×190,5
4-Э67116	53,57 – 78,33	3,6×1,8	1,03	24×24×190,5

*Фланцы и волноводы соответствуют ГОСТ 13317-89.

Подвижные нагрузки с величиной КСВН = 1,2, как показывает практика, наиболее удобны при измерении направленности ответвителей, развязки мостов, согласования переходов и т.п. Их целесообразно создавать по принципу «скачка» волнового сопротивления волноводного тракта (рис. 9). Поскольку для подвижной нагрузки не требуется точное знание коэффициента стоячей волны, величину КСВН в этом случае можно рассчитать по упрощенной формуле $КСВН = b/d = 1,2$.

В такой подвижной нагрузке тщательно должен быть изготовлен волноведущий канал. На рис. 9 приведена конструкция волноводной нагрузки с КСВН = 1,2. Расчеты показывают, что данная конструкция может быть выполнена для волноводов от больших сечений до сечения $3,6 \times 1,8$ мм включительно. На более высоких частотах требуются дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

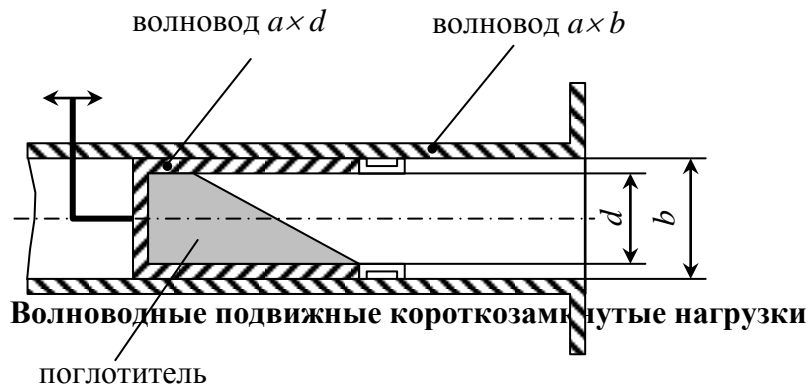


Рис. 9. Конструкция подвижной волноводной нагрузки с КСВН=1,2

Нагрузки волноводные короткозамкнутые (КЗ) подвижные являются образцовыми мерами модуля и фазы коэффициента отражения и, как правило, выполняются без использования гальванических контактов. На рис. 10 показана конструкция бесконтактной КЗ нагрузки.

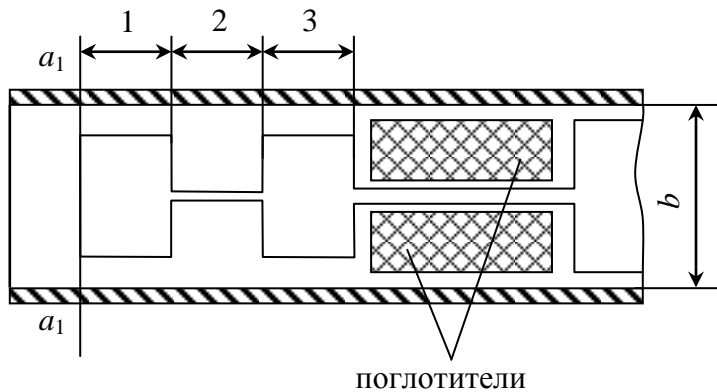


Рис. 10. Продольное сечение трехсекционного подвижного короткозамкнителя с поглотительной секцией

Плоскость короткого замыкания $a_1 - a_1$ достигается подключением своеобразной ступенчатой коаксиальной линии, длина секций которой равна $\lambda_{cp}/2$, где λ_{cp} – длина волны, соответствующая средней частоте рабочего диапазона волновода. Секции 1, 3 – линии с малым волновым сопротивлением, секция 2 – линия с высоким волновым сопротивлением. Известно, что четвертьволновая линия трансформирует большое сопротивление на выходе в короткое замыкание на входе (рис. 10, плоскость $a_1 - a_1$).

Малое волновое сопротивление в секциях 1 и 3 обеспечивается небольшим зазором у стенок волновода, большое волновое сопротивление секции 2 – небольшими размерами проводника (толщиной или сечением). На конце нагрузки закрепляется поглотитель для дополнительного поглощения просочившейся энергии. Чем больше перепад волновых сопротивлений секций 1 и 2, тем больше уровень КСВН можно ожидать в плоскости a_1 – a_1 .

На рис. 11 показано сечение низкоомной секции прямоугольного короткозамыкателя.

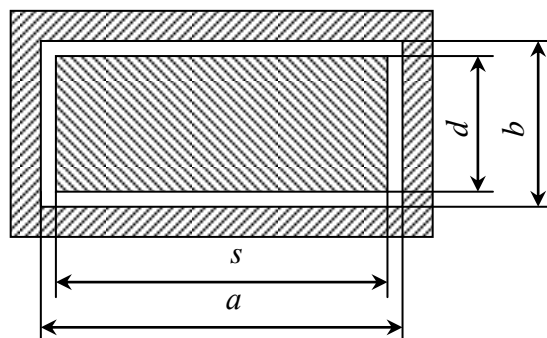


Рис. 11. Сечение низкоомной секции прямоугольного короткозамыкателя

В миллиметровом диапазоне волн отношение $s/a \approx 0,7 \div 0,8$, зазор $(b-d)/2$ должен быть минимальным, но при этом гарантированно исключено замыкание на корпус волновода. Технические характеристики подвижных волноводных КЗ нагрузок [3] приведены в табл. 5.

Таблица 5

Технические характеристики подвижных волноводных короткозамкнутых нагрузок

Модель	Диапазон частот, ГГц	Сечение волновода*, мм	КСВН	Габариты, мм
4-Э67090	37,5 – 53,57	5,2 × 2,6	40	24×24×163
4-Э67091	53,57 – 78,33	3,6 × 1,8	40	24×24×163

*Фланцы и волноводы соответствуют ГОСТ РВ51914-2002.

Согласованные нагрузки для микрополосковых линий

При проектировании СВЧ интегральных схем и микрополосковых устройств (ответвителей, усилителей, переключателей и т.п.) крайне необходима компактная микрополосковая нагрузка, работающая в диапазоне от постоянного тока до 18 ГГц и выше. При первом взгляде микрополосковая нагрузка предельно проста: микрополосковая линия с волновым сопротивлением $Z_0 = 50$ Ом заканчивается 50-омным поглощающим элементом, который замыкается на корпус (экран) линии (рис. 12). Однако такая нагрузка имеет КСВН на уровне 1,1 только до 2÷2,5 ГГц, далее КСВН резко возрастает до величины 1,4 на частоте 18 ГГц.

В НИИПИ «Кварц» были проведены необходимые теоретические и экспериментальные исследования [5, 6] по созданию высококачественных микрополосковых нагрузок.

Условием широкополосного согласования неоднородной линии с потерями является соотношение [7]

$$Z_{\text{вх}}(x) = R_{\text{вх}}(x), \quad (1)$$

где x – координата, отсчитываемая от плоскости замыкания; $R_{\text{вх}}(x)$ – сопротивление отрезка линии, заключенного между сечением x и короткозамкнутым концом; $Z_{\text{вх}}(x) = \sqrt{\frac{L(x)}{C(x)}}$, ($L(x)$, $C(x)$ – погонные индуктивность и емкость линии в сечении x).

Условие (1) определяет равенство нулю реактивной части входного сопротивления линии с потерями, что является одним из условий широкополосного согласования.

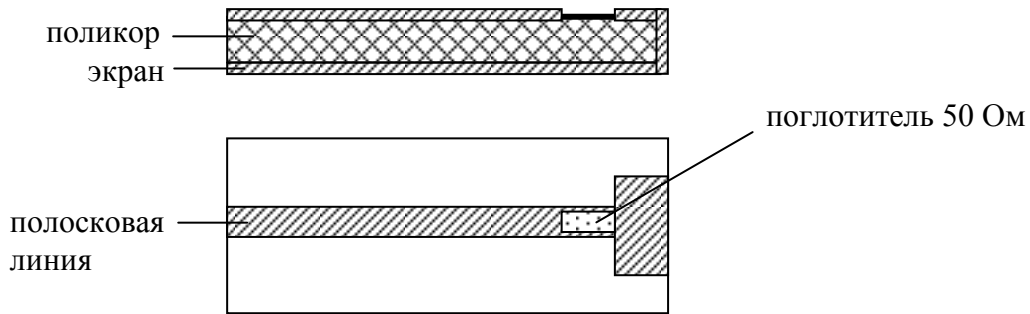


Рис. 12. Схема простейшей микрополосковой нагрузки

В микрополосковой линии условие (1) выполнить не удастся, так как геометрические размеры получаются столь малыми, что при современной технологии они не всегда выполнимы. Известно, что можно улучшить согласование однородной короткозамкнутой линии с потерями, выполнив условие

$$Z_0 = \frac{R_0}{\sqrt{3}},$$

где $Z_0 = \sqrt{L/C}$, L , C – погонные индуктивность и емкость линии, R_0 – общее сопротивление линии.

Для нагрузки 50 Ом получаем $Z_0 = \frac{R_0}{\sqrt{3}} \approx 29$ Ом. Такую величину можно получить,

если приблизить к краям резистора, ширина которого совпадает с шириной центрального проводника 50-омной микрополосковой линии, проводник (экран), соединенный с корпусом линии. Конструкция микрополосковой линии приведена на рис. 13.

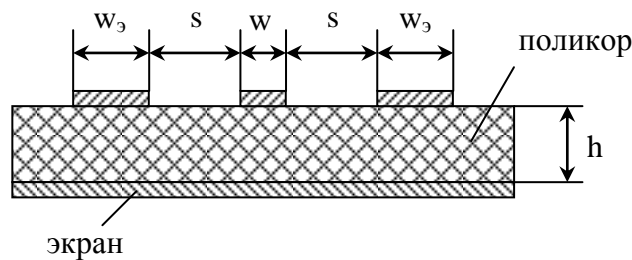


Рис. 13. Поперечное сечение микрополосковой линии передачи

Таблица 6

Технические характеристики микрополосковой линии

s/h	w/h	w_3/h	Z_0 , Ом	$\sqrt{\epsilon_{эф}}$
0,05	0,96	1,0	28,45	2,37
0,05	0,96	1,5	28,43	2,37
0,10	0,96	1,0	32,50	2,38
0,10	0,96	1,5	32,48	2,38
0,15	0,96	1,0	35,30	2,39
0,15	0,96	1,5	35,80	2,39

Расчет такой линии передачи проведен в [6]. Результаты расчета параметров рассматриваемой линии для диэлектрической подложки из поликора с относительной диэлектрической проницаемостью 9,8 приведены в табл. 6 (Z_0 – волновое сопротивление линии; $\epsilon_{\text{эф}}$ – эффективная диэлектрическая проницаемость).

В микрополосковой нагрузке большое влияние на согласование оказывает длина короткозамкнутого шлейфа, образованного проводником, через который резистор замыкается на корпус. Для ослабления влияния шлейфа необходимо дальнейшее снижение величины волнового сопротивления (т.е. уменьшение зазора между экраном и резистором, что технологически трудно реализуемо) или некоторое продление экрана, т.е. уменьшение волнового сопротивления на ближайшем к резистору отрезке подводящей микрополосковой линии. Нагрузка приобретает конфигурацию, показанную на рис. 14.

Численный анализ частотной зависимости такой нагрузки проведен в НИИПИ «Кварц» на основе теории длинных линий. Нагрузка рассматривалась как каскадное соединение трех отрезков линии передачи I, II, III. Макеты нагрузок выполнены в соответствии с рис. 14 ($s = 0,05$ мм, $l_0 = 0,15$ мм, $l_R = 0,24$ мм, $l_{\text{III}} = 0,3$ мм).

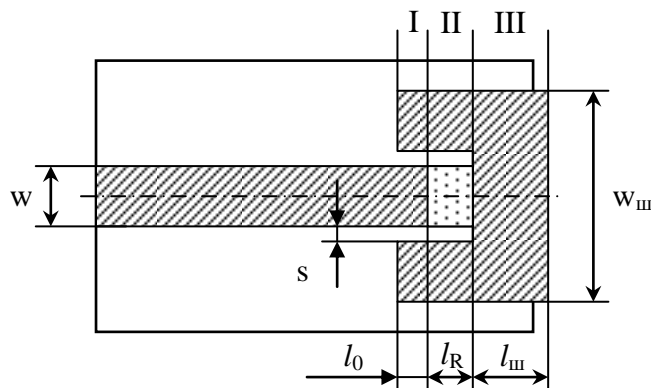


Рис. 14. Конструкция микрополосковой нагрузки

Результаты экспериментальных исследований по определению КСВН предложенной конструкции микрополосковой нагрузки приведены на рис. 15. Из графиков рис. 15 видно, что предложенная конструкция (рис. 14) существенно улучшает согласование микрополосковой нагрузки: КСВН не превышает величины 1,1 на частотах до 18 ГГц. Дальнейшее улучшение характеристик микрополосковых нагрузок – уменьшение длины короткозамкнутого шлейфа.

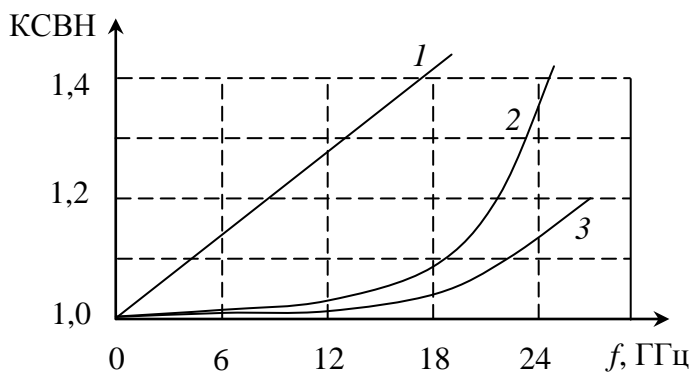


Рис. 15. Частотные зависимости КСВН:

1 – теоретическая; 2 – экспериментальная, для конструкции рис. 12; 3 – экспериментальная, для конструкции рис. 14

Основные виды радиоизмерений на сверхвысоких частотах рассматриваются в [7], где описаны методы измерения, практические конструкции радиоизмерительных приборов и их отдельных узлов, дается анализ погрешностей измерений.

Библиографический список

1. ОСТ 107.460007.006-92. Отраслевой стандарт. Материалы для объемных поглотителей ВЧ энергии. – М.: Изд-во ВНИИ, 1992. – 17 с.
2. ГОСТ РВ 51914-2002. Элементы соединения СВЧ трактов электронных измерительных приборов. Присоединительные размеры. – М.: Изд-во станд., 2002.
3. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства // Каталог НИИПИ «Кварц». – Н.Новгород, 2014. – 61 с.
4. **Абубакиров, Б.А.** Расчет и конструкции волноводных нагрузок / Б.А. Абубакиров, М.Л. Нововоспасская // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Радиоизмерительная техника. 1967. Вып. 7. С. 33–37.
5. А.с. 978239 СССР. Микрополосковая нагрузка / С.В.Панков // БИ. № 44. 1982. – 3 с.
6. **Панков, С.В.** Способ широкополосного согласования поглощающих элементов в полосковых линиях // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. 1983. Вып. 2. С. 74–78.
7. **Тишер, Ф.** Техника измерений на сверхвысоких частотах: справочное руководство: [пер. с нем. А.В. Львова] / Ф. Тишер; под ред. В.Н. Сретенского. – М.: Физ-мат. лит-ра, 1963. – 54 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2015*

В.А. Abubakirov¹, L.V. Kogteva², А.Е. Lvov¹, S.V. Pankov¹, G.I. Shishkov²

WAVEGUIDE AND MICROSTRIP LINE TERMINATIONS IN MEASURING TECHNIQUE

Institute of Electronic Measurements KVARZ n.a. A.P. Gogshkov¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

Subject: Waveguide terminations, microstrip line terminations.

Purpose: To describe the operation and constructions of modern SHF and EHF waveguide and microstrip line terminations (including reference terminations), to specify their application in measuring technique.

Results: Technical characteristics of different waveguide and microstrip line terminations are presented.

Field of application: Terminations are used in the design different devices (power divider, directional coupler, stroboscopic converter and so on), provide precision measurements of microwave systems and waveguide devices, are used for calibration complex reflection coefficient and transmission coefficient meters.

Key words: waveguide, microstrip line, termination, absorbing material, reflection coefficient, voltage standing-wave ratio.

УДК 621.372.8

В.Ф. Барина, Н.А. Новоселова, Л.Г. Рудоясова

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В КРУГЛОМ ИЗОТРОПНОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Рассмотреть полный спектр гибридных волн, распространяющихся вдоль круглого диэлектрического волновода. Показать существование в такой направляющей системе собственных и несобственных комплексных волн.

Метод, методология: С общих позиций делается попытка рассмотреть спектральный состав гибридных волн, распространяющихся вдоль круглого диэлектрического волновода.

Исследования: Поле гибридной волны в такой системе описывается продольными компонентами обоих векторов Герца, удовлетворяющими уравнению Гельмгольца и условию ограниченности на бесконечности. На поверхности диэлектрика должно выполняться условие непрерывности тангенциальных компонент поля. Радиальная зависимость поля внутри диэлектрического волновода описывается функциями Бесселя, вне волновода – функциями Ханкеля второго рода. При таком выборе радиальной зависимости поперечное волновое число во второй области может принимать любые действительные значения, что соответствует волнам непрерывного спектра, мнимые отрицательные значения, что соответствует обычным поверхностным волнам, и комплексные значения, которые соответствуют собственным и несобственным комплексным волнам.

Оригинальность/значение: Подробно рассмотрен вопрос ортогональности комплексных волн в двумерном слоистом волноводе. С помощью простых, но достаточно громоздких преобразований показано, что в рассматриваемой системе гибридные комплексные волны удовлетворяют условию ортогональности. Выполнение условия ортогональности позволило решить задачу о возбуждении, то есть найти спектральную амплитуду.

Ключевые слова: диэлектрический волновод, комплексные волны, дисперсионное уравнение.

Подробный анализ волн, распространяющихся в двумерных слоистых волноводах, был проведен в работе [1], где рассматривались свойства волн дискретного и непрерывного спектров. Вопросам распространения таких волн в плазменных слоях посвящены работы [2-4]. В настоящей статье с общих позиций делается попытка рассмотреть спектральный состав гибридных волн, распространяющихся вдоль круглого диэлектрического волновода.

Поле гибридной волны в такой системе описывается продольными компонентами обоих векторов Герца, удовлетворяющими уравнению Гельмгольца и условию ограниченности на бесконечности:

$$\left| \underline{\Pi}^{e,m}(r, \varphi, \bar{z}) \right| < \underline{C} \text{ при } r \rightarrow \infty. \quad (1)$$

На поверхности диэлектрика должно выполняться условие непрерывности тангенциальных компонент поля.

Радиальная зависимость поля внутри диэлектрического волновода описывается функциями Бесселя, вне волновода – функциями Ханкеля второго рода. При таком выборе радиальной зависимости поперечное волновое число во второй области может принимать любые действительные значения, что соответствует волнам непрерывного спектра, мнимые отрицательные значения, что соответствует обычным поверхностным волнам, и комплексные значения, которые соответствуют собственным и несобственным комплексным волнам.

В [5-7] показано, что наряду с собственными комплексными волнами в открытом ДВ могут существовать несобственные КВ.

Поскольку принципиальная возможность существования в системе комплексных волн доказана, векторы Герца, соответствующие n -й гибридной волне, избирательно возбуждаемой источниками $\vec{j}^{e,m}$, в первой и во второй областях записываем в виде

$$\underline{\Pi}_{z_{1,2}}^{e,m} = \sum_{k=1}^{\infty} A_{\pm kn} \Psi_{1,2}^{e,m}(r, \varphi) e^{-i\beta_{\pm kn} z} + \int_0^{\infty} A_{\pm}(\alpha_{1,2}) \Psi_{1,2}^{e,m}(r, \varphi, \alpha_{1,2}) e^{-i\beta_{\pm}(\alpha) z} d\alpha_{1,2}, \quad (2)$$

где первое слагаемое представляет собой сумму собственных волн, соответствующих номеру n , дискретной части спектра, второе – весь набор волн непрерывного спектра. При вычислении векторов Герца в первой области интегрирование в (2) производится по α_1 , во второй – по α_2 . Поперечные волновые числа связаны соотношением $\alpha_1^2 - \alpha_2^2 = \omega^2(\varepsilon_1\mu_1 - \varepsilon_2\mu_2)$. Знаки (\pm) в обозначениях амплитуд и продольных волновых чисел соответствуют прямой и обратной волнам, соответственно, $\Psi^{e,m}$ в (2) – электрическая и магнитная потенциальные функции.

Деформация контура интегрирования в нижнюю полуплоскость (α_2) позволит ввести дискретные собственные комплексные волны в (2) под знак интеграла, в то время как деформация контура интегрирования в верхнюю полуплоскость, напротив, приведет к выделению из волн непрерывного спектра несобственных комплексных волн.

В силу этого векторы Герца, представляющие поля волн непрерывного спектра и комплексных волн, можно записать как

$$\underline{\Pi}_{z_{1,2}}^{e,m} = \int_{\Gamma} A_{\pm}(\alpha_{1,2}) \Psi_{1,2}^{e,m}(r, \varphi, \alpha_{1,2}) e^{-i\beta_{\pm}(\alpha) z} d\alpha_{1,2}. \quad (3)$$

Интегрирование в (3) производится по всему спектру поперечных волновых чисел, причем контур интегрирования деформирован вблизи точек, соответствующих волнам дискретного спектра.

Поскольку поле, описываемое (3), в силу выбранной радиальной зависимости вне диэлектрического волновода удовлетворяет нулевому условию при $r \rightarrow \infty$, для двух произвольных поперечных сечений, исходя из леммы Лоренца, можно записать

$$\int_{S_{1,2}} \left\{ \vec{E} \vec{H}_{\pm}(\alpha) \right\} - \left[\vec{E}_{\pm}(\alpha) \vec{H} \right] d\vec{S} = \int_V \left[\vec{j}^e \vec{E}_{\pm}(\alpha) - \vec{j}^m \vec{H}_{\pm}(\alpha) \right] dV, \quad (4)$$

где сечение S_1 расположено слева от источников, S_2 – справа; объем V заключен между этими сечениями, простирающимся от $r = 0$ до $r \rightarrow \infty$. Поле \vec{E}, \vec{H} в (2) создается источниками $\vec{j}^{e,m}$ и включает в себя весь спектр волн, поле $\vec{E}_{\pm}(\alpha); \vec{H}_{\pm}(\alpha)$ включает в себя одну спектральную составляющую, соответствующую поперечному волновому числу α . $\vec{E}_{+}(\alpha); \vec{H}_{+}(\alpha)$ – поле прямой волны, оно отлично от нуля в сечении S_1 ; поле обратной волны $\vec{E}_{-}(\alpha); \vec{H}_{-}(\alpha)$ отлично от нуля в сечении S_2 .

Используя (4) и граничные условия на поверхности диэлектрического стержня, получаем выражение для спектральной амплитуды

$$A(\alpha) = \frac{R_n(\alpha_1, \alpha_2)}{N(\alpha_1, \alpha_2)} \int_V \left[\vec{j}^e \vec{E}_{-}(\alpha) - \vec{j}^m \vec{H}_{-}(\alpha) \right] dV, \quad (5)$$

где

$$N = A_1^2 \frac{\chi_n(\alpha_1, \alpha_2) - \alpha_1^2 \alpha_2^2 a \left[\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1} P_n(\alpha_1) - \frac{\varepsilon_2}{\alpha_2} Q_n(\alpha_2) \right] \left[\frac{\mu_1}{\alpha_1} P_n(\alpha_1) - \frac{\mu_2}{\alpha_2} Q_n(\alpha_2) \right]}{\alpha_1^2 \alpha_2^2 \sqrt{\alpha_1^2 - \alpha_2^2} (\varepsilon_2 \mu_2 \alpha_1^2 - \varepsilon_1 \mu_1 \alpha_2^2)}; \quad (6)$$

$$\chi_n(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{n^2}{a} (\alpha_1^2 - \alpha_2^2) (\varepsilon_2 \mu_2 \alpha_1^2 - \varepsilon_1 \mu_1 \alpha_2^2);$$

$$P_n(\alpha_1) = \frac{J'_n(\alpha_1 a)}{J_n(\alpha_1 a)}; \quad Q_n(\alpha_2) = \frac{H_n^{(2)' }(\alpha_2 a)}{H_n^{(2)}(\alpha_2 a)};$$

$\alpha_{1,2}$ – поперечные волновые числа в первой и второй областях; A_1 – амплитудный коэффициент электрической потенциальной функции в первой области; a – радиус стержня;

$$\begin{aligned} R_n(\alpha_1, \alpha_2) = & \frac{\alpha_1 a}{2} \left\{ \frac{1}{2n-1} \left[J_{n-1}^2(\alpha_1 a) - J_n(\alpha_1 a) J_{n-2}(\alpha_1 a) - J_n(\alpha_1 a) J_{n-1}(\alpha_1 a) \right] + \right. \\ & + \frac{1}{2n+1} \left[J_{n-1}(\alpha_1 a) J_{n+1}(\alpha_1 a) - J_n^2(\alpha_1 a) - J_n(\alpha_1 a) J_{n+1}(\alpha_1 a) \right] \left. - \frac{\alpha_2 a}{2} \left\{ \frac{1}{2n-1} \times \right. \right. \\ & \times \left[H_{n-1}^{(2)2}(\alpha_2 a) - H_n^{(2)}(\alpha_2 a) H_{n-2}^{(2)}(\alpha_2 a) - H_n^{(2)}(\alpha_2 a) H_{n-1}^{(2)}(\alpha_2 a) \right] + \frac{1}{2n+1} \times \\ & \times \left[H_{n-1}^{(2)}(\alpha_2 a) H_{n+1}^{(2)}(\alpha_2 a) - H_n^{(2)2}(\alpha_2 a) - H_n^{(2)}(\alpha_2 a) H_{n+1}^{(2)}(\alpha_2 a) \right] \left. \right\} + 2\alpha_2 \delta(\alpha_2) \left\{ \frac{1}{2n-1} \times \right. \\ & \times \left[\pm 1 - (1+i)e^{i\left(\frac{n-1}{4}\right)\pi} \right] + \frac{1}{2n+1} \left[\mp 1 + (1-i)e^{i\left(\frac{n+1}{4}\right)\pi} \right] \left. \right\}. \end{aligned}$$

Здесь $J_n(\alpha_1 a)$, $H_n^{(2)}(\alpha_2 a)$ – функции Бесселя и Ханкеля; $\delta(\alpha_2)$ – дельта-функция Дирака; верхний знак в последней фигурной скобке соответствует нечетным n , нижний – четным.

При выводе выражения (5) использование граничных условий на поверхности стержня дало возможность выразить амплитудные коэффициенты всех потенциальных функций первой и второй областей через A_1 .

Нетрудно убедиться, что функция, стоящая в числителе выражения для $N(\alpha_1, \alpha_2)$, совпадает с дисперсионным уравнением волн круглого диэлектрического волновода, получаемым методом согласованных полей [5]. Эта функция является в комплексной плоскости (α) голоморфной, а следовательно, имеет нули в изолированных точках. В этих точках функция (3), являющаяся представлением поля, будет иметь полюсы. Полюсы, лежащие на оси $\text{Im} \alpha_2 < 0$, соответствуют обычным поверхностным волнам. При деформации контура интегрирования в (3) в нижнюю полуплоскость из интеграла выделяется вычет, определяемый полюсом, расположенным в нижней полуплоскости (α_2) и соответствующим собственной комплексной волне. Поле этой волны, имея распространяющийся в направлении r характер, экспоненциально убывает при $r \rightarrow \infty$. Существование такой волны можно объяснить распределенным разворотом плотности потока мощности. При деформации контура интегрирования в верхнюю полуплоскость из интеграла выделяется член, соответствующий несобственной комплексной волне, поле которой при $r \rightarrow \infty$ экспоненциально стремится к бесконечности. Выделение такой волны имеет физический смысл [1] лишь вблизи волновода. При удалении от поверхности диэлектрического волновода такую волну необходимо рассматривать совместно с волнами непрерывного спектра, оставшимися в (3) под интегралом. Только их совместное рассмотрение обеспечивает выполнение граничного условия на бесконечности.

Если с самого начала поле, возбуждаемое источниками \vec{j}^e и \vec{j}^m , записать в виде

$$\vec{E} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} A_{\pm mn} \vec{\Phi}(\psi_{mn}^e; \psi_{mn}^m) e^{-i\beta_{\pm mn} z} + \int_0^{\infty} A_{\pm}(\alpha) \vec{\Phi}[\psi^e(\alpha); \psi^m(\alpha)] e^{-i\beta_{\pm}(\alpha) z} d\alpha \right\}, \quad (7)$$

выделив тем самым собственные волны дискретного спектра (первое слагаемое в фигурных скобках), то деформация контура интегрирования в нижнюю полуплоскость (α_2) (во втором

слагаемом в фигурных скобках) приведет к появлению дополнительных собственных волн дискретного спектра с амплитудами $(-A_{\pm mn})$. Это легко можно установить, проследивая весь процесс составления дисперсионного уравнения и образования функции (6). В разложении (7) собственные волны с амплитудами $\pm A_{\pm mn}$ уничтожат друг друга. Это подчеркивает тот факт, что запись (3) совместно с формулами (5), (6) является полным представлением поля.

В (7) индекс n соответствует номеру цилиндрических функций (определяет азимутальную зависимость поля), индекс m – порядковый номер корня дисперсионного уравнения; A_{\pm} – амплитуды прямой и обратной волн; функция $\bar{\Phi}$ связывает электрическое поле с потенциальными функциями.

Подтвердим частным примером принципиальную возможность существования собственных и несобственных комплексных волн в рассматриваемой направляющей системе.

Для случая $|\alpha_{1,2}a| \gg 1$ дисперсионное уравнение волны с индексом $n=1$ [5-7] можно записать в виде

$$tg\left(\alpha_1 a - \frac{3}{4}\pi\right) = i \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\mu_2 + \varepsilon_2}{\mu_1 + \varepsilon_1} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\mu_2 + \varepsilon_2}{\mu_1 + \varepsilon_1} \right)^2 - \frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1} - \frac{\beta^2 (\alpha_2^2 - \alpha_1^2)^2}{\varepsilon_1 \mu_1 \omega^2 a^2 \alpha_1^4 \alpha_2^2}} \right]. \quad (8)$$

После разделения в (8) действительной и мнимой частей в приближении малости последнего слагаемого под радикалом получаем систему двух трансцендентных уравнений:

$$\frac{sh(2\delta_1 a)}{\sin 2\left(\gamma_1 a - \frac{3}{4}\pi\right)} = \frac{\gamma_1 \gamma_2 + \delta_1 \delta_2}{\gamma_1 \delta_2 - \gamma_2 \delta_1};$$

$$\frac{1}{2} \frac{\sin 2\left(\gamma_1 a - \frac{3}{4}\pi\right)}{ch^2(\delta_1 a) - \sin^2\left(\gamma_1 a - \frac{3}{4}\pi\right)} = p(\pm q_1 + q_2); \quad (9)$$

где $\alpha_{1,2} = \gamma_{1,2} + i\delta_{1,2}$; $p = \frac{\gamma_1 \delta_2 - \delta_1 \gamma_2}{\gamma_2^2 + \delta_2^2}$; $q_1 = \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_2}{\varepsilon_1 \mu_1} - \frac{(\varepsilon_1 \mu_2 + \varepsilon_2 \mu_1)^2}{4(\varepsilon_1 \mu_1)^2}}$; $q_2 = \frac{\varepsilon_1 \mu_2 + \varepsilon_2 \mu_1}{2\varepsilon_1 \mu_1}$.

Учитывая условие $|\alpha_{1,2}a| \gg 1$, берем $\gamma_1 a - \frac{3}{4}\pi = \pi v$, где $v \gg 1$, откуда $\gamma_1 = \frac{\pi}{a} \left(v + \frac{3}{4} \right)$.

Поскольку поперечные волновые числа удовлетворяют соотношению $\gamma_1 \delta_1 = \gamma_2 \delta_2$, нетрудно показать, что выбранное γ_1 и $\gamma_2 = \gamma_1$; $\delta_1 = \delta_2$ удовлетворяют системе (9). При найденном решении системы (9) $\alpha_1 = \alpha_2$. Отсюда следует, что в рассмотренном частном случае система (9) является точным представлением дисперсионного уравнения (8).

Таким образом, показали принципиальную возможность существования комплексных волн в рассматриваемой системе. Нетрудно убедиться, что в найденном решении может быть как $\delta_{1,2} > 0$, так и $\delta_{1,2} < 0$. При этом отрицательные $\delta_{1,2}$ соответствуют собственной комплексной волне, положительные – несобственной.

В работе [1] подробно рассмотрен вопрос ортогональности комплексных волн в двумерном слоистом волноводе. С помощью простых, но достаточно громоздких преобразований можно показать, что в рассматриваемой системе гибридные комплексные волны удовлетворяют условию ортогональности в виде

$$\int_{S_p} \left\{ \left[\vec{E}_0(\alpha) \vec{H}_0(\alpha') \right] - \left[\vec{E}_0(\alpha') \vec{H}_0(\alpha) \right] \right\} d\vec{S} = \begin{cases} 0 & \text{при } \alpha \neq \alpha', \\ \begin{cases} N(\alpha_1, \alpha_2) \\ R(\alpha_1, \alpha_2) \end{cases} & \text{при } \alpha = \alpha', \end{cases} \quad (10)$$

где $\vec{E} = \vec{E}_0(r, \varphi)e^{-i\beta(\alpha)z}$; $\vec{H} = \vec{H}_0(r, \varphi)e^{-i\beta(\alpha)z}$; S_p – произвольное поперечное сечение $r \in [0; \infty)$. Выполнение условия ортогональности (10) позволило решить задачу о возбуждении, то есть найти спектральную амплитуду (5).

Библиографический список

1. Шевченко, В.В. Плавные переходы в открытых волноводах / В.В. Шевченко. – М.: Наука. – 1969.
2. Tamir, F. The spectrum of electromagnetic waves guides by a plasma layer / F. Tamir, A.A. Oliner / IEEE. 1963. V.51. №2. P. 317.
3. Кондратьев, И.Г. Двухмерные электромагнитные поля, направляемые плазменными слоями / И.Г. Кондратьев, М.А. Миллер // Изв. вузов. Радиофизика. 1964. Т. 7. №1. С. 124–134.
4. Кондратьев, И.Г. О структуре поля внутри плазменного слоя с нулевой проницаемостью / И.Г. Кондратьев, М.А. Миллер // Изв. вузов. Радиофизика. 1964. Т. 7. №1. С. 176–179.
5. Веселов, Г.И. Слоистые металло-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988. – 248 с.
6. Раевский, А.С. Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2014. – 110 с.
7. Раевский, А.С. Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010. – 223 с.

Дата поступления
в редакцию 05.02.2015

V.F. Barinova, N.A. Novoselova, L.G. Rudoyasova

ELECTROMAGNETIC WAVES IN A CIRCULAR ISOTROPIC DIELECTRIC WAVEGUIDE

The Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Consider the full range of hybrid waves propagating along a circular dielectric waveguide. To show the existence of such a rail system, proper and improper complex wave.

Methodology/approach: In this paper, a common position is an attempt to examine the spectral composition of the hybrid waves propagating along a circular dielectric waveguide.

Findings: Hybrid wave field in such a system is described by the longitudinal components of both the Hertz vectors that satisfy the Helmholtz equation and the boundedness condition at infinity. On the dielectric surface, the condition of continuity of the tangential field components. Radial dependence of the field inside the dielectric waveguide is described by Bessel functions outside the waveguide - Hankel functions of the second kind.

With this choice of the radial dependence of the transverse wave number in the second field can take on any real value, which corresponds to the waves of the continuous spectrum, the imaginary negative, which corresponds to the usual surface waves and complex values, which correspond to proper and improper complex waves.

Originality/value: The paper describes how to orthogonal complex waves in two-dimensional layered waveguide. With simple, but quite cumbersome transformations shown that in this system the complex hybrid waves satisfy the orthogonality condition. Implementation of the orthogonality conditions allowed us to solve the problem of the excitation, is to find the spectral amplitude.

Key words: dielectric waveguide, complex wave, dispersion equation.

УДК 621.372.413

Белов Ю.Г.¹, Ворошилов Б.И.², Малахов В.А.¹, Нефедьев И.А.¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РЕЗОНАТОРЕ,
ОБРАЗОВАННОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНОЙ
С ДВУХСТОРОННЕЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹, Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники²

Рассмотрен резонатор в виде прямоугольной диэлектрической пластины, металлизированной с двух сторон. Торцы пластины не металлизированы. Представлены результаты расчета резонансных частот и добротности колебаний в таком резонаторе. Полученные расчетные соотношения могут быть использованы в качестве алгоритмической основы метода измерения параметров диэлектриков фольгированных диэлектрических пластин.

Ключевые слова: металлизированная диэлектрическая пластина, резонансная частота, добротность, параметры диэлектрика.

При входном контроле параметров фольгированных диэлектрических пластин, предназначенных для изготовления радиоэлектронных устройств, необходимо оперативно измерять относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_r и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ материала пластины. В связи с этим представляет интерес «неразрушающий» метод измерения параметров диэлектрика пластины (т.е. без удаления с нее металлической фольги), основанный на возбуждении в металлизированной диэлектрической пластине электромагнитных колебаний, измерении их резонансных частот и добротности, затем вычислении из результатов измерений параметров ϵ_r и $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика. В настоящей работе представлена постановка задачи о расчете характеристик электромагнитных колебаний в резонаторе, образованном такой пластиной, и получены расчетные соотношения для определения ϵ_r и $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика по данным измерений характеристик резонатора.

Рассматриваемый резонатор с обозначением геометрических размеров схематически показан на рис. 1. Диэлектрическая пластина металлизирована сверху (поверхность S_1) и снизу (поверхность S_2). Торцы пластины не металлизированы. Строгое исследование колебаний в таком резонаторе с учетом излучения со стороны торцов представляет собой сложную электродинамическую задачу, решение которой возможно с использованием тех или иных приближений [1-3]. В рассматриваемом резонаторе (рис. 1) размер d (толщина пластины) мал ($d = 1 \div 2$ мм), в то время как размеры W и L обычно составляют несколько десятков сантиметров. Таким образом, площадь торцовых поверхностей мала по сравнению с S_1 , S_2 . На рабочих частотах резонатора электрические размеры излучающих апертур (торцов) также малы. На этом основании излучением со стороны торцов в рассматриваемом резонаторе можно пренебречь.

В теории диэлектрических резонаторов [1] при высокой диэлектрической проницаемости материала резонатора ϵ_r хорошие результаты при расчете резонансных частот дает предположение, что на всей или части поверхности резонатора выполняется граничное условие, соответствующее «магнитной» стенке, когда на этой поверхности считается равной нулю тангенциальная составляющая магнитного поля. Диэлектрическая проницаемость материала пластин обычно достаточно велика ($\epsilon_r \sim 10$). При малой толщине пластины электромагнитное поле оказывается «запертым» в диэлектрике, как в диэлектрическом резонаторе.

Это позволяет принять предположение, что на поверхности торцов выполняется граничное условие, соответствующее «магнитной» стенке. Справедливость этого предположения далее обосновывается сравнением результатов расчета с экспериментом.

Поскольку толщина пластины d мала, следует ожидать, что резонансные колебания, возбуждаемые на сравнительно невысоких частотах, не будут иметь вариаций поля по координате y . Поэтому в резонаторе не будут возбуждаться колебания типа «E», у которых компонента поля $E_z \neq 0$.

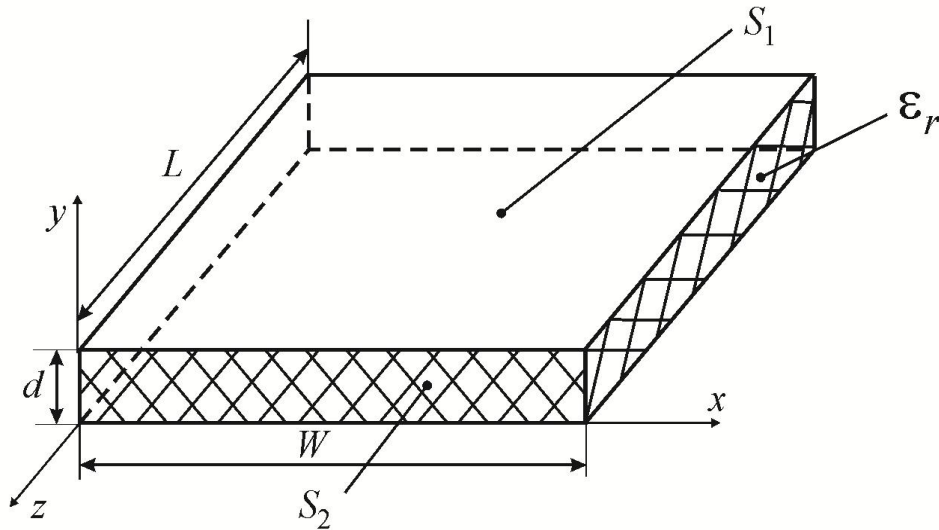


Рис. 1. Резонатор в виде диэлектрической пластины, металлизированной сверху и снизу

Компоненты полей колебаний типа «H» ($H_z \neq 0$) выражаются [4] через продольную компоненту магнитного вектора Герца Π_z^h по формулам:

$$\begin{aligned} H_z &= \chi^2 \Pi_z^h; & E_x &= -i\omega\mu_0 \frac{\partial \Pi_z^h}{\partial y}; \\ H_x &= \frac{\partial^2 \Pi_z^h}{\partial x \partial z}; & E_y &= i\omega\mu_0 \frac{\partial \Pi_z^h}{\partial x}; \\ H_y &= \frac{\partial^2 \Pi_z^h}{\partial y \partial z}; \end{aligned} \quad (1)$$

где χ - поперечное волновое число; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Вектор Герца определяется из решения уравнения Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 \Pi_z^h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z^h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Pi_z^h}{\partial z^2} + \epsilon_r k_0^2 \Pi_z^h = 0 \quad (2)$$

при граничных условиях:

$$E_x|_{y=0;d} = 0; \quad (3)$$

$$H_x|_{z=0;L} = 0; \quad H_y|_{z=0;L} = 0; \quad (4)$$

$$H_z|_{x=0;w} = 0; \quad H_y|_{x=0;w} = 0. \quad (5)$$

В уравнении (2) обозначено: $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$; $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\Phi}{\text{м}}$; ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость материала пластины. Граничное условие (3) – условие $E_\tau = 0$ на нижнем и верхнем слоях металлизации (металл считаем идеально проводящим). Условия (4) и (5) соответствуют «магнитной» стенке на торцах пластины

$$H_\tau \Big|_{S_{\text{торц}}} = 0. \quad (6)$$

Решение уравнения (2) при граничных условиях (3) – (5) имеет вид

$$\begin{aligned} \Pi_z^h(x, y, z) &= A \sin \frac{\pi N}{W} x \cdot \cos \frac{\pi p}{d} y \cdot \cos \frac{\pi M}{L} z; \\ \left(\frac{\pi N}{W}\right)^2 + \left(\frac{\pi p}{d}\right)^2 + \left(\frac{\pi M}{L}\right)^2 &= \varepsilon_r k_0^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где A – амплитудный коэффициент; $N = 1, 2, 3, \dots$; $p = 0, 1, 2, \dots$; $M = 0, 1, 2, \dots$.

Считая поле не зависящим от координаты y , полагаем $p = 0$. В этом случае решение (7) описывает колебания типа H_{N0M} с компонентами:

$$\begin{aligned} H_z &= \left(\frac{\pi N}{W}\right)^2 A \sin \frac{\pi N}{W} x \cos \frac{\pi M}{L} z; \\ H_x &= -\left(\frac{\pi N}{W}\right) \cdot \left(\frac{\pi M}{L}\right) A \cos \frac{\pi N}{W} x \sin \frac{\pi M}{L} z; \\ E_y &= -i\omega\mu_0 \cdot \left(\frac{\pi N}{W}\right) A \cos \frac{\pi N}{W} x \cdot \cos \frac{\pi M}{L} z. \end{aligned} \quad (8)$$

Резонансная частота такого колебания находится из формулы

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi N}{W}\right)^2 + \left(\frac{\pi M}{L}\right)^2}{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0}}, \quad (9)$$

где $N = 1, 2, 3, \dots$; $M = 0, 1, 2, \dots$.

Если поменять на рис. 1 координатные оси x и z местами (они равноправны), то получим колебания H_{M0N} с той же формулой для резонансной частоты (9), в которой $M = 1, 2, 3, \dots$; $N = 0, 1, 2, \dots$. Это колебание будет иметь те же компоненты поля, что и H_{N0M} . Выражения для компонент получаются из (8) заменой

$$W \leftrightarrow L, \quad M \leftrightarrow N. \quad (10)$$

Формула (9) позволяет определить диэлектрическую проницаемость материала пластины ε_r по измеренному значению резонансной частоты колебания $f_{\text{рез}}^{M,N}$. Для этого очевидно необходимо идентифицировать тип этого колебания – определить значения индексов M и N .

Расчет добротности резонатора производится методом возмущений [4] с учетом потерь в диэлектрике пластины и в металле слоев S_1, S_2 (рис. 1):

$$Q = \omega_{\text{рез}} \frac{W^e}{P_d + P_{M1} + P_{M2}} \quad (11)$$

где $\omega_{\text{рез}} = 2\pi f_{\text{рез}}$;

$$W^e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \int_v |E_y|^2 dV \quad (12)$$

• запасенная энергия (в данном случае при расчете запасенной энергии удобно рассчитывать энергию электрического поля, так как оно имеет единственную компоненту E_y); V – объем резонатора;

$$P_d = \omega_{\text{рез}} \text{tg} \delta W^e \quad (13)$$

• мощность потерь в диэлектрике;

$$P_{m1,2} = \frac{1}{2} R_s \int_{S_{1,2}} |H_\tau|_{y=0;d}^2 \cdot dS \quad (14)$$

• мощность потерь в металле слоев S_1 и S_2 ; $R_s = \sqrt{\omega_{\text{рез}} \mu_0 / 2\sigma}$ – поверхностное сопротивление (σ – проводимость металла; H_τ – тангенциальная к поверхности слоев $S_{1,2}$ компонента магнитного поля. В данном случае $|H_\tau|^2 = |H_z|^2 + |H_x|^2$). Поскольку поле в резонаторе не зависит от координаты y , $P_{m1} = P_{m2} = P_m$. В соответствии с принятыми предположениями потери на излучение со стороны торцов в (11) не учитываются.

Подставляя в формулы (12) и (14) выражения (8) компонент электромагнитного поля колебаний H_{NOM} , после несложных преобразований получаем формулы для расчета величин W^e и P_m , соответствующие этим колебаниям:

$$W^e = \frac{1}{8} \varepsilon_0 \varepsilon_r \omega_{\text{рез}}^2 \mu_0^2 \left(\frac{\pi N}{W} \right)^2 A^2 W L d (1 + \delta_N)(1 + \delta_M); \quad (15)$$

$$P_m = \frac{1}{8} R_s \left(\frac{\pi N}{W} \right)^2 A^2 \left[\left(\frac{\pi N}{W} \right)^2 (1 - \delta_N)(1 + \delta_M) + \left(\frac{\pi M}{L} \right)^2 (1 + \delta_N)(1 - \delta_M) \right] W L, \quad (16)$$

где

$$\delta_M = \begin{cases} 1, & M = 0; \\ 0, & M \neq 0; \end{cases} \quad \delta_N = \begin{cases} 1, & N = 0; \\ 0, & N \neq 0; \end{cases} \quad (17)$$

Отметим, что для колебаний H_{NOM} $N \neq 0$, поэтому для этих колебаний $\delta_N = 0$.

Выражение (11) добротности можно представить в виде

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_m}, \quad (18)$$

где $Q_d = \omega_{\text{рез}} W^e / P_d$ – составляющая добротности резонатора, обусловленная потерями в диэлектрике; $Q_m = \omega_{\text{рез}} W^e / 2P_m$ – составляющая, обусловленная потерями в металле. Из формул (11) – (14) видно, что для рассматриваемого резонатора $Q_d = 1/\text{tg} \delta$. Для Q_m после преобразований получается формула

$$Q_m = \pi d \sqrt{\frac{60\sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}}} \cdot \frac{\left[\left(\frac{N}{W} \right)^2 + \left(\frac{M}{L} \right)^2 \right]^{5/4}}{\left(\frac{M}{L} \right)^2 \frac{1 - \delta_M}{1 + \delta_M} + \left(\frac{N}{W} \right)^2 \frac{1 - \delta_N}{1 + \delta_N}}. \quad (19)$$

Из выражения (17) следует, что

$$\frac{1 - \delta_M}{1 + \delta_M} = \begin{cases} 0, & M = 0; \\ 1, & M \neq 0; \end{cases} \quad \frac{1 - \delta_N}{1 + \delta_N} = \begin{cases} 0, & N = 0; \\ 1, & N \neq 0. \end{cases} \quad (20)$$

Поэтому с учетом выражения для резонансной частоты (9) формула (19) принимает окончательный вид

$$Q_m = d \sqrt{60\pi\sigma \omega_{\text{рез}} \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}. \quad (21)$$

При расчете добротности колебаний H_{MON} в формуле (19) следует произвести замену (10). Нетрудно убедиться, что вид (19) при этом не изменится. Следовательно, остается неизменной и формула (21). Таким образом, выражение (18), где $Q_d = 1/\text{tg}\delta$, а Q_m вычисляется по формуле (21), справедливо как для колебаний H_{NOM} ($N = 1, 2, 3, \dots; M = 0, 1, 2, \dots$), так и для H_{MON} ($M = 1, 2, 3, \dots; N = 0, 1, 2, \dots$),

Отметим важную особенность формулы (21). Величина добротности Q_m не зависит от типа колебания (от значений индексов M или N), а зависит только от резонансной частоты этого колебания. Данная особенность существенно упрощает процедуру определения $\text{tg}\delta$ материала пластины по результатам измерения добротности резонатора, поскольку нет необходимости идентифицировать тип колебания, достаточно только знать его резонансную частоту. В этом заключается отличие от описанной выше процедуры определения ϵ_r с помощью формулы (9) по значению измеренной резонансной частоты. Эта процедура требует достоверной идентификации типа колебания (определения индексов M и N).

Далее представлены результаты расчетов по полученным формулам величин $\tilde{k}_{\text{орез}} = k_{\text{орез}}W$ и $\tilde{Q}_m = Q_m d^{-\frac{1}{2}}$ различных типов колебаний в резонаторе в виде пластины с относительными размерами $\frac{L}{W} = 0,75; \frac{d}{W} = 0,0021$ из листового диэлектрического материала с проницаемостью $\epsilon_r = 10,4$ покрытого с двух сторон медной фольгой. Проводимость меди была принята равной $\sigma = 5 \cdot 10^7$ См/м [5]. Для контроля правильности полученных выражений величины были рассчитаны с помощью пакета математического моделирования *ANSOFT HFSS*.

Моделирование так же, как и вывод расчетных выражений, производилось при задании на торцах пластины граничных условий типа «магнитной» стенки. Результаты аналитического расчета и математического моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Величина	Процесс	Тип колебания				
		$N = 1; M = 0$	$N = 0; M = 1$	$N = 1; M = 1$	$N = 2; M = 0$	$N = 2; M = 1$
$\tilde{k}_{\text{орез}}$	расчет	0,9737	1,2968	1,6217	1,9474	2,3397
	моделир.	0,9699	1,2917	1,6167	1,9418	2,3335
$\tilde{Q}_m, M^{-\frac{1}{2}}$	расчет	4423	5104	5708	6255	6856
	моделир.	4435	5116	5720	6267	6867

Дополнительно результаты моделирования для нескольких типов колебаний представлены на рис. 2, на которых показаны растровые картины распределения напряженности электрического поля в резонаторе и эпюры распределения этого поля по сторонам пластины. Последние наглядно позволяют идентифицировать тип колебания, т.е. определить индексы N и M как количество полуволновых осцилляций поля по широкой и узкой сторонам пластины соответственно.

Как видно из табл. 1 и рис. 2 результаты расчетов и математического моделирования совпадают с высокой точностью, что свидетельствует о правильности полученных расчетных выражений.

Результаты расчета резонансных частот были сопоставлены с данными эксперимента. Измерения $f_{\text{рез}}$ производились с помощью измерителя амплитудно-частотных характеристик при включении резонатора «на проход» и подаче противофазных напряжений на верхний и нижний слои металлизации (соответственно снятию напряжений с верхнего и нижнего слоев) в серединах узких или широких краев пластины. Идентификация типов колебаний (определение числа полуволновых осцилляций электрического поля по сторонам резонатора) производилась перемещением локального короткозамыкателя (в виде узкой полоски фольги) вдоль широкого и узкого краев пластины. При попадании короткозамыкателя в пучность электрического поля добротность колебания резко падает, что фиксируется по уменьшению высоты резонансной кривой на экране измерителя.

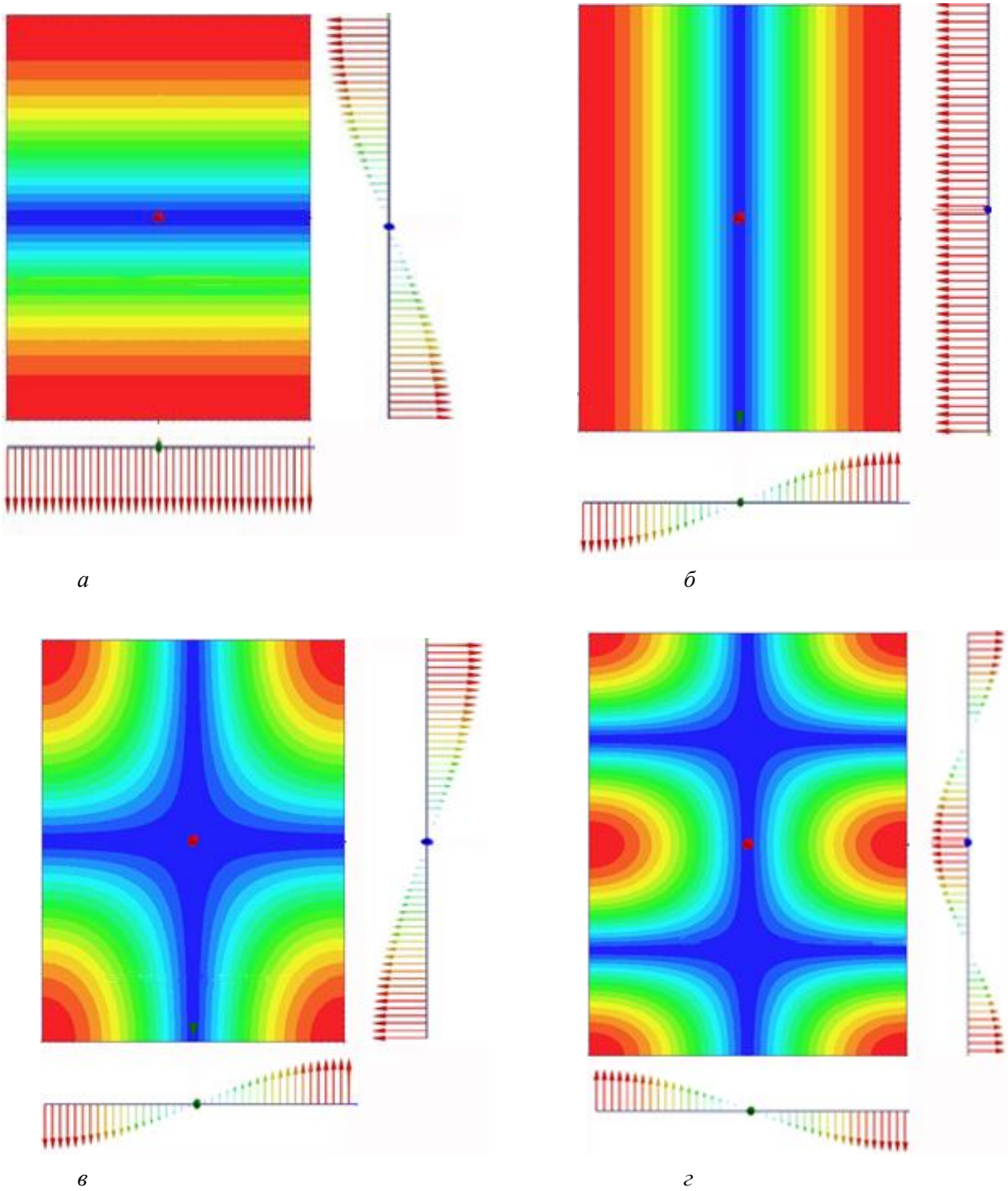


Рис. 2. Результаты математического моделирования для колебаний:

a - $N = 1; M = 0$;

б - $N = 0; M = 1$;

в - $N = 1; M = 1$;

г - $N = 2; M = 1$

Результаты расчета значений $\tilde{k}_{\text{орез}}$ и эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2

Величина	Процесс	Тип колебания				
		$N = 2; M = 0$	$N = 0; M = 2$	$N = 1; M = 2$	$N = 3; M = 0$	$N = 2; M = 2$
$\tilde{k}_{\text{орез}}$	расчет	1,9474	2,5937	2,7705	2,9211	3,2435
	экспер.	1,9410	2,5923	2,7711	2,9116	3,2436

Как видно из табл. 2, результаты расчета и эксперимента достаточно близки. Это свидетельствует о том, что заложенная в основу формулы (9) электродинамическая модель резонатора с «магнитными» стенками на торцах пластины и отсутствием излучения со стороны этих торцов позволяет хорошо описать структуру электромагнитного поля в реальной пластине. Некоторые расхождения результатов расчета и эксперимента обусловлены, помимо нестрогости электродинамической модели, также погрешностью эксперимента и отличием диэлектрической проницаемости материала пластины, использованной в эксперименте, от номинального значения $\epsilon_r = 10,4$.

Библиографический список

1. Диэлектрические резонаторы / М.Е. Ильченко [и др.]. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
2. Добротность сапфирового дискового резонатора с проводящими торцевыми стенками в миллиметровом диапазоне длин волн / А.А. Баранник [и др.] // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып. 5. С. 99–103.
3. Исследование азимутальных колебаний в дисковом диэлектрическом резонаторе с проводящими торцевыми стенками / Ю.Г. Белов [и др.] // Антенны. 2014. Вып. 8 (207). С. 59–67.
4. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
5. Фельдштейн, А.Л. Справочник по элементам волноводной техники / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. – М.: Сов. радио, 1967. – 651 с.

Дата поступления
в редакцию 05.02.2015

Yu. G. Belov¹, V.I. Voroshilov², V.A. Malakhov¹, I.A. Nefed'ev¹

ELECTROMAGNETIC OSCILLATIONS IN THE DIELECTRIC PLATE WITH BILATERAL METALLIZATION RESONATOR RESEARCH

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Nizhny Novgorod research institute of radio engineering²

Subject: The resonator in the form of the rectangular dielectric plate metallized from two parties.

Method: The electrodynamic analysis is based on the assumption that on all or part of a surface of the resonator the boundary condition corresponding to a "magnetic" wall (when the tangential component of a magnetic field is considered equal to zero on this surface) is satisfied at high dielectric transmittivity of material of resonator.

Results: Results of calculation of resonant frequencies and quality factor of fluctuations in the resonator are presented. These values were also calculated by means of a package of mathematical modeling ANSOFT HFSS for the purpose of control of correctness of the received expressions. Results of calculation of resonant frequencies were compared with data of experiment.

Conclusions: It is shown that results of calculations and mathematical modeling coincide with high precision. It testifies to correctness of the received settlement expressions. Results of calculation and experiment are rather similar. It testifies that the electrodynamic model of the resonator with "magnetic" walls at the end faces of a plate allows to receive well description of structure of an electromagnetic field in the real dielectric plate with bilateral metallization.

Range of application: Measurement of parameters of dielectrics of the dielectric plates covered with a foil.

Key words: the metallized dielectric plate, resonant frequency, quality factor, dielectric parameters.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 517.9

С.Н. Алексеенко, С.Н. Нагорных, И.П. Рязанцева

О МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ ЗАДАЧ НЬЮТОНОВОЙ ДИНАМИКИ СКАЛЯРНОЙ ПЛОТНОСТИ ДИСЛОКАЦИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Построены математические модели задач, описывающих динамику скалярной плотности дислокаций, обоснована возможность исследования некоторых классов таких задач методами теории операторов монотонного типа и методом дополнительного аргумента.

Ключевые слова: скалярная плотность дислокаций, теория операторов монотонного типа, метод дополнительного аргумента.

Известно описание ньютоновой динамики дислокаций с помощью тензорной плотности дислокаций [1]. Калибровочно инвариантная динамика дислокаций описывается как тензорной плотностью дислокаций и дисклинаций для янг-милсовских полей [2], так и скалярной плотностью прямолинейных дефектов для теории сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау-Абрикосова [3]. Кроме того, скалярная плотность дислокаций широко известна в описании механических свойств кристаллов и сплошных сред [4]. В частности, в диссипативной механике, определяемой взаимодействием дислокаций и точечных дефектов, скалярная плотность дислокаций применяется для вычисления скорости пластической деформации [5]. Указанное взаимодействие приводит к переползанию краевых и скручиванию винтовых дислокаций, которые во внешних силовых полях могут вызывать разрушения. Это взаимодействие проявляется как основное [4] при облучении, отжиге, закалке, циклическом деформировании вблизи поверхности, при поверхностных реакциях и т.д.

По указанным причинам актуальной является математическая модель для скалярной плотности скользящих дислокаций при движении вперед-назад v_{\mp} и скалярной плотности переползающих дислокаций v , имеющей вид системы дифференциальных уравнений

$$\dot{v}_{\mp} = G_{\mp} - a_{\mp} v_{\mp} - b v_{\mp} v, \quad (1)$$

$$\dot{v} = b v_{\delta} v - a_M(v) v + S \operatorname{div}[(v_k - v) \nabla v], \quad (2)$$

с некоторыми граничными условиями, где v_k , G_{\mp} , a_{\mp} , b , S - положительные постоянные, $v_{\delta} = v_+ + v_-$, $a_M(v)$ - функция, характеризующая частоту поглощения плотности дислокаций для некоторого стока. Укажем, что ∇ - трехмерный градиент с множителем $(v_k - v)$ [6] (впервые введен Я.Б. Зельдовичем в [7]) с коэффициентом v для описания структурного характера температурных полей.

Через v_{δ} и v определяются деформация, растяжение и кручение стержней, напряжение материала, а также в точке переключения $v_{\delta} = a_M(v) b^{-1}$ около однородного решения [8]

описывается зарождение продольных и поперечных трещин как неустойчивый рост v до критического значения v_k при изолированном массообмене:

$$\frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R} = 0, \quad (3)$$

где l – длина стержня; R – его радиус.

Исследуем возможность расщепления решения системы (1), (2) для стационарного случая в следующей форме

$$v(x, y, z) = \tilde{v}(x, y) + \bar{v}(z) \quad (4)$$

для вычисления крутильной жёсткости (КЖ) стержней. Известно, что КЖ тонких стержней вычисляется как количество вязкой жидкости, протекающей через трубу соответствующего сечения [1]. Роль такой жидкости в твердом поликристаллическом стержне могут играть дислокации – элементарные носители деформации.

Подставив (4) в (1), (2) и исключив v_δ из (2) для нециклического нагружения (т. е. $v_\delta = v_+, a_\delta = a_+$), получим

$$Sv_k \Delta(\bar{v} + \tilde{v}) - S(\bar{v} + \tilde{v})\Delta(\bar{v} + \tilde{v}) - S(\nabla(\bar{v} + \tilde{v}))^2 + \left[\frac{bG}{a_\delta + b(\bar{v} + \tilde{v})} - a_M(\bar{v} + \tilde{v}) \right] (\bar{v} + \tilde{v}) = 0. \quad (5)$$

Пусть функция \bar{v} удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\Delta \tilde{v} = -1, \quad (6)$$

где $\tilde{v} = \text{const}$ на контуре сечения стержня, тогда (5) примет вид

$$-Sv_k + Sv_k \Delta \bar{v} - S(\bar{v} + \tilde{v})\Delta \bar{v} + S(\bar{v} + \tilde{v}) - S(\nabla(\bar{v} + \tilde{v}))^2 + \left[\frac{bG}{a_\delta + b(\bar{v} + \tilde{v})} - a_M(\bar{v} + \tilde{v}) \right] (\bar{v} + \tilde{v}) = 0. \quad (7)$$

В рамках этого подхода примем, что $\tilde{v} \ll \bar{v}$, $\nabla \tilde{v} \ll \nabla \bar{v}$, поэтому в (7) слагаемыми с \tilde{v} можно пренебречь. Следовательно, от (7) придем к равенству

$$-Sv_k + Sv_k \Delta \bar{v} - S\bar{v}\Delta \bar{v} + S\bar{v} - S(\nabla \bar{v})^2 + \left[\frac{bG}{a_\delta + b\bar{v}} - a_M(\bar{v}) \right] \bar{v} = 0. \quad (8)$$

Учитывая, что $\bar{v} = \bar{v}(z)$, уравнение (8) перепишем в виде

$$(v_k - \bar{v})\bar{v}''_z - (\bar{v}'_z)^2 + \frac{1}{S} \left[\frac{bG}{a_\delta + b\bar{v}} - a_M(\bar{v}) \right] \bar{v} + \bar{v} - v_k = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) можно привести к обыкновенному дифференциальному уравнению второго порядка с бифуркацией Богданова – Такенса и слабодиссипативной динамикой $\bar{v}''_z - (\mu_1 + \mu_2 \bar{v})\bar{v}'_z + \tilde{A} + \tilde{B}\bar{v} + \tilde{C}\bar{v}^2 = 0$, где $\mu_1, \mu_2, \tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$ – некоторые постоянные.

Вычитая из (5) уравнение (7), получаем

$$(\Delta \tilde{v} + 1)(v_k - v) = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает либо возникновение распределения дислокаций при упругом кручении, либо при вязком течении. Последнее связано с занулением квазилинейной диффузии дислокаций по двум причинам: равенство нулю линейного по v коэффициента диффузии (вязкости) или лапласиана от v . Чтобы реально исследовать роли того и другого явления, допустим $v \approx v_k$. При одном из значений постоянной v_k плотность дислокаций имеет кри-

тическое значение, при котором материал стержня течет, подобно невязкой жидкости. В [8] исследовалось дислокационное зарождение трещин при циклическом кручении стержня, при этом v_k имело смысл критической плотности дислокаций, вызывающей безбарьерное зарождение продольных или поперечных трещин в стержне. Отметим, что v_k является универсальной величиной во всех диссипативных процессах. Этим и объясняется особый интерес исследователей к квазилинейному дифференциальному уравнению (2).

Выбирая в (5) другой вариант расщепления $\tilde{v}(x, y) + \bar{v}(z) \approx v_k$, приходим к уравнению

$$S(\nabla(\bar{v} + \tilde{v}))^2 = \left[\frac{bG}{a_\delta + b(\bar{v} + \tilde{v})} - a_M(\bar{v} + \tilde{v}) \right] (\bar{v} + \tilde{v}) = 0. \quad (11)$$

Пусть $\tilde{v} \gg \bar{v}$, $\nabla\tilde{v} \gg \nabla\bar{v}$, тогда от (10) приходим к уравнению

$$(\nabla\tilde{v})^2 = f(\tilde{v})\tilde{v}, \quad (12)$$

где
$$f(\tilde{v}) = \frac{1}{S} \left[\frac{bG}{a_\delta + b\tilde{v}} - a_M(\tilde{v}) \right].$$

Разложив функцию $f(\tilde{v})$ по степеням $\tilde{v} - v_k$ и отбросив члены более высокого порядка малости, чем \bar{v} , из (12) выведем уравнение

$$(\bar{v}'_z)^2 = \Phi_1 + \Phi_2\bar{v}, \quad (13)$$

где $\Phi_1 = f(v_k)v_k$, $\Phi_2 = -[f(v_k) + f'(v_k)v_k]$. Решение уравнения (13), удовлетворяющее начальному условию $\bar{v}(0) = \bar{v}_0$, $\Phi_1 + \Phi_2\bar{v}_0 \geq 0$, определяется равенством

$$\bar{v} = \frac{\left(\frac{\Phi_2 z}{2} \mp \sqrt{\Phi_1 + \Phi_2 \bar{v}'_0} \right)^2 - \Phi_1}{\Phi_2}.$$

Система уравнений (6), (9) относится к упругому кручению для малой \tilde{v} и однородной диссипативной динамикой \bar{v} вдоль оси кручения. Уравнения (12), (13) описывают движение большой \tilde{v} слабо диссипативной динамики и малой \bar{v} , квадратично изменяющейся вдоль стержня.

Согласно [1], крутильная жесткость C при модуле сдвига μ определяется равенством

$$C = 4 \iint_D \mu (\nabla\tilde{v})^2 dx dy, \quad (14)$$

где D – область пластического деформирования. Учитывая определение вектора Бюргера

$$|\bar{b}| = \iint_D \tilde{v} dx dy$$

в [1], имеем упругую C либо вязкую \tilde{C} крутильную жесткость в линейном по \tilde{v} приближении:

$$C = \frac{\mu\pi R^4}{2}, \quad \tilde{C} = \frac{bG/a_\delta - a_M}{S} |\bar{b}|.$$

Момент кручения $M = \tau C$ при постоянном τ будет определять упругое либо вязкое кручение. В общем случае крутильная жесткость C из (14) определяется на основе уравнения (12).

Сформулируем итог приведенных выкладок как пространственно-локальный аналог диссипативной теоремы Зельдовича. Если в точке переключения

$v_\delta = a_M(v)b^{-1}$, $v = \bar{v} + \tilde{v}$, $\tilde{v}|_S \neq 0$, $\bar{v}(z_0) \neq 0$, то стационарное трехмерное уравнение квазилинейной диффузии (2) при $v \approx v_k$, $\tilde{v} \gg \bar{v}$ сводится к системе из дифференциального уравнения первого порядка в частных производных (12) и из обыкновенного дифференциального уравнения (13), а при $\tilde{v} < \bar{v} < v_k$ сводится к системе, состоящей из дифференциального уравнения второго порядка (6) в частных производных и обыкновенного дифференциального уравнения (9).

Уравнение (12) имеет левую часть, совпадающую с левой частью известного уравнения эйконала Гамильтона-Якоби, но полученного из диссипативной модели механики дислокаций. По этой причине уравнение (12) можно называть уравнением стационарных диссипативных структур.

Известно, что сильный упругий изгиб ζ плоской пластины и компоненты смещений при растяжении u_x , u_y связаны соотношениями [1]

$$E \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 \right)^2 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy}, \quad (15)$$

$$\frac{E}{2(1 + \sigma)} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) = \sigma_{xy}. \quad (16)$$

Если задана внешняя сила P при пренебрежимо малой цилиндрической жесткости (σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} - компоненты тензора напряжений; σ - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости) при

$$\beta \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (17)$$

где β – постоянная, имеем дифференциальное уравнение в частных производных первого порядка

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} + \beta \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 = \frac{2P_{xy}(1 + \sigma)\sigma_{xx}}{\beta E P_{xx}}, \quad (18)$$

где P_{xy} , P_{xx} – компоненты внешней силы P , рассматриваемой как тензор.

Допустим, что при увеличении упругой деформации выше пороговой начинается пластическая деформация, пропорциональная скалярной плотности дислокаций ν , модулю вектора Бюргера $|\vec{b}| = b$ и соответствующим длинам скольжения l_1 и l_2 :

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} = \nu b (l_1 + l_2). \quad (19)$$

Прогиб кристалла ζ можно ввести с помощью стенки краевых дислокаций [5] через угол φ разворота соседних кристаллов

$$\frac{b}{2\zeta} = \varphi, \quad (20)$$

где $\zeta = 0,5h_{\min}^*$ (h_{\min}^* – минимальное расстояние между дислокациями в стенке на границе соседних кристаллов). Таким образом, кристаллическая пластина толщиной $0,5h_{\min}^*$ получает прогиб ζ . В теории слабого изгиба тонких пластин имеется иное приближение $h \gg \zeta$ [1].

Также будем считать, что в рамках принятых приближений

$$\frac{\varphi}{bd} = \nu, \quad (21)$$

где d - расстояние между стенками в изогнутом кристалле.

Если следовать приближению $\bar{l} \gg \zeta$ [1] (\bar{l} - длина пластины), то для выполнения линейности в определении деформации и упругости должно выполняться соотношение $\bar{l}d \gg 1/\nu$. Для диапазона изменения ν в пределах от 10^6 до 10^{12}cm^{-2} и \bar{l} в пределах от 10^{-3} до 10cm реально наблюдается диапазон изменения d в пределах от 10^{-6} до 10cm .

Так как при диффузионной ползучести наблюдаются дислокационные стенки, то воспользуемся их известным выражением при растяжении из [9]:

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \sigma_{xx} \frac{\overline{DC}^3}{d^2 kT}, \quad (22)$$

где \overline{D} , \overline{C} , k , T – постоянные величины; $\dot{\varepsilon}_{xx}$ - скорость ползучести. Уравнение (22) в совокупности с предположением (17) характеризуют свойство модели, которое назовем одномерным растяжением.

В силу (19) естественно записать $\varepsilon_{xx} = \nu b l_3$, где l_3 - длина пути скольжения дислокации при растяжении вдоль оси OX . Тогда скорость деформации вдоль оси OX примет вид

$$\dot{\varepsilon}_{xx} = \dot{\nu} b l_3 + \nu b v_x, \quad (23)$$

где v_x считаем известной постоянной величиной. При более детальном анализе v_x может быть неизвестной функцией, определяемой из некоторого уравнения.

Подставляя в (18) выражения (20), (21) и (23), приходим к дифференциальному уравнению в частных производных

$$\frac{\partial \nu}{\partial t} - \frac{a_1}{\nu^4} \left(\frac{\partial \nu}{\partial x} \right)^2 + f(\nu) = 0, \quad (24)$$

где $f(\nu) = a_2 \nu$, a_1 и a_2 – положительные постоянные.

Диссипативный характер (24) следует из диссипативного выражения (22), причем в постоянные a_1 и a_2 входят температурные множители D/kT . При сильном растяжении внешними растягивающими силами тонкую пластинку обычно называют мембраной. Если пренебречь дополнительным продольным растяжением при сильном изгибе, то уравнение равновесия мембраны имеет вид [1]

$$h \sigma_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} + P = 0, \quad (25)$$

где h – толщина пластинки, $\sigma_{\alpha\beta}$ - тензор напряжения. В нелинейной постановке изгиб мембраны ζ при $h \sigma_{\alpha\beta} = 1$ описывается уравнением, подобным (25), следующего вида:

$$-\frac{\partial}{\partial x} a_1(x, y, \zeta, \zeta'_x) - \frac{\partial}{\partial y} a_2(x, y, \zeta, \zeta'_y) = -P(x, y, \zeta) - q(x, y), \quad (26)$$

$$\zeta(x, y)|_\Gamma = 0, \quad (27)$$

где $q(x, y)$ – реакция препятствия; $(x, y) \in G \subset R^2$, G - ограниченная измеримая область.

Из изложенного следует, что множество математических моделей, возникающих в классической механике дислокаций, весьма многообразно, поэтому универсального метода для изучения всего множества этих задач не существует. В данной работе приводятся два метода исследования отдельных классов задач механики дислокаций.

Метод операторов монотонного типа

Пусть X - рефлексивное банахово пространство, X^* - его сопряженное, причем X и X^* - считаем строго выпуклыми пространствами, $\langle y, x \rangle$ при $y \in X^*$, $x \in X$ есть отношение двойственности между пространствами X и X^* . Если $X = H$ - гильбертово пространство,

то $\langle y, x \rangle = (y, x)$, где (y, x) – скалярное произведение элементов y и x из H . В наших условиях на X определен однозначный оператор $J^s : X \rightarrow X^*$ с $s > 1$ такой, что

$$\|J^s x\| = \|x\|^{s-1}, \quad \langle J^s x, x \rangle = \|x\|^s \quad \forall x \in X. \quad (28)$$

Оператор J^s называется дуальным отображением с масштабной функцией $\mu(t) = t^{s-1}$. При $s = 2$ для J^s используют обозначение J и называют его дуальным отображением.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. Оператор $A : X \rightarrow X^*$ называется монотонным, если

$$\langle Ax - Ay, x - y \rangle \geq 0 \quad \forall x \in X, \quad \forall y \in X. \quad (29)$$

Если равенство в (29) имеет место только при $x = y$, то оператор A называется строго монотонным.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2. Оператор $A : X \rightarrow X^*$ называется равномерно монотонным, если

$$\langle Ax - Ay, x - y \rangle \geq \varphi(\|x - y\|) \quad \forall x \in X, \quad \forall y \in X,$$

где $\varphi(0) = 0$, $\varphi(s)$ - возрастающая функция при $s \geq 0$.

Если $\varphi(s) = cs^2$ с постоянной $c > 0$, то A называется сильно монотонным оператором.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 3. Оператор $A : X \rightarrow X$ называется аккретивным, если

$$\langle J(x - y), Ax - Ay \rangle \geq 0 \quad \forall x \in X, \quad \forall y \in X. \quad (30)$$

Подобно монотонному случаю вводятся понятия строго, равномерно и сильно аккретивных операторов.

При исследовании сходимости приближенных методов решения уравнений с монотонными и аккретивными операторами различные авторы пришли к необходимости введения следующих понятий.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 4. Оператор $A : H \rightarrow H$ называется обратным сильно монотонным, если

$$\langle Ax - Ay, x - y \rangle \geq M \|Ax - Ay\|^2, \quad M > 0 \quad \forall x \in X, \quad \forall y \in X. \quad (31)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 5. Оператор $A : X \rightarrow X$ называется обратным сильно псевдоаккретивным, если при $s > 1$

$$\langle J^s(x - y), Ax - Ay \rangle \geq M^{s-1} \|Ax - Ay\|^s, \quad M > 0 \quad \forall x \in X, \quad \forall y \in X. \quad (32)$$

Существование и единственность решений нелинейных уравнений с монотонными и аккретивными операторами, а также некоторые приближённые методы решения таких уравнений, включая методы регуляризации, изучались, например, в [10 - 13].

В приведённых уравнениях динамики скалярной плотности дислокации использован нелинейный оператор (см., например, (9))

$$Au = \begin{cases} \frac{u(x)}{b_1 + b_2 u(x)}, & u(x) \geq 0, \\ 0, & u(x) < 0, \end{cases} \quad (33)$$

где b_1, b_2 - положительные постоянные; $u(x)$ - функция переменной x , $x \in [a, b]$. Поскольку $|Au(x)| \leq |u(x)|$ при всех $u(x) \geq 0$, $x \in [a, b]$, то $A : X \rightarrow X$, причем X может быть как банаховым пространством $L^p[a, b]$, $p > 1$, так и гильбертовым $H = L^2[a, b]$ (см., например, [14, 10]).

Так как в $L^2[a, b]$ $(u, v) = \int_a^b u(x)v(x)dx$, то в силу неубывания Au по u делаем вывод о монотонности оператора $A : L^2[a, b] \rightarrow L^2[a, b]$ (см. примеры в [11]).

Пусть теперь $X = L^p[a, b]$ и $p > 1$, тогда A действует из X в X . Покажем справед-

ливость свойства (32) для оператора A , определяемого формулой (33), при $s = p$. Для этого достаточно установить неравенство

$$\|Au - Av\|^p = \langle J^p(Au - Av), Au - Av \rangle \leq \frac{1}{M^{p-1}} \langle J^p(u - v), Au - Av \rangle \quad (34)$$

при некотором $M > 0$. Отметим, что $J^p u = |u(x)|^{p-2} u(x)$ (см. [12, 13]). Если $u(x) \leq 0, v(x) \leq 0$ при всех $x \in [a, b]$, то (34), очевидно, верно при любом $M > 0$. Пусть теперь $u(x) \geq 0, v(x) \leq 0$, тогда

$$\begin{aligned} \|Au - Av\|^p &= \|Au\|^p = \langle J^p(Au), Au \rangle = \\ &= \int_a^b \left| \frac{u(x)}{b_1 + b_2 u(x)} \right|^{p-2} \left(\frac{u(x)}{b_1 + b_2 u(x)} \right)^2 dx \leq \frac{1}{b_1^{p-1}} \int_a^b u^{p-2}(x) \frac{u^2(x)}{b_1 + b_2 u(x)} dx = \\ &= \frac{1}{b_1^{p-1}} \langle J^p u, Au \rangle \leq \frac{1}{b_1^{p-1}} \langle J^p(u - v), Au - Av \rangle, \end{aligned}$$

т.е. неравенство (34) верно при $M = b_1$. Если $u(x) \geq 0, v(x) \geq 0$, то

$$\begin{aligned} |Au(x) - Av(x)| &= \frac{b_1 |u(x) - v(x)|}{[b_1 + b_2 u(x)][b_1 + b_2 v(x)]} \leq \frac{|u(x) - v(x)|}{b_1}, \\ |Au(x) - Av(x)|^2 &\leq \frac{1}{b_1} [u(x) - v(x)][Au(x) - Av(x)]. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \langle J^p(Au - Av), Au - Av \rangle &= \int_a^b |Au(x) - Av(x)|^{p-2} (Au(x) - Av(x))^2 dx \leq \\ &\leq \frac{1}{b_1^{p-1}} \int_a^b |u(x) - v(x)|^{p-2} [u(x) - v(x)][Au(x) - Av(x)] dx = \frac{1}{b_1^{p-1}} \langle J^p(u - v), Au - Av \rangle. \end{aligned}$$

Таким образом, свойство (32) при $c = b_1$ имеет место для рассматриваемого оператора A .

Заметим, что из (32) вытекает аккретивность оператора A , но, как нетрудно видеть, свойством равномерной аккретивности оператор A не обладает.

Обратимся к задаче (26), (27). Покажем, что при определённых условиях на функции $a_1(x, y, \chi), a_2(x, y, \chi)$ и $P(x, y, \chi)$ она входит в класс задач с монотонными операторами.

Пусть функции $a_i(x, y, \chi), i = 1, 2, P(x, y, \chi)$ измеримы по $(x, y) \in G$ при всех $\chi \in R^1$, непрерывны и не убывают по χ при почти всех $(x, y) \in G$, причем

$$|a_i(x, y, \chi)| \leq c_i [g_i(x, y) + |\chi|^{p-1}], \quad i = 1, 2, \quad |P(x, y, \chi)| \leq c_3 [g_3(x, y) + |\chi|^{p-1}], \quad (35)$$

где $c_i > 0, g_i(x, y) \in L^q(G), q = p/(p-1), p > 1, i = \overline{1, 3}$.

Введем пространство $X = \{ \chi \mid \chi = \chi(x, y) \in W_1^p(G), (x, y) \in G, \chi(x, y)|_{\Gamma} = 0 \}$

с нормой $\|\chi\| = \left(\iint_G [|\chi'_x(x, y)|^p + |\chi'_y(x, y)|^p] dx dy \right)^{1/p}$ и определим оператор A :

$$\langle A\chi, \eta \rangle = \iint_G [a_1(x, y, \chi'_x)\eta'_x + a_2(x, y, \chi'_y)\eta'_y + P(x, y, \chi)\eta] dx dy \quad \forall \chi, \eta \in X.$$

Из условий (35) вытекает, что однозначный оператор A действует из X в X^* (см. [1, 5]), неубывание функций $a_1(x, y, \chi)$, $a_2(x, y, \chi)$ и $P(x, y, \chi)$ по χ обеспечивает монотонность оператора A (см. [11]). Таким образом, задача (26), (27) может быть изучена с помощью теории монотонных операторов.

Метод дополнительного аргумента

Разработано несколько разных методов для исследования разрешимости нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка. Например, всем известный классический метод характеристик, метод Галеркина, метод потоков. Как и любой метод, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Нельзя выделить какой-либо метод, позволяющий решать любые дифференциальные уравнения в частных производных первого порядка. Каждый из известных методов хорошо применим только к определенному классу уравнений. Если, например, обратиться к тому же самому методу характеристик, то оказывается, что он с успехом применяется лишь в случае, когда коэффициенты перед производными не содержат неизвестных функций. А для систем квазилинейных дифференциальных уравнений реально его применять довольно сложно. В первую очередь, это связано с тем, что при применении метода характеристик для таких уравнений в соответствующем интегральном уравнении появляется суперпозиция неизвестных функций. Далее, в методе характеристик условием разрешимости исходной задачи является условие существования обратной функции для решения характеристического уравнения. Нахождение обратной функции является очень не простой задачей.

Рассмотрим, для примера, задачу Коши

$$\partial_t u(t, x) + a(t, x, u(t, x)) \partial_x u(t, x) = f(t, x, u(t, x)), \quad x \in (-\infty, \infty), t \in [0, T_*], T_* = \text{const}, \quad (34)$$

$$u(0, x) = \varphi(x), \quad -\infty < x < \infty. \quad (35)$$

Применяя метод характеристик, мы приходим к следующей системе уравнений

$$\frac{d\eta(s)}{ds} = a(s, \eta(s), u(s, \eta(s))), \quad (36)$$

$$\frac{du(s, \eta(s))}{ds} = f(s, \eta(s), u(s, \eta(s))). \quad (37)$$

В рамках классического метода характеристик исследование системы (36), (37) сводится к исследованию нелинейной системы интегральных уравнений, где всегда реально присутствует суперпозиция неизвестных функций, не всегда, правда, явно выписываемая. И найдя решение в характеристических переменных, для получения решения исходной задачи (1), (2) требуется перейти от характеристических переменных к переменным (t, x) . Последняя задача во многих случаях бывает настолько сложной, что её не решают, а принимают допустимость обратного преобразования переменных в качестве условия.

Для преодоления отмеченных трудностей рассмотрим для задачи (34), (35), вместо характеристической системы (36), (37), «расширенную» характеристическую систему вида

$$\frac{d\eta(s, t, x)}{ds} = a(s, \eta(s, t, x), w(s, t, x)), \quad (38)$$

$$\frac{dw(s, t, x)}{ds} = f(s, \eta(s, t, x), w(s, t, x)), \quad (39)$$

с дополнительными условиями

$$\eta(t, t, x) = x, \quad (40)$$

$$w(0, t, w) = \varphi(\eta(0, t, x)), \quad -\infty < x < \infty. \quad (41)$$

Таким образом, решение уравнений (38), (39) с условиями (40), (41) будет зависеть от s , t , и x , где t и x - это исходные независимые переменные, а s - дополнительный аргумент.

Отличительной особенностью задачи (38) - (41), которая составляет основу метода дополнительного аргумента, является то, что функция $u(t, x) = w(t, t, x)$ на интервале своего существования представляет собой решение задачи (1), (2) в исходных переменных.

Для доказательства этого факта перейдем от задачи (38) - (41) к соответствующей системе интегральных уравнений

$$\eta(s, t, x) = x - \int_s^t a(v, \eta(v, t, x), w(v, t, x)) dv, \quad (42)$$

$$w(s, t, x) = \varphi(x - \int_0^t a(v, \eta(v, t, x), w(v, t, x)) dv) + \int_0^s f(\tau, \eta(\tau, t, x), w(\tau, t, x)) d\tau. \quad (43)$$

Продифференцировав уравнения (42), (43) по t и x и, составив систему уравнений относительно выражений $\frac{\partial \eta(s, t, x)}{\partial t} + a(t, x, w(t, t, x)) \frac{\partial \eta(s, t, x)}{\partial x}$, $\frac{\partial w(s, t, x)}{\partial t} + a(t, x, w(t, t, x)) \frac{\partial w(s, t, x)}{\partial x}$, получим, что на интервале существования решения задачи (38) - (41) эти выражения должны быть равны нулю:

$$\frac{\partial \eta(s, t, x)}{\partial t} + a(t, x, w(t, t, x)) \frac{\partial \eta(s, t, x)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial w(s, t, x)}{\partial t} + a(t, x, w(t, t, x)) \frac{\partial w(s, t, x)}{\partial x} = 0.$$

С учетом этих равенств и уравнения (39) для $u(t, x) = w(t, t, x)$ тогда будем иметь

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u(t, x)}{\partial t} + a(t, x, u(t, x)) \frac{\partial u(t, x)}{\partial x} = \\ & = \frac{\partial w(s, t, x)}{\partial s} \Big|_{s=t} + \frac{\partial w(s, t, x)}{\partial t} \Big|_{s=t} + a(t, x, w(t, t, x)) \frac{\partial w(s, t, x)}{\partial x} \Big|_{s=t} = f(t, x, w(t, t, x)). \end{aligned}$$

Равенство (35) следует из (43) при $s = t = 0$.

Система интегральных уравнений (42), (43) достаточно удобна для исследований. В частности, с помощью метода последовательных приближений для неё можно доказать существование локального ограниченного на всей оси решения, выяснить условия существования глобального решения или установить другие свойства решений. Также систему уравнений (42), (43) можно использовать для нахождения численного решения исходной задачи, в частности, на основе метода последовательных приближений.

Основы метода дополнительного аргумента были заложены в работах [15-19]. С тех пор с его помощью исследованы многие задачи для уравнений с частными производными первого порядка. Например, в работе [20] с помощью метода дополнительного аргумента установлены условия нелокальной разрешимости для уравнения первого порядка с дифференциальным оператором типа полной производной по времени, а в работе [21] найдены условия нелокальной разрешимости нелинейного уравнения с частными производными первого порядка.

Применим метод дополнительного аргумента для исследования разрешимости нелинейного уравнения (24). Так как для уравнений первого порядка определение условий, при которых его решение не выходит из заданного интервала, составляет отдельную задачу, примем, что $x \in R^1$. Соответственно зададим для уравнения (24) начальное условие на всей оси

$$v(0, x) = \varphi(x), \quad x \in R^1. \quad (44)$$

В соответствии с изложенной в [21] схемой вначале преобразуем (24), (44) к системе квазилинейных уравнений. Для этого продифференцируем (24) по x и, введя новую неизвестную функцию $p(t, x) = \partial_x v(t, x)$, получим уравнение

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{2\delta}{v^4} p \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{4\delta}{v^5} p^3 - Ap. \quad (45)$$

Из (44) естественным образом следует начальное условие для p :

$$p(0, x) = \varphi'(x), \quad x \in R^1. \quad (46)$$

Из (24) «сконструируем» ещё одно уравнение с тем же самым дифференциальным оператором

$$\frac{\partial v}{\partial t} - \frac{2\delta}{v^4} p \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\delta}{v^4} p^2 - Av. \quad (47)$$

Составим для задачи (44) – (47) расширенную характеристическую систему с дополнительным аргументом

$$\frac{d\eta(s, t, x)}{ds} = -\frac{2\delta}{w_0^4(s, t, x)} w_1(s, t, x), \quad \eta(t, t, x) = x, \quad (48)$$

$$\frac{dw_1(s, t, x)}{ds} = -\frac{4\delta}{w_0^5(s, t, x)} w_1^3(s, t, x) - Aw_1(s, t, x), \quad w_1(0, t, x) = \varphi'(\eta(0, t, x)), \quad (49)$$

$$\frac{dw_0}{ds} = -Aw_0(s, t, x) - \frac{\delta}{w_0^4(s, t, x)} w_1^2(s, t, x), \quad w_0(0, t, x) = \varphi(\eta(0, t, x)). \quad (50)$$

Принципиальной особенностью задачи Коши (48)–(50) является то, что функции $p(t, x) = w_1(t, t, x)$ и $v(t, x) = w_0(t, t, x)$ будут удовлетворять соответственно уравнениям (45), (47), а также начальным условиям (44), (46). Тем самым функция $v(t, x) = w_0(t, t, x)$ даст решение исходной задачи Коши (24), (44) в исходных координатах.

Чтобы упростить дальнейшие выкладки, выведем уравнение для $v(s, t, x) = \frac{w_1(s, t, x)}{w_0^4(s, t, x)}$:

В результате приходим к задаче Коши:

$$\frac{dv}{ds} = 3Av, \quad v(0, t, x) = \varphi_0(\eta(0, t, x)) = \frac{\varphi'(\eta(0, t, x))}{\varphi^4(\eta(0, t, x))}. \quad (51)$$

Задача Коши (50) переписется в виде

$$\frac{dw_0}{ds} = -Aw_0 - \delta v^2 w_0^4, \quad w_0(0, t, x) = \varphi(\eta(0, t, x)), \quad (52)$$

а решение задачи Коши (48) будет определяться формулой

$$\eta(s, t, x) = x + 2\delta \int_0^s v(\tau, t, x) d\tau, \quad (53)$$

Для нахождения функции $v(s, t, x)$ получим уравнение

$$v(s, t, x) = \varphi_0(x + 2\delta \int_0^s v(\tau, t, x) d\tau) e^{3As}. \quad (54)$$

Таким образом, задача нахождения решения расширенной характеристической системы (48), (49), (50) свелась к последовательному решению нелинейного интегрального уравнения (54) и задачи Коши (52), которая также сводится к нелинейному интегральному уравнению.

Существование достаточно гладких решений соответствующих интегральных уравнений может быть доказано с помощью метода последовательных приближений. Функция $w_1 = v w_0^4$ будет удовлетворять задаче Коши (49). Также с помощью метода последовательных приближений могут быть найдены приближенные решения построенных интегральных уравнений и, следовательно, построено решение исходной задачи.

Не углубляясь дальше в подробности, резюмируем, что решение задачи Коши (24), (44) может быть получено с помощью метода дополнительного аргумента. Заключаем, что метод монотонных операторов и метод дополнительного аргумента представляют собой эффективный аппарат для исследования некоторых задач динамики скалярной плотности дислокаций.

Библиографический список

1. Ландау, Л.Д. Теория упругости / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука. 1987. – 245 с.
2. Кадич, А. Калибровочная теория дислокаций и дисклинаций / А. Кадич, Д. Эделен. – М.: Мир, 1987. – 168 с.
3. Олемской, А.И. Перестройка конденсированного состояния атомов в условиях интенсивного внешнего воздействия / А.И. Олемской, В.А.Петрунин // Изв. вузов. Сер. Физика. 1987. № 1. С. 82–121.
4. Фридель Ж. Дислокации / Ж. Фридель. – М.: Мир. 1967. – 643 с.
5. Косевич, Д.М. Основы механики кристаллической решетки / Д.М. Косевич. – М.: Наука. 1972. – 200 с.
6. Зельдович, Я.Б. Предельный закон теплопередачи во внутренней задаче при малых скоростях // ЖЭТФ. 1937. Т. 7. Вып. 12. С. 1466–1468.
7. Таланов, В.И. Стимулированная диффузия и кооперативные эффекты в распределенных кинетических системах // Нелинейные волны: сб. ст. – М.: Наука. 1983. С. 47–56.
8. Феноменологическая модель эволюции дислокационных структур при циклическом кручении / П.Л. Крупкин [и др.] // ФММ. 1988. Т. 66. Вып. 5. С. 978–84.
9. Физическое металловедение / под ред. Р.Кана. – 3-е изд. – М.: Мир. 1968. – 484 с.
10. Вайнберг, М.М. Вариационный метод и метод монотонных операторов в теории нелинейных уравнений / М.М. Вайнберг. – М.: Наука, 1972. – 416 с.
11. Гаевский, Х. Нелинейные операторные уравнения и операторные дифференциальные уравнения / Х. Гаевский, К. Грёгер, К.Захариас. – М.: Мир, 1978. – 336 с.
12. Alber, Ya. Nonlinear ill-posed problems of monotone type / Ya.Alber, I. Ryazantseva. – Dordrecht: Springer, 2006. – 410 p.
13. Рязанцева, И.П. Избранные главы теории операторов монотонного типа / И.П. Рязанцева. – Нижний Новгород: НГТУ, 2008. – 273 с.
14. Вайнберг, М.М. Вариационные методы исследования нелинейных операторов / М.М. Вайнберг. – М.: Гостехиздат, 1956. – 345 с.
15. Иманалиев, М.И. К теории нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных типа Уизема / М.И. Иманалиев, С.Н. Алексеенко // Докл. АН. 1992. Т. 323. №3. С. 410–414.
16. Иманалиев, М.И. К теории систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных типа Уизема / М.И. Иманалиев, С.Н. Алексеенко // Докл. АН. 1992. Т. 325. №6. С. 1111–1115.
17. Иманалиев, М.И. К теории нелинейных уравнений с дифференциальным оператором типа полной производной по времени / М.И. Иманалиев, С.Н. Алексеенко // Докл. АН. 1993. Т.329. №5. С. 543–546.
18. Иманалиев, М.И. К вопросу существования гладкого ограниченного решения для системы двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка / М.И. Иманалиев, С.Н. Алексеенко // Докл. РАН. 2001. Т. 379. №1. С. 16–21.
19. Иманалиев, М.И. Метод дополнительного аргумента / М.И. Иманалиев, П.С. Панков, С.Н. Алексеенко // Вестник Казахского нац. университета. Сер. Матем., механика, информ. 2006. № 1. С. 60–64.
20. Алексеенко, С.Н. Применение метода дополнительного аргумента к исследованию нелокаль-

ной разрешимости задачи Коши для уравнения первого порядка с дифференциальным оператором типа полной производной по времени / С.Н. Алексеенко, Е.А. Елькина // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. 2011. № 2(87). С. 320–329.

21. **Алексеенко, С.Н.** Исследование условий нелокальной разрешимости уравнения диссипативных стационарных структур / С.Н. Алексеенко, С.Н. Нагорных, Е.А. Елькина // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2012. №1. Ч. 1. С. 122–128.

*Дата поступления
в редакцию 11.12.2014*

S.N. Alekseenko, S.N. Nagornikh, I.P. Ryazantseva

**ON THE MATHEMATICAL MODELS OF THE NEWTONIAN DYNAMICS
FOR THE SCALAR DENSITY OF DISLOCATIONS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

This paper presents some mathematical models, describing the dynamics of the scalar density of dislocations, also there is substantiated the possibility of the study of some classes of such problems by the methods of the monotone type operators and by the method of an additional argument.

Key words: scalar density of dislocations, theory of operators of monotone type, method of an additional argument.

УДК 523.42-852

К.Г. Петров,¹ О.Н. Савина²**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ДЛЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ СО СКАЧКОМ ТЕМПЕРАТУРЫ**Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева¹,
НИУ Высшая школа экономики, Н. Новгород²

Получено характеристическое уравнение для акустико-гравитационных волн в атмосфере со скачком температуры. Определены горизонтальные масштабы и частоты собственных мод в атмосферном волноводе, между жесткой нижней границей и свободной верхней границей. Проанализирован аджастмент эффект, обусловленный наличием в атмосфере резкого скачка температуры. В рамках численного счета конкретизированы параметры собственных колебаний для модели солнечной атмосферы.

Ключевые слова: атмосфера, неизотермичность, волновые процессы, собственные колебания.

Введение

Задача о распространении акустико-гравитационных волн в атмосфере с реалистичским профилем температуры обычно решается с помощью нескольких взаимодополняющих методов. В настоящее время много работ посвящено обсуждению результатов продвинутых численных расчетов, авторы которых уделяют большое внимание как можно более полному учету различных атмосферных обстоятельств путем включения их в решаемые уравнения (см., например, [1, 2]). Такой подход, с одной стороны, весьма эффективен, так как дает возможность получить некие картины волновых полей. Однако, с другой стороны, требуется кропотливая работа по морфологии полученных результатов численных расчетов, а для придания результатам доказательной убедительности нужны какие-то дополнительные тесты. Аналитический подход к решению рассматриваемых задач разрабатывался многими авторами с середины прошлого века [3]. Весьма эффективным оказался подход, основанный на использовании различных модельных высотных профилей температуры (см., например, [4, 5]). Простые аналитические модели профилей температуры позволяют получить точные решения для полей акустико-гравитационных волн в атмосфере и провести их последующий анализ [6]. Еще одна модель была применена авторами работы [7], в которой аналитически было показано существование поверхностных волн на скачке температуры в переходной области солнечной атмосферы.

Высотный профиль температуры солнечной атмосферы представлен на рис. 1, а. Современные экспериментальные исследования свойств атмосфер планет с помощью космических аппаратов показали наличие температурного скачка в атмосфере Юпитера. На рис. 1, б представлены характерные профили температуры атмосферы Юпитера, которые для масштабов, превосходящих размеры переходного слоя, можно аппроксимировать, используя модель из двух слоев с постоянной температурой без разрыва плотности на границе.

В данной работе рассматривается модель атмосферы со скачком температуры. Анализируются общие свойства полей акустико-гравитационных волн, следующие из выведенного характеристического уравнения. Основное внимание уделяется рассмотрению собственных колебаний атмосферы. Показано, что в выбранной модели собственные колебания с параметрами, зависящими только от вертикальной координаты, отсутствуют. Ранее это утверждение было получено для модели с разрывом плотности [3] и при анализе свойств поверхностных волн в задаче с разрывом плотности при анализе свойств поверхностных волн [5].

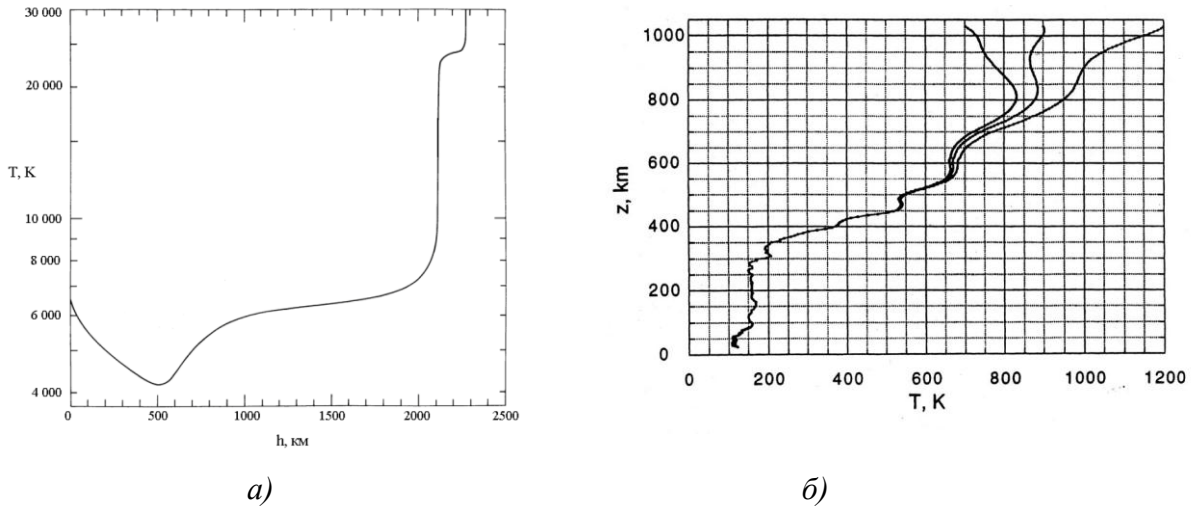


Рис. 1. Высотный профиль температуры:
a – солнечной атмосферы [8]; *б* – в атмосфере Юпитера [9]

Характеристическое уравнение для модельной задачи о волновых процессах со скачком температуры

2

Возьмем за основу модельный профиль атмосферной температуры, состоящий из двух изотермических слоев с различными, меняющимися скачком значениями температуры с жесткой нижней границей (рис. 2). Тогда решение для вертикальной скорости среды w_1 в нижнем слое (индекс 1) можно представить в виде $w_1 = (A \cdot e^{-ik_{z1}z} + B e^{ik_{z1}z}) e^{-i\omega t + ik_x x + z/2H_1}$, а в верхней области (индекс 2) в виде $w_2 = D e^{ik_{z2}z} e^{-i\omega t + ik_x x + z/2H_2}$. Здесь A, B, D - постоянные, значения которых определяются граничными условиями; ω - частота волны; k_x, k_z - горизонтальная и вертикальная компоненты волнового вектора соответственно; H - высота однородной атмосферы. Ось z направлена вертикально вверх, координата z отсчитывается от области перепада температуры.

Воспользовавшись известным дисперсионным соотношением для акустико-гравитационных волн в изотермической атмосфере, запишем выражение для k_z для изотермического слоя

$$k_z = \sqrt{\frac{\omega^2 - \omega_A^2}{c^2} - \frac{(\omega^2 - \omega_g^2)k_x^2}{\omega^2}}. \tag{1}$$

Рассмотрим задачу о нахождении собственных частот колебаний для выбранной модели атмосферы. В этом случае поля возмущений должны соответствовать нулевому среднему вертикальному потоку энергии. Поэтому в верхней среде решение представляет собой прижатую к верхней границе волну, т.е. должно быть выполнено условие $k_{z2} = -ik_2$, (k_2 - действительны). Запишем характеристическое уравнение для акустико-гравитационных волн в атмосфере со скачком температуры. Для этого мы воспользуемся граничными условиями: потребуем равенство нулю вертикальной скорости на жесткой нижней границе и ее непрерывность на границе между двумя температурными областями.

Условие на нижней границе при $z = -l$ дает

$$B = -A e^{2ik_z l}. \tag{2}$$

На границе $z = 0$ выполняется условие непрерывности вертикальной скорости:

$$w_1 = w_2. \tag{3}$$

Граничное условие (3) позволяет определить связь между коэффициентами D и A

$$D = A(1 - e^{2ik_z l}). \tag{4}$$

Воспользовавшись условием равенства давлений на границе $z = 0$, мы получаем

$$p_1 = p_2 + g(\rho_{01} - \rho_{02}) \frac{iw_2}{\omega}. \quad (5)$$

Примем во внимание известное соотношение, связывающее возмущение давления p и вертикальной компоненты скорости w :

$$p = \frac{\omega \rho_0}{i(\omega^2 - c^2 k_x^2)} \left(c^2 \frac{\partial w}{\partial z} - gw \right). \quad (6)$$

Запишем теперь характеристическое уравнение. Для этого, используя соотношения (2) и (4), подставим выражение (6) для каждого из изотермических слоев в соотношение (5):

$$\begin{aligned} & \frac{\omega \rho_{01}}{i(\omega^2 - c_1^2 k_x^2)} \left\{ \left[c_1^2 \left(-ik_{z1} + \frac{1}{2H_1} \right) - g \right] A + \left[c_1^2 \left(ik_{z1} + \frac{1}{2H_1} \right) - g \right] B \right\} = \\ & = \frac{\omega \rho_{02}}{i(\omega^2 - c_2^2 k_x^2)} \left[c_2^2 \left(ik_{z2} + \frac{1}{2H_2} \right) - g \right] D + g(\rho_{01} - \rho_{02}) \frac{iD}{\omega}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь ρ_0 - равновесная плотность среды; g - ускорение силы тяжести; c - скорость звука; индексы $1, 2$ относятся к нижней и верхней среде соответственно. После подстановки в (7) постоянных B, D получаем характеристическое уравнение для акустико-гравитационных волн в атмосфере со скачком температуры

$$\frac{k_{z1} \gamma H_1 \text{ctg}(k_{z1} l) + \frac{\gamma}{2} - 1}{(\omega^2 - c_1^2 k_x^2)} = \frac{R \left(ik_{z2} \gamma H_2 + \frac{\gamma}{2} - 1 \right)}{(\omega^2 - c_2^2 k_x^2)} + \frac{1 - R}{\omega^2}, \quad (8)$$

где $R = \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}}$. Если воспользоваться соотношением (1), то формулу (8) можно записать в более удобном виде

$$\frac{K_1}{\rho_{01} c_1^2 (\omega_{g1}^2 - \omega^2)} \left(1 + \frac{g^2 \Delta \rho \gamma K_2}{\rho_{02} c_2^2 (\omega_{g2}^2 - \omega^2)} \right) = \frac{K_2 \left(\frac{2 - \gamma}{2\gamma} - k_{z1} H_1 \text{ctg}(k_{z1} l) \right)}{\rho_{02} c_2^2 (\omega_{g2}^2 - \omega^2) \left(\frac{2 - \gamma}{2\gamma} - ik_{z1} H_1 \right)}, \quad (9)$$

где $K_1 = \frac{2 - \gamma}{2\gamma} + ik_{z1} H_1$, $K_2 = \frac{2 - \gamma}{2\gamma} + ik_{z2} H_2$.

Характеристическое уравнение (9) при $l \rightarrow \infty$ и комплексных значениях k_{z1} переходит в уравнение, полученное в работе [7] и описывающее поверхностные волны на скачке температуры.

Для упрощения дальнейшего анализа введем безразмерные переменные:

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{\omega}{\omega_{g1}}, \omega_{g1}^2 = \frac{(\gamma - 1)g}{\gamma H_1}, \omega_{a1}^2 = \frac{\gamma g}{4H_1}, K = k_x H_1, X_1 = \kappa_1 H_1, X_2 = \kappa_2 H_2 \\ \beta &= \frac{H_2}{H_1}, \alpha = \frac{\omega_{a1}^2}{\omega_{g1}^2} = \frac{\gamma^2}{4(\gamma - 1)}, \xi = \frac{l}{H_1}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$X_1 = \sqrt{\frac{\alpha - \Omega^2}{4\alpha} - \frac{K^2(1 - \Omega^2)}{\Omega^2}}, \quad X_2 = \sqrt{\frac{\alpha - \beta\Omega^2}{4\alpha} - \frac{\beta K^2(1 - \beta\Omega^2)}{\Omega^2}}.$$

Тогда характеристическое уравнение переписывается в виде

$$\frac{-X_1 \operatorname{cth}(X_1 \xi) + \frac{2-\gamma}{2\gamma}}{(\Omega^2 - 4\alpha K^2)} = \frac{R \cdot (\frac{2-\gamma}{2\gamma} + X_2)}{(\Omega^2 - 4\alpha\beta K^2)} - \frac{1-R}{\gamma\Omega^2}. \quad (11)$$

Уравнение (11) по-прежнему имеет довольно сложно для общего анализа, но упрощается в приближении непрерывности плотности на уровне скачка температуры.

Исследование характеристического уравнения в атмосфере со скачком температуры, но без скачка плотности

Как было отмечено ранее, собственные колебания для рассматриваемой модели атмосферы возможны только, если X_2 действительная величина. Последнее накладывает условия на частоту и горизонтальные масштабы рассматриваемых возмущений.

Следуя работе [7], для упрощения анализа будем полагать $\rho_{01} = \rho_{02}$. Тогда характеристическое уравнение примет вид

$$\frac{-X_1 \operatorname{cth}(X_1 \xi) + \frac{2-\gamma}{2\gamma}}{(\Omega^2 - 4\alpha K^2)} = \frac{\frac{2-\gamma}{2\gamma} + X_2}{(\Omega^2 - 4\alpha\beta K^2)}. \quad (12)$$

Если выполнено условие $X_1 \xi \gg 1$, то уравнение (12) переходит в уравнение для поверхностных волн на скачке температуры без учета нижней границы. В этом предельном случае уравнение имеет точное аналитическое решение

$$\omega = \sqrt{gk}. \quad (13)$$

Свойства этого решения обсуждались в работе [6].

Рассмотрим частный случай вертикального распространения волн. В уравнении (12) будем считать $K = 0$. Тогда уравнение преобразуется к виду

$$\sqrt{\alpha - \Omega^2} \cdot \operatorname{cth} \left(\xi \sqrt{\frac{\alpha - \Omega^2}{4\alpha}} \right) = -\sqrt{\alpha - \Omega^2} \beta. \quad (14)$$

Поскольку мы ищем собственные моды колебаний, в верхней среде волна должна быть прижата к границе $z = 0$, тогда энергия колебаний будет локализована в ограниченной области. В этом случае подкоренное выражение в правой части уравнения (14) должно быть неотрицательным, т.е. $\Omega < \sqrt{\alpha/\beta}$. В реальных условиях солнечной атмосферы $\beta \gg 1$, заведомо выполнено условие $\Omega < \sqrt{\alpha}$. Котангенс гиперболический при положительном аргументе имеет только положительные значения, поэтому уравнение (14) не имеет решения, и собственные решения в атмосфере с температурным профилем со скачком температуры не существуют для колебаний с $K = 0$.

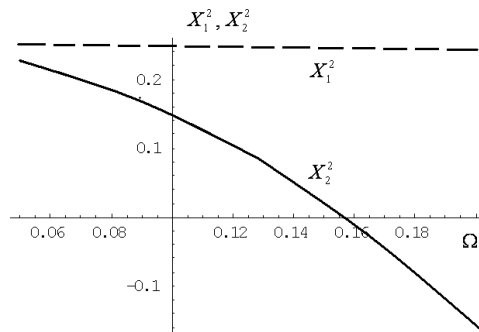


Рис. 2. График зависимости $X_{1,2}^2(\Omega)$, показывающий возможность собственных колебаний при $X_2^2(\Omega) > 0$

Графики на рис. 2 построены для значений $\xi = 5$ и $\beta = 50$, что соответствует условиям солнечной атмосферы. Как видно из рис. 2, можно было бы ожидать собственные колебания на частоте ниже частоты ω_A в верхней среде. В реальности свойства среды таковы, что уравнение (13) не имеет решения. Однако из этого не следует делать вывод об отсутствии собственных колебаний, возможно, в этой ситуации используемая нами модель требует уточнения.

Собственные колебания атмосферы со скачком температуры

Рассмотрим собственные колебания атмосферы в модели со скачком температуры и без разрыва плотности. Остановимся на характеристическом уравнении (11). В приближении безграничной атмосферы это уравнение имеет точное решение (13). Как было показано в работе [7], это решение соответствует прижатой к области перепада температуры поверхностной волне, но существует она только при определенных горизонтальных масштабах возмущений $\frac{1}{2H_2} < k_\lambda < \frac{1}{2H_1}$. Таким образом, решение при $k_\lambda = 0$ в приближении безграничной атмосферы не существует. Аналогичная ситуация была установлена при введении в рассмотрение нижней границы.

Наличие нижней границы приводит к существованию собственных решений в виде захваченных в образующийся между нижней жесткой границей и верхней свободной границей. Анализ выражений для X_1 и X_2 позволяет найти область частот и горизонтальных компонент волновых векторов, для которых одновременно выполняются условия

$$X_2^2(\Omega) > 0, X_1^2(\Omega) < 0. \quad (15)$$

Напомним, что случай, когда $X_{1,2}^2(\Omega) > 0$ соответствует прижатой к верхней границе поверхностной волне (если одновременно выполняются условия $X_2^2(\Omega) < 0, X_1^2(\Omega) < 0$, то энергия в волновод не захвачена). Если справедливо условие (15), то численный анализ позволяет найти набор частот, захваченных в волновод возмущений (рис. 3).

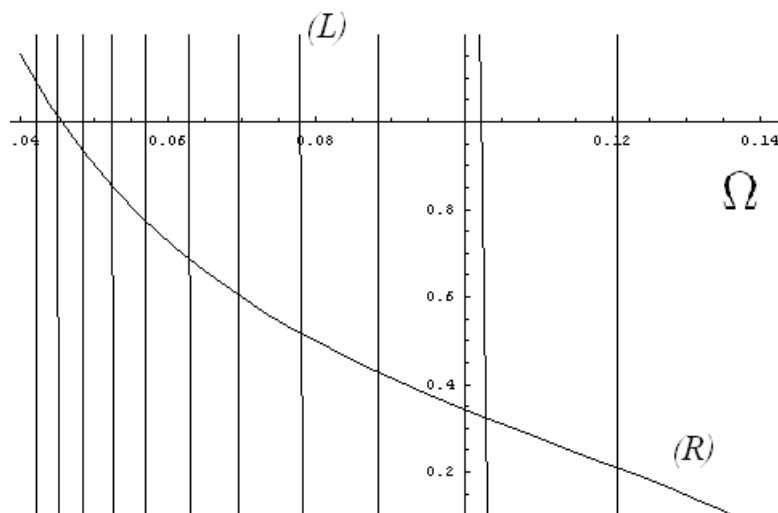


Рис. 3. Зависимость левой (L) и правой (R) части уравнения (12) от Ω

Решениям уравнения (12) соответствуют точки пересечения графиков. На рис. 3 зависимости построены при значениях $\xi = 5$ и $\beta = 50$, $K = 0.2$, когда выполнено условие (15). Решение уравнения (12) для тех же значений параметров ξ и β в области справедливости (15) представлено на рис. 4.

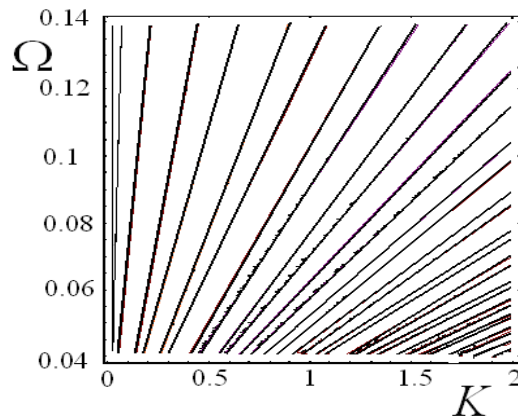


Рис. 4. Характеристические кривые для собственных мод колебаний

Заключение

Для солнечной атмосферы большое значение представляют так называемые пятиминутные колебания, наблюдаемые как на Земле, так и с помощью космических аппаратов [10]. Важно разобраться, как локализована энергия этих колебаний, какая часть энергии выходит за пределы атмосферы. Для Солнца эти вопросы сопряжены с проблемой коронального нагрева [11].

Согласно проведенному анализу, основанному на применении аппроксимации атмосферной температуры скачком на высотах переходного слоя, параметры собственных колебаний зависят от величины перепада температур и мало зависят от расположения нижней границы (для Солнца она расположена на высоте фотосферы, значение $l \approx 2000$ км). Частота собственных мод, бегущих горизонтально, определяется температурой сверху, и их период больше, чем на порядок, ниже 5 мин.

Вынужденные колебания (например, колебания, вызываемые конвективными движениями фотосферы), не захвачены в волновод и высвечиваются из солнечной атмосферы, если их частоты превосходят частоту ω_A - нижнюю частоту быстрой моды акустико-гравитационных волн в хромосфере. Отметим, что резкий скачок температуры в солнечной атмосфере приводит к так называемому аджастмент эффекту, соответствующему приспособлению собственных возмущений атмосферы к внешним условиям.

Данная работа поддержана РФФИ по проекту № 14-05-00565 а и Научным фондом НИУ ВШЭ по проекту 14-09-0170.

Библиографический список

1. **Gavrilov, N.M.** Three-dimensional numerical simulation of nonlinear acoustic-gravity wave propagation from the troposphere to the thermosphere / N.M. Gavrilov, S.P. Kshevetskii // *Earth, Planets and Space*, 2014. V. 66 (DOI: 10.1186/1880-5981-66-88).
2. **Lound, T.S.** Numerical simulation of gravity wave breaking in the lower thermosphere / T.S. Lound, D.C. Fritts // *J. Geophys. Res.* 2013. V.117, N D21, 105 (DOI:10.1029/2012JD017536).
3. **Госсард, Э.** Волны в атмосфере / Э. Госсард, У. Хук. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
4. **Петрухин, Н.С.** Безотражательное распространение акустических волн в атмосфере Земли / Н.С. Петрухин, Е.Н. Пелиновский, Е.К. Бацина // *Письма в ЖЭТФ*. 2011. Т. 93. Вып. 10. С. 625–628.
5. **Савина, О.Н.** Поверхностные волны на перепаде атмосферной температуры // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1997. Т. 33. № 1. С. 48–52.
6. **Григорьев, Г.И.** Акустико-гравитационные волны в атмосфере с кусочно-линейным температурным профилем / Г.И. Григорьев, О.Н. Савина // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2002. Т. 45. № 8. С. 664–670.
7. **Беспалов, П.А.** Акустико-гравитационные волны вблизи скачка температуры Солнечной ат-

- мосферы / П.А. Беспалов, О.Н. Савина // Письма в астрономический журнал. 1998. Т. 24. № 1. С. 58–62.
8. **Vernazza, J.E.** Structure of the solar chromosphere.III. Models of the EUV brightness components of the quiet-sun / J.E. Vernazza, E.H. Avrett, R. Loeser // *Astrophys. J. Suppl.* 1981. V. 45. N 4. P. 635–725 (DOI:10.1086/190731).
9. Thermal structure of Jupiter's upper atmosphere derived from the Galileo probe / A. Seiff [et al.] // *Science*. 1997. V. 276. Iss. 5309. P. 102–104.
10. **Гиббсон, Э.** Спокойное солнце / Э. Гиббсон. – М.: Мир, 1977. – 408 с.
11. **Каплан, С.А.** Физика плазмы солнечной атмосферы / С.А. Каплан, С.Б. Пикельнер, В.Н. Цытович. – М.: Наука, 1977. – 225 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2015*

K.G. Petrov,¹O.N. Savina²

ANALYSIS OF CHARACTERISTIC EQUATIONS FOR ACOUSTIC GRAVITY WAVES IN THE ATMOSPHERE WITH TEMPERATURE JUMP

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
National research university Higher school of economics, N. Novgorod²

Purpose: In this paper we study low frequency oscillation of atmosphere with temperature jump using derivation and analyze of the characteristic equation for acoustic-gravity waves.

Method: In this study we use methods of mathematical physics standard methods of numerical simulation.

Results: A characteristic equation for acoustics - gravity waves in the atmosphere with the temperature jump is obtained. Horizontal scales and frequencies of characteristic modes in atmospheric duct, between the hard bottom and the free upper boundary are shown. The adjustment effect, connected with the presence in the atmosphere of sharp temperature jump is examined. The parameters of natural oscillations for the model of solar atmosphere are numerically analyzed.

Application domain: The results of this work can be used for interpretation experimental data of solar atmosphere oscillation.

Key words: the atmosphere, nonisothermicity, wave processes, natural oscillations.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.396

Н.Ю. Бабанов, А.А. Куликов, С.В. Ларцов, В.П. Самарин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХКОНТУРНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

На основе машинного моделирования рассматриваются схемы решения и особенности работы параметрических рассеивателей, нагруженных параметрическим генератором с резонансной цепью накачки или двухчастотным параметрическим генератором.

Ключевые слова: параметрический рассеиватель, параметрический генератор, субгармоника, синхронизация.

Введение

Литература, посвященная созданию и применению параметрических рассеивателей (ПР), у которых ответный сигнал (ОС) переизлучается в окружающее пространство в результате процесса генерации новых спектральных компонент параметрическим генератором (ПГ) в основном ограничена описанием субгармонических ПР [1], ответный сигнал в которых генерируется на частоте половинной субгармоники облучающего запросного сигнала (ЗС), выступающего сигналом накачки (СН).

В то же время некоторые авторы отмечают [2, 3] возможность создания ПР, содержащего в нагрузке двухконтурный ПГ, контуры которого имеют разные собственные частоты. Такой ПГ достаточно хорошо изучен в радиотехнике [4]. Подобный ПР мог бы иметь определенные преимущества перед одноконтурным - субгармоническим ПР. В частности, в [4] указывается, что для двухконтурных ПГ фазы и частоты генерации ОС φ_1 , φ_2 , ω_1 , ω_2 связаны с фазой и частотой СН $\varphi_{СН}$, $\omega_{СН}$ как

$$\varphi_1 + \varphi_2 = \varphi_{СН} = \varphi_3, \text{ если } \omega_1 + \omega_2 = \omega_{СН} = \omega_3.$$

Это обстоятельство открывает возможность использовать в качестве рабочего ОС, принимаемого приемником, сигнал на частоте ω_1 , а в качестве синхронизирующего - сигнал на частоте ω_2 , который легко отфильтровать в приемнике ОС, настроенном на частоту ω_1 [5]. Отметим, что ЗС в таком случае, кроме СН, должен содержать в своем составе синхронизирующий сигнал (СС).

Авторам не известно работ, посвященных исследованию двухчастотных ПР в натуральных условиях или модельном эксперименте. Очевидно, это связано с тем, что двухконтурный ПГ сложнее одноконтурного – субгармонического [4], соответственно сложнее должны быть и конструкция и режимы работы двухконтурного ПР.

Принципиальная схема двухконтурного параметрического генератора

Принципиальная схема двухконтурного ПГ [4] приведена на рис. 1. Он представляет собой колебательную систему с двумя степенями свободы и имеет две собственные частоты $\Omega_{1,2}$. Параметрический рассеиватель содержит два колебательных контура, собственные ча-

стоты, которых равны $\omega_{1,2} = 1/\sqrt{L_{1,2}C_{1,2}}$. Параллельно им включен варактор – полупроводниковый диод, который представим в виде нелинейных емкости и проводимости, соединенных параллельно. Генератор возбуждается источником тока накачки $I_3 \cos \omega_3 t$. В общем случае возбуждается колебание, спектр которого образован двумя частотами, некратными друг другу и частоте накачки. Как уже отмечалось, между частотами генерации и частотой накачки существует жесткое соотношение. В общем случае определенная линейная комбинация частот возбужденных колебаний должна равняться частоте накачки.

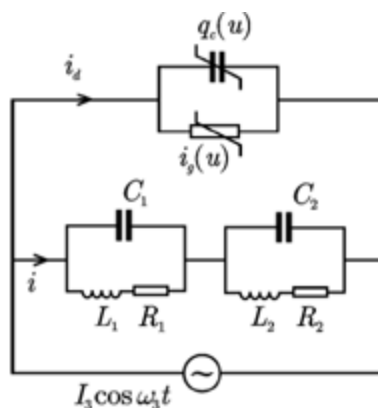


Рис. 1. Принципиальная схема двухконтурного ПГ

В [4] отмечается, что деление ПГ на одно- и двухконтурные условно. Принципиальную роль играет не число степеней свободы, а только число собственных колебаний Ω_i , в полосы которых попадают частоты генерации ω_i .

Согласно такой классификации, колебательная система, изображенная на рис. 1, называется одноконтурным ПГ с резонансной цепью накачки, если частота накачки ω_3 близка к одной из собственных частот Ω_1 , а частота субгармоники $\omega_3/2$ близка к другой собственной частоте Ω_2 . При других соотношениях частот, когда $\omega_3 = \Omega_1 + \Omega_2$, система на рис. 1, называется двухконтурным или двухчастотным ПГ.

Существует другая классификация [6], по которой двухконтурной параметрической цепью считается любая колебательная система, состоящая из двух связанных колебательных контуров, причем связь между контурами может быть любая — кондуктивная, индуктивная, емкостная, магнитная (трансформаторная) и их разновидности. Например, схема на рис. 1 согласно [6], называется параметрической системой двух связанных контуров с внешней емкостной связью, роль которой выполняет варактор (параметрический диод). По конструктивным соображениям такая схема является наиболее просто реализуемой в высокочастотном радиодиапазоне.

Таким образом, приведенной схеме соответствуют две разновидности ПГ: 1) ПГ с резонансной цепью накачки, 2) двухчастотный ПГ.

Преимущество ПГ с резонансной цепью накачки перед обычным ПГ с одиночным параметрическим контуром состоит в меньшей амплитуде тока внешнего источника, необходимой для возбуждения колебаний, и в способности поддерживать постоянный уровень напряжения накачки на варакторе, независимо от амплитуды тока внешнего источника [4].

В [4] свойства двухчастотного ПГ исследованы лишь в отношении его применимости в качестве делителя частоты с произвольным коэффициентом деления. Возможности использования подобных ПГ в качестве нагрузки ПР не исследовались.

Целью работы является исследование свойств параметрических рассеивателей, построенных на основе двухконтурных ПГ.

Математическая модель двухконтурного параметрического рассеивателя

Рассмотрим эквивалентную схему ПР, построенного на основе двухконтурной колебательной системы (рис. 2).

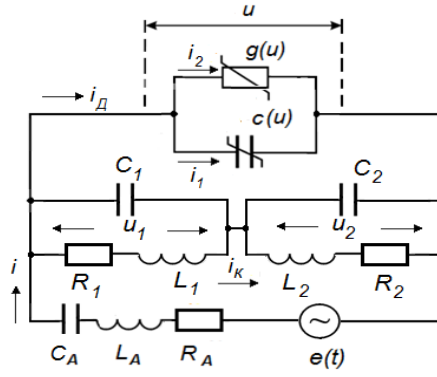


Рис. 2. Эквивалентная схема двухконтурного параметрического рассеивателя

Система базовых уравнений представляется уравнениями Кирхгофа:

$$\begin{cases} i = i_k + i_1 + i_2, \\ L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + R_1 i_{L1} = u_1, \\ L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + R_2 i_{L2} = u_2, \\ L_A \frac{di}{dt} + R_A i + \frac{1}{C_A} \int i dt + u = e, \end{cases} \quad (1)$$

где i_{L1} и i_{L2} – токи в индуктивных ветвях первого и второго контуров; u_1, u_2 – напряжения на конденсаторах C_1 и C_2 ; i_k – ток, протекающий через последовательно соединенные контуры.

Тогда, учитывая связь между током, протекающим через контур, и напряжением на контуре, получаем три дифференциальных уравнения:

$$\begin{cases} L_1 C_1 \frac{d^2 u_1}{dt^2} + R_1 C_1 \frac{du_1}{dt} + u_1 = L_1 \frac{di_k}{dt} + R_1 i_k, \\ L_2 C_2 \frac{d^2 u_2}{dt^2} + R_2 C_2 \frac{du_2}{dt} + u_2 = L_2 \frac{di_k}{dt} + R_2 i_k, \\ L_A \frac{d^2 i}{dt^2} + R_A \frac{di}{dt} + \frac{i}{C_A} = \frac{de}{dt} - \frac{du}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

Ток i_k , определяется токами $i_1; i_2$, которые в свою очередь задаются нелинейными зависимостями емкости варактора $C(U)$ и его проводимости $g(U)$.

Для конкретизации (2) примем полиномиальную аппроксимацию для $C(U)$ и экспоненциальную для $g(U)$. Дополним систему (2) четвертым уравнением для напряжения на варакторе u , после замены переменных $i = x0$; $u_1 = y0$; $u_2 = z0$; $u = v0$, получим модель рассматриваемого ПР в виде системы из восьми уравнений первого порядка (3):

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = x1; & \frac{dx1}{dt} = F_1 \\ \frac{du_1}{dt} = y1; & \frac{dy1}{dt} = F_2 \\ \frac{du_2}{dt} = z1; & \frac{dz1}{dt} = F_3 \\ \frac{du}{dt} = v1; & \frac{dv1}{dt} = F_4 \end{cases}, \quad (3)$$

где $F_1 = -\left(\frac{R_A}{L_A} x1 + \omega_{0A}^2 x0\right) + \frac{1}{L_A} \left(\frac{de}{dt} - v1\right)$;

$F_2 = -\left(\frac{R_1}{L_1} y1 + \omega_{01}^2 y0\right) + \frac{1}{C_1} \left(x1 + \frac{R_1}{L_1} x0\right) - \frac{C_0}{C_1} F_4 A - \frac{C_0}{C_1} (v1)^2 B - \frac{1}{C_1} v1 \left(\frac{R_1}{L_1} C_0 A + DE\right) - \omega_{01}^2 R_1 v0 D$;

$F_3 = -\left(\frac{R_2}{L_2} z1 + \omega_{02}^2 z0\right) + \frac{1}{C_2} \left(x1 + \frac{R_2}{L_2} x0\right) - \frac{C_0}{C_2} F_4 A - \frac{C_0}{C_2} (v1)^2 B - \frac{1}{C_2} v1 \left(\frac{R_2}{L_2} C_0 A + DE\right) - \omega_{02}^2 R_2 v0 D$;

$F_4 = \left\{ -\left(\frac{R_1}{L_1} y1 + \frac{R_2}{L_2} z1 + \omega_{01}^2 y0 + \omega_{02}^2 z0\right) + x1 \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) + x0 (R_1 \omega_{01}^2 + R_2 \omega_{02}^2) - \left(\frac{C_0}{C_1} + \frac{C_0}{C_2}\right) (v1)^2 B - \right.$
 $\left. - v1 \left[C_0 (R_1 \omega_{01}^2 + R_2 \omega_{02}^2) A + \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) DE \right] - v0 (R_1 \omega_{01}^2 + R_2 \omega_{02}^2) D \right\} / \left[1 + \left(\frac{C_0}{C_1} + \frac{C_0}{C_2}\right) A \right]$;

$A = \sum_{n=1}^N n(n+1) \beta_n v0^{n-1}$;

$B = \sum_{n=0}^N (n+1) \beta_n v0^n$; $D = g_0 e^{bv0}$; $E = [1 + bv0]$.

Результаты численного моделирования

Моделирование свойств ПР выполнялось на их виртуальной модели, реализованной средствами LabVIEW.

На рис. 3 приведены амплитудные характеристики (АХ), полученные на модели (3) для ПР с резонансной цепью накачки, в котором частота СН ω_3 близка к одной из собственных частот Ω_1 , частота субгармоники $\omega_3/2$ близка к дугой собственной частоте Ω_2 .

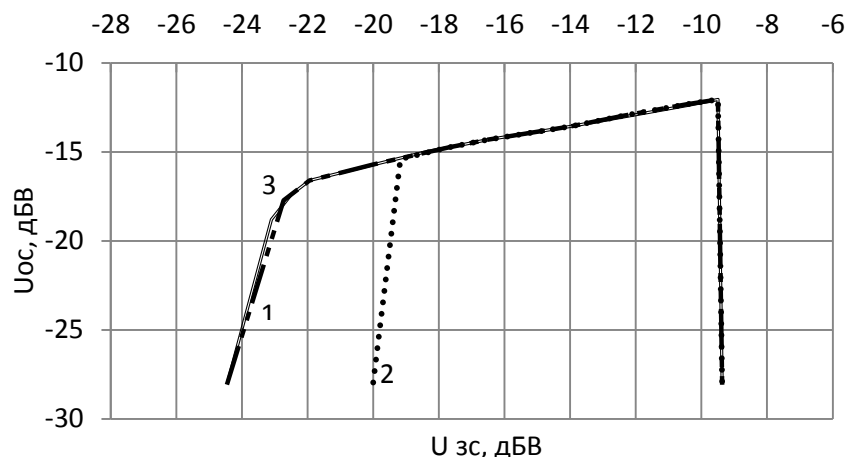


Рис. 3. Амплитудная характеристика ПР с резонансной накачкой:

1 – непрерывный режим;
2 – импульсный; 3 – импульсный с синхронизацией.

Как видно из рис. 3, особенностью АХ является то, что для импульсного ЗС уровень возбуждения существенно выше. Это связано с особенностями процессов возбуждения в ПГ. Для слабых сигналов могут наблюдаться неустойчивые процессы, длительность которых может превышать длительность радиоимпульса СН. Соответственно формирование радиоимпульса ОС не фиксируется. На рис. 3 видно, что амплитудный диапазон генерации ОС сократился на ~ 5 дБ. Если ЗС, кроме радиоимпульса СН, содержит радиоимпульс СС, происходит быстрое возбуждение ПР и вид АХ для непрерывного и импульсного ЗС совпадает. Заметим, что аналогичные процессы фиксировались и для одноконтурных ПР [7].

На рис. 4 представлены формы радиоимпульса ОС при различной относительной амплитуде $U_{зс}^* = U_{зс} / U_{зс \max}$ (длительность радиоимпульса ЗС $\tau_{зс} = 2$ мкс).

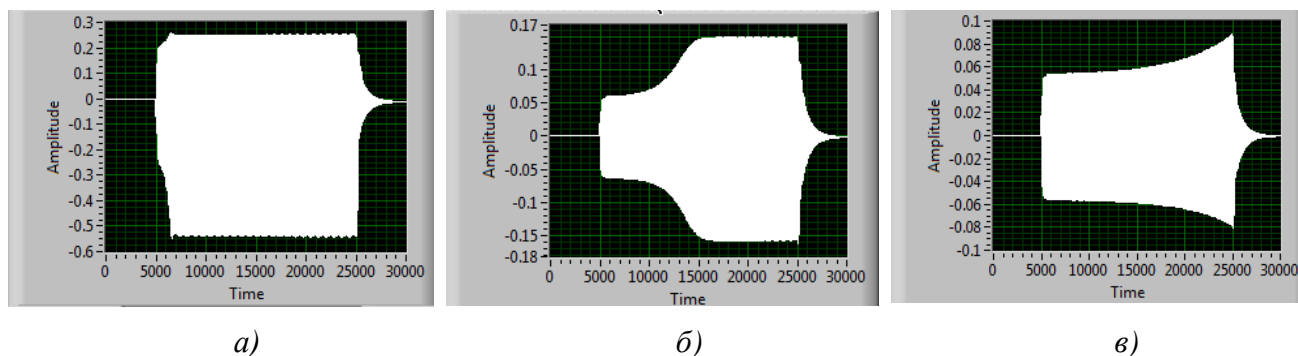


Рис. 4. Изменение формы ответного сигнала ПР с резонансной накачкой от амплитуды ЗС:

$a - U_{зс}^* = 0,93$; $b - U_{зс}^* = 0,25$; $v - U_{зс}^* = 0,224$

Изменение формы ОС от амплитуды ЗС проявляется в увеличении времени установления $T_{уст}$ амплитуды ОС с уменьшением амплитуды ЗС (рис. 4). Введение ограничения на

максимальную величину $T_{уст}$, как и в одноконтурных ПР [7], приводит к сокращению амплитудного диапазона генерации ОС. Кривая 2 (рис. 3) соответствует импульсному запросному сигналу длительности $\tau_{зс} = 2$ мкс и при допустимом времени установления $T_{уст} = 0,2$ мкс. Согласно [7], величина $T_{уст}$ приближенно может быть оценена по формуле, справедливой для одноконтурного ПГ:

$$T_{уст} = \frac{1}{\sqrt{m^2 - \xi^2 - \delta}} \ln \frac{U_0}{U_H},$$

где U_0 , U_H – конечное и начальное значения амплитуды колебаний в контуре на частоте субгармоники; m – коэффициент модуляции емкости контура; ξ – относительная расстройка контура; δ – коэффициент затухания.

Процесс установления колебаний в ПР на основе ПГ с резонансной цепью накачки отличается от аналогичного процесса в одноконтурном ПР.

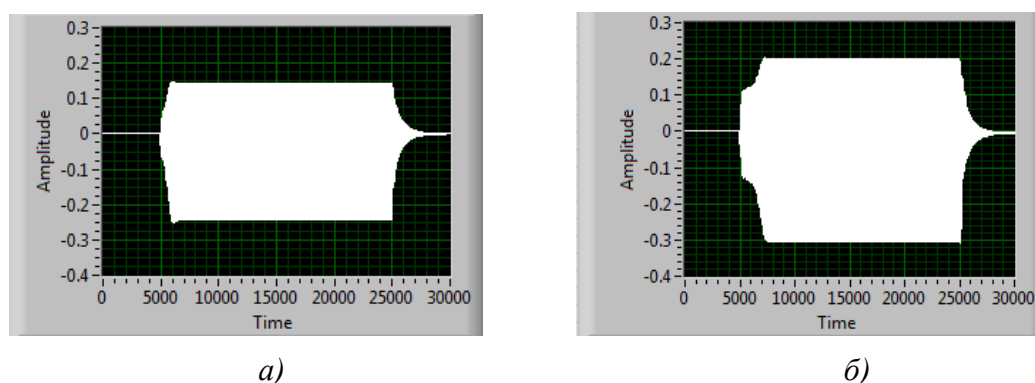


Рис. 5. Ответные сигналы:

a – одноконтурного ПР; *б* – ПР с резонансной цепью накачки

На рис. 5 приведены ответные сигналы одно- и двухконтурного ПР при $U_{зс}^* = 0,5$ и длительности ЗС $\tau_{зс} = 2$ мкс. Отличие проявляется в том, что амплитуда накачки (колебания на собственной частоте Ω_1) во время переходного процесса изменяется одновременно с изменением амплитуды возбуждаемого ОС (колебания на частоте Ω_2).

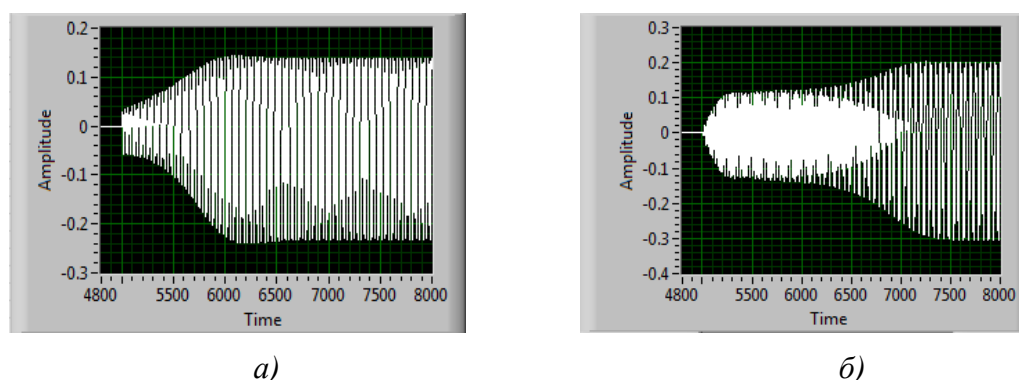


Рис. 6. Процесс установления ответного сигнала:

a – в одноконтурном ПР;
б – в двухконтурном ПР. $U_{зс}^* = 0,5$

С момента прихода ЗС ($t = 0,5$ мкс) начинается возрастание амплитуды колебаний U_1 на частоте Ω_1 (рис. 6, *б*). Ответный сигнал U_2 на частоте Ω_2 начинает формироваться после того, как амплитуда U_1 достигнет порога возбуждения параметрических колебаний (рис. 6, *б*, $t \approx 0,55$ мкс).

Экспоненциальный рост амплитуды U_2 начинается с малых начальных значений, поэтому первоначально они не сказываются на колебаниях в цепи накачки U_1 , которые успевают установиться до того, как установятся колебания U_2 . Затем, по мере приближения U_2 к стационарному значению, резко увеличивается влияние на накачку, и амплитуда падает до своего стационарного значения. На рис. 7 этому соответствует момент $t \approx 1,3$ мкс.

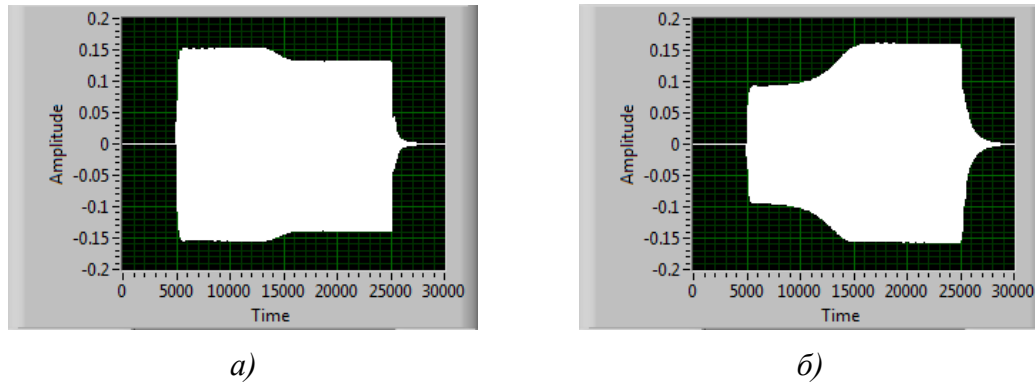


Рис. 7. Амплитуда колебаний:
 $a - U_1$ на частоте Ω_1 ; $b - U_2$ на частоте Ω_2 . $U_{3C}^* = 0,25$

Уменьшение амплитуды U_1 после возбуждения субгармоники означает передачу части мощности колебаний на частоте Ω_1 колебаниям на частоте субгармоники Ω_2 .

Особенности процесса установления амплитуды ОС в двухконтурном ПР обуславливают особенности процесса синхронизации импульсных ОС. Прежде всего, это касается взаимного расположения ЗС и синхронизирующего сигнала (СС).

Из рис. 6, б видно, что основную долю времени переходного процесса составляет время $T_{уст}$ установления амплитуды колебаний U_2 в контуре субгармоники. Установление колебаний U_1 в цепи накачки происходит за время t_1 , определяемое полосой пропускания контура накачки, поэтому $t_1 \ll T_{уст}$. Представляется целесообразным использовать этот промежуток времени для подготовки контура субгармоники к генерации импульса ОС путем передачи СС на частоте субгармоники. При этом можно совместить передние фронты импульсов ЗС и СС и ограничить длительность СС временем t_1 . Например, на рис. 6, б $t = t_1 = 0,02$ мкс. В результате, помимо синхронизации генерируемых ОС, удастся получить импульсы ОС с крутым передним фронтом $\sim 0,02$ мкс (рис. 8) во всем амплитудном диапазоне ПР (рис. 3, 3).

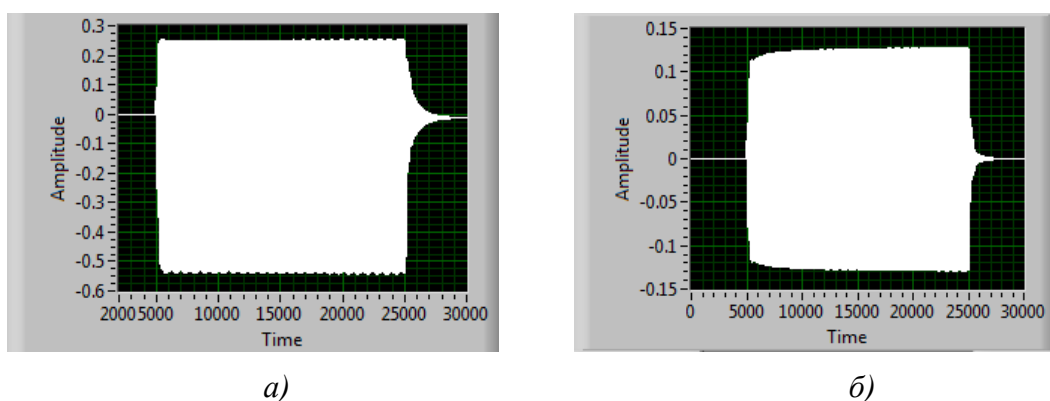


Рис. 8. Форма импульсов ОС $\tau_{ос} = 2$ мкс при синхронизации импульсами $\tau_{сн} = 0,02$ мкс:
 $a - U_{3C}^* = 0,93$; $b - U_{3C}^* = 0,2$

Длительность заднего фронта импульсов ОС обуславливается процессом рассеивания энергии субгармонических колебаний и определяется полосой контура субгармоники. Процесс установления колебаний имеет, вообще говоря, осцилляторный характер [4]. осо-

бенно большие осцилляции могут возникать, когда частота колебаний накачки $\omega_{\text{СН}}$ и субгармоники $\omega_{\text{СН}}/2$ смещены относительно собственных частот Ω_1 и Ω_2 . При настройке модели ПР необходимо учитывать, что собственные частоты $\Omega_{1,2}$ определяются не только конденсаторами $C_{1,2}$ (рис. 2) контуров, но также начальной емкостью варактора C_0 и ее динамической частью $C_{\text{д}}(U) \approx (0,1 \div 0,3)C_0$.

Как уже отмечалось, эквивалентные схемы двухчастотного ПР, как и ПР с резонансной цепью, ничем не отличаются, соответственно совпадают и их математические модели (3)–(6). Отличие двухчастотного ПР состоит в настройке параметров схемы и особенностях формирования ОС. При поступлении ЗС на частоте $f_{\text{ЗС}}$ ответный сигнал формируется в виде двух субгармоник на частоте f_1 и f_2 , причем $f_1 + f_2 = f_{\text{ЗС}}$. Настройка состоит в том, чтобы собственные частоты f_{01} и f_{02} как можно меньше отличались от частот субгармоник. Собственные частоты f_{01} и f_{02} могут значительно отличаться от частот субгармоник из-за сильной связи между контурами, определяемой начальной емкостью варактора C_0 и ее динамической частью $C_{\text{д}}(U)$. Например, при $f_{\text{ЗС}} = 300$ МГц, $f_1 = 100$ МГц и $f_2 = 200$ МГц частоты контуров L_1C_1 и L_2C_2 составляют $f_{01} = 129,105$ МГц и $f_{02} = 231,05$ МГц соответственно.

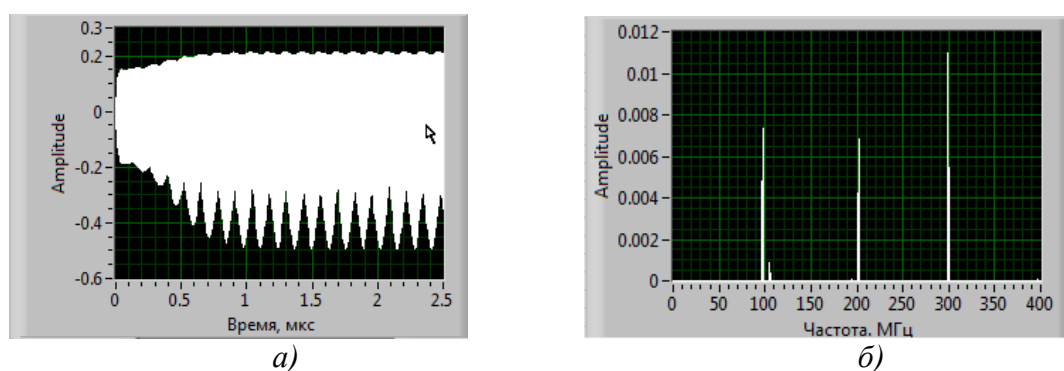


Рис. 9. Осциллограмма напряжения (а) и энергетический спектр (б) колебания на зажимах варактора

На рис. 9 представлены осциллограмма и энергетический спектр колебаний на зажимах варактора в непрерывном режиме при относительной амплитуде запросного сигнала $U_{\text{ЗС}}^* = U_{\text{ЗС}}/U_{\text{ЗС макс}} = 1$.

На рис.10 приведены осциллограммы субгармоник, выделенных соответствующими фильтрами. Видно, что даже при максимальной амплитуде ЗС процесс установления амплитуды ОС продолжается довольно долгое время ($T_{\text{уст}} = 0,6 \div 0,7$ мкс).

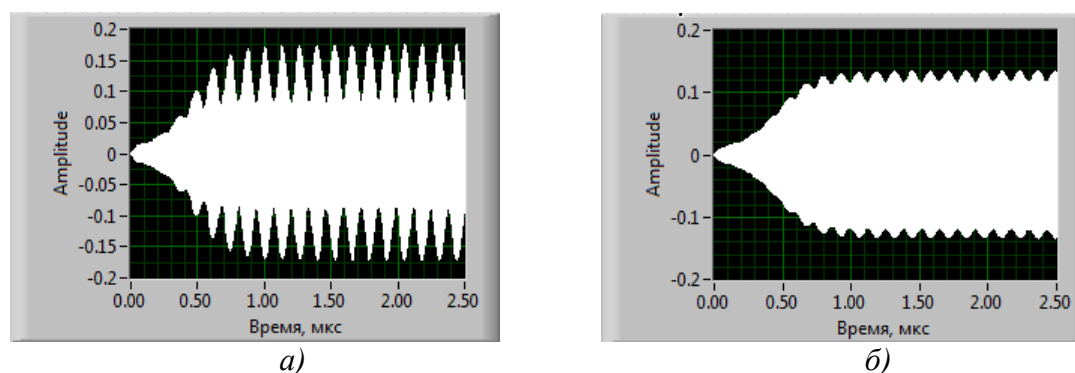


Рис. 10. Осциллограмма колебаний:

а – на частоте субгармоники $f_1 = 100$ МГц; б — на частоте субгармоники $f_2 = 200$ МГц.

Время установления колебаний $T_{\text{уст}}$ имеет существенное значение для импульсных систем обнаружения.

На рис. 11 приведены формы ответных сигналов на импульсный ЗС длительностью 2 мкс (в интервале $0,1 \div 2,1$ мкс) при различных $U_{зс}^*$.

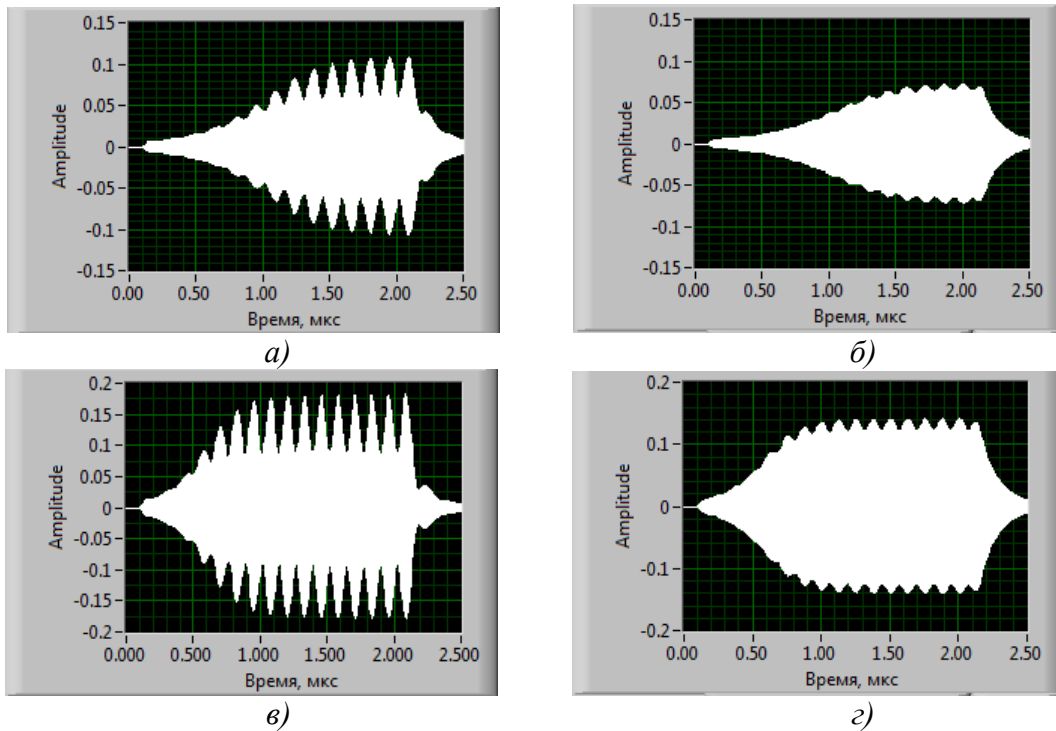


Рис. 11. Форма ответных сигналов на частотах f_1 (а) и f_2 (б) при $U_{зс}^* = 0,5$; в, г – тоже при $U_{зс}^* = 1$

Существенное сокращение длительности переднего фронта импульсов ОС наблюдается в случае применения синхронизации ОС путем передачи дополнительных СС в виде синхронизирующих импульсов, длительность которых и расположение относительно ЗС определяется закономерностями процесса нарастания ОС в контурах на частотах f_1 и f_2 рис. 12.

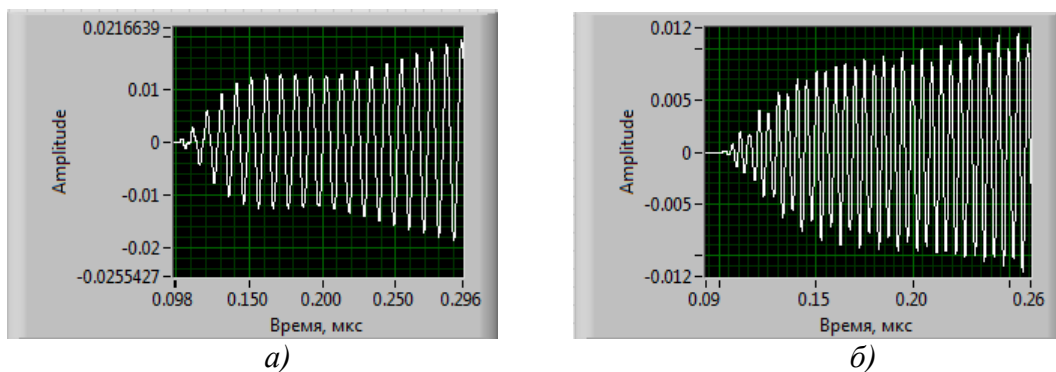


Рис. 12. Начальный этап установления колебаний:
а – на частоте f_1 ; б – на частоте f_2

Из представленных осциллограмм следует, что начальный период процесса нарастания ОС условно можно разделить на три этапа. На первом этапе t_1 (интервал $0,1 \div 0,15$ мкс) происходит "линейное" нарастание амплитуды колебаний в контуре, определяемое его характерным временем. Второй этап t_2 (интервал $0,15 \div 0,2$ мкс) соответствует квазистационарному состоянию, когда амплитуда колебаний практически не изменяется. И на третьем этапе $t_3 > t_2$ (интервал $> 0,2$ мкс) начинается интенсивное взаимодействие колебаний на частотах f_1 и f_2 путем обмена энергией [4], и колебания быстро достигают своей стационарной амплитуды.

Таким образом, для подготовки контуров к генерации импульсов ОС на частотах f_1 и f_2 путем передачи СС на частоте f_1 или f_2 целесообразно совместить передние фронты импульсов ЗС и СС и ограничить длительность СС временем t_1+t_2 . Например, на рис. 6 длительность импульсов синхронизации должна лежать в пределах $0,05 < \tau_{cc} \leq 0,1$ мкс. При уменьшении длительности СС ($\tau_{cc} < 0,05$ мкс) эффективность (влияние на форму ОС) синхронизации резко снижается, а увеличение ($\tau_{cc} > 0,1$ мкс) приводит к неоправданному увеличению длительности зондирующей посылки.

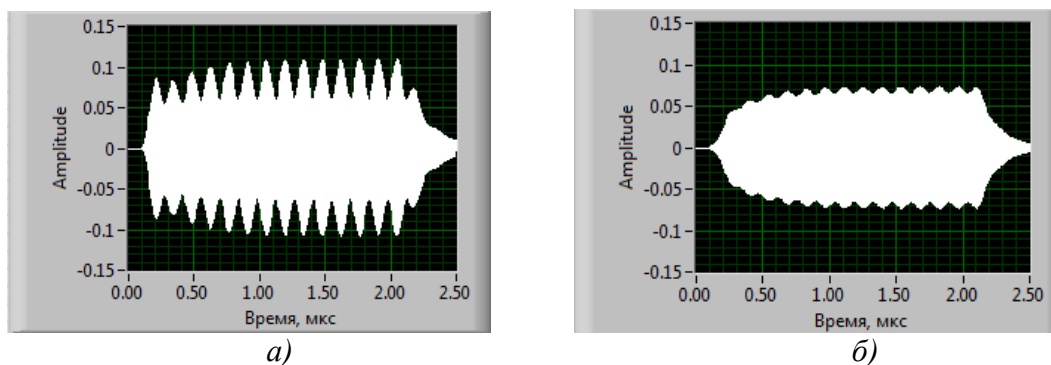


Рис. 13. Форма ОС на частотах f_1 (а) и f_2 (б) при $U_{zc}^* = 0,5$, синхронизированных СС на частоте f_1

На рис. 13 и рис. 14 представлены ответные сигналы, получаемые при совместном действии ЗС и СС длительностью $\tau_{cc} = 0,1$ мкс, передаваемых на частоте f_1 либо на частоте f_2 .

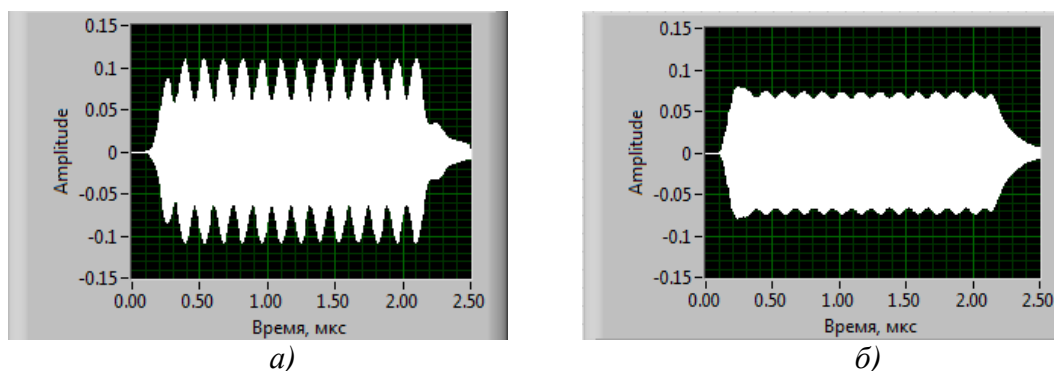


Рис. 14. Форма ответных сигналов на частотах f_1 (а) и f_2 (б), синхронизированных СС на частоте f_2 , при $U_{zc}^* = 0,5$

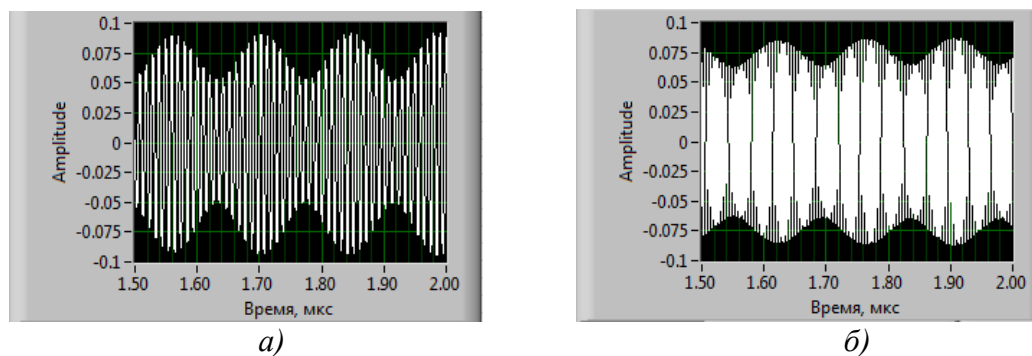


Рис. 9. Автомодаляция ОС на частоте f_1 (а) и частоте f_2 (б)

Из представленных осциллограмм следует, что сигнал синхронизации может быть передан на любой из частот f_1 или f_2 . При этом длительность передних фронтов ответных сиг-

налов составляет $\tau_{\phi} = (1,0 \div 1,5)\tau_{cc}$. Минимальное значение соответствует случаю, когда частоты СС и ОС совпадают.

На всех приведенных осциллограммах наблюдается амплитудная автомодуляция ОС как на частоте f_1 , так и f_2 . На рис. 9 приведены фрагменты ОС во временном интервале $1,5 \div 2,0$ мкс.

На основе численного решения дифференциальных уравнений ПР выяснить причины возникновения подобной модуляции практически невозможно. Однако, как следует из рис.9, на f_1 и f_2 колебания амплитуды ОС происходят противофазно друг другу, поэтому можно предположить, что эти колебания связаны с обменом энергии между контурами. Такое предположение совпадает с результатами исследования параметрических радиочепей на основе теории устойчивости [6].

Выводы

1. Возможны две конструктивные разновидности параметрических рассеивателей, нагруженных на параметрические генераторы с двумя степенями свободы: параметрический рассеиватель с резонансной цепью накачки и двухчастотный параметрический рассеиватель.

2. Формирование ответного сигнала и в параметрическом рассеивателе с резонансной цепью накачки и в двухчастотном параметрическом рассеивателе сопряжены с процессами обмена энергии между входящими в их состав электрическими контурами.

3. В состав импульсных запросных сигналов, с целью уменьшения времени переходных процессов при возбуждении ОС в параметрическом рассеивателе с резонансной цепью накачки или в двухчастотном параметрическом рассеивателе, целесообразно, кроме радиоимпульса сигнала накачки, включать радиоимпульс синхронизирующего сигнала.

Библиографический список

1. Горбачев, П.А. Нелинейный рассеиватель электромагнитных волн, создающий субгармоники // Радиотехника и электроника. 1999. №10. Т. 44. С. 1164–1167.
2. Литвинов, А.М. Радиокomплекс розыска маркеров // Патент РФ С1 2108596 RU. Заявл. 11.10.1994.
3. Ларцов, С.В. Зондирующий сигнал для обнаружения параметрических рассеивателей // Радиотехника. 2000. № 5. С. 8–12.
4. Каплан, А.Е. Параметрические генераторы и делители частоты / А.Е. Каплан, Ю.А. Кравцов, В.А. Рылов. – М.: Сов. радио, 1966. – 182 с.
5. Бабанов, Н.Ю. О когерентном накоплении при приеме сигналов от параметрических рассеивателей // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 2011. №6. Ч. 1. С. 82–92.
6. Бирюк, Н.Д. Основы теории параметрических радиочепей / Н.Д. Бирюк, В.В. Юргелас. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр ВГУ, 2012. – 127 с.
7. Бабанов, Н.Ю. Моделирование процессов переизлучения на частоте половинной субгармоники сигнала накачки в одноконтурном параметрическом рассеивателе / Н.Ю. Бабанов [и др.] // Радиофизика. 2015. №2. С. 17–23.

Дата поступления
в редакцию 12.02.2015

N.Iu. Babanov, A.A. Kulikov, S.V. Lartsov, V.P. Samarin

APPLICATION LFM-RADIOIMPULSES FOR SEARCH PARAMETRIC SCATTERERS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

A possibility of using an LFM signal in parametric scatterers search systems is studied. Results of a machine experiment are demonstrated.

Key words: parametric scatterers, LFM radiopulses, subharmonics.

УДК 004.415.2.043

А.Э. Ермилов, П.В. Мисевич

ПРИМЕНЕНИЕ ФРЕЙМОВОЙ МОДЕЛИ И НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ В ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАРИЕВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводится методика и пример использования возможностей фреймовой модели с применением аппарата нечёткой логики в процедурах-демонах фреймов. Эта методика может послужить основой для разработки информационного обеспечения автоматизированной системы мониторинга.

Ключевые слова: фреймовая модель, нечёткая логика, информационное обеспечение, автоматизированная система мониторинга.

Введение

Построение системы мониторинга поведения объектов распределённых в пространстве (физическом, виртуальном и т.д.) ставит ряд сопутствующих задач по созданию программного и информационного обеспечения, которые способны «подстраиваться» под последовательность ситуаций. Часто изменение ситуаций трудно формализовать детерминированным алгоритмом. Это инициирует разработку интеллектуальных систем, способных принимать самостоятельные решения или предоставлять варианты действий на выбор оператору.

В основе информационного обеспечения таких систем, как правило, лежат различные модели баз знаний: семантические сети, нейронные сети, продукционная модель, объектно-ориентированная модель, фреймовая модель и комбинации этих моделей [1]. Применение аппарата фреймов [2] переносит свойства моделей баз знаний на создаваемые программно-аппаратные комплексы: облегчает генерацию ситуационного описания, формализацию последовательности событий, ориентирует на модификацию и расширение системы с минимальными затратами.

Теоретический анализ

Существует хорошо зарекомендовавший себя аппарат и методика построения автоматизированных систем на базе фреймовой модели на примере САПР 80-90-х годов [3], которая ориентирована на реализацию типовых сценариев и обработку детерминированных входных данных. Кроме того, на базе фреймового подхода строится модель сценарно-ситуационного представления информации, очень близкого к человеческому мышлению [2]. А значит, существует возможность пользоваться этой моделью для создания автоматизированных систем, способных принимать решения самостоятельно.

Фреймовая модель с течением времени претерпела некоторые изменения. В [4] рассматриваются вопросы использования сети фреймов для работы с мультимедийными компонентами. В данной работе авторы предлагают развивать фреймовый подход в направлении поддержки аппарата нечёткой логики для создания инструментального комплекса информационного обеспечения, позволяющего обрабатывать нечёткие множества входных параметров.

Методика

Использование аппарата фреймов для построения машинно-ориентированных моделей в САПР поддерживает формирование ситуационного описания и формализацию сценариев [3]. В дополнение к изложенному в [3] подходу для реализации процесса заполнения

слотов предлагается использовать новый класс процедур – демонов, которые поддерживают процедуры нечёткой логики [5].

Вторым направлением применения аппарата нечёткой логики является изменение приоритетов на множестве сценариев работы автоматизированной системы.

Сформулированные задачи требуют развития фреймовой теории с целью создания инструментариев построения программного обеспечения, поддерживающих решение описанных задач. Первым шагом в этом направлении стало создание расширенной классификации элементов фреймовой сети [2], которая является дальнейшим развитием результатов, опубликованных в работе [4].

На рис. 1 показаны новые классы элементов фреймовой модели, определяющие содержанием процедур-демонов. Процедуры основаны: на агентном подходе, нейронных сетях, статистическом анализе, правилах продукции, нечёткой логике и др. Применение нечёткой логики позволяет решать задачи в предметной области не только на уровне точных значений, но и с применением естественного для человека понятийного аппарата (холодно/тепло/жарко, далеко/близко, много/мало и т. д. [5]).

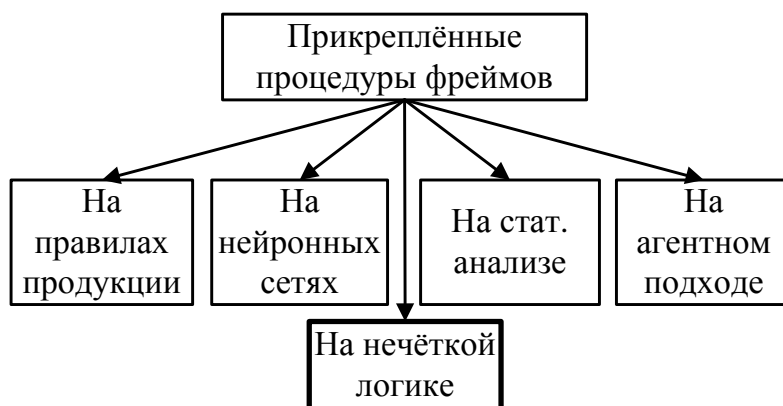


Рис. 1. Расширение классификации прикреплённых процедур фреймов аппаратом нечёткой логики

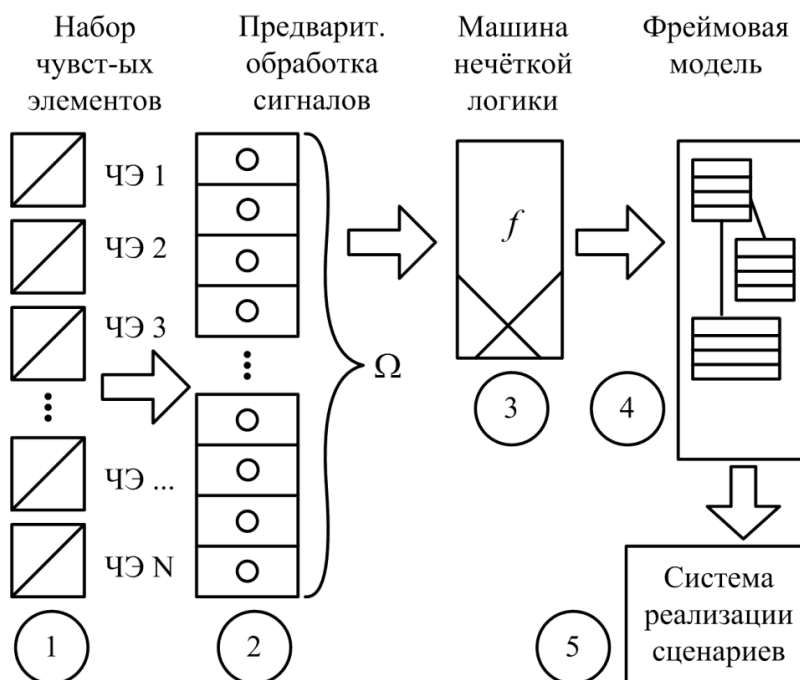


Рис. 2. Обобщённая схема системы мониторинга на базе фреймовой модели и машины нечёткой логики

Рассмотрим реализацию предлагаемого подхода на системе мониторинга (рис. 2). В этой системе данные об объекте наблюдения получаются множеством распределённых по объекту мониторинга датчиков. Сигнал от измерителя поступает в систему предварительной обработки, которая оцифровывает сигнал и делает интеллектуальную предобработку [6]. Например, для датчиков виброускорения система осуществляет выделение спектра и других характеристик временного ряда.

Для проведения измерений несколькими датчиками одновременно (схема повышенной надёжности из трех измерителей) выходные значения подвергаются обработке машиной нечёткой логики, с целью заполнения слотов и построения дерева фреймовой модели. На основе фреймовой сети генерируется сценарий функционирования автоматизированной системы, который «подстраивается под ситуацию» на объекте мониторинга.

Экспериментальная часть

В ряде случаев (например, при доводке новых типов железнодорожного подвижного состава) требуется проведение исследований поведения опытных образцов в реальных условиях эксплуатации. Тогда в качестве инструментариев используются системы мониторинга, которые с помощью чувствительных элементов контролируют множество типовых параметров Ω (рис. 2). В нашей предметной области это:

- множество показаний температуры основных рабочих узлов (буксы осей колёсных пар, двигатели, масло трансформатора, выпрямительная установка):

$$T = \langle T_1, T_2, \dots, T_i \rangle,$$

где i – количество датчиков температуры;

- множество показаний напряжения в цепях управления и контактной сети:

$$U = \langle U_1, U_2, \dots, U_j \rangle,$$

где j – количество датчиков напряжения;

- множество значений виброускорения в критических узлах (колёсно-моторный блок, буксы, тягово-сцепное устройство):

$$G = \langle G_1, G_2, \dots, G_k \rangle,$$

где k – количество датчиков виброускорения;

- множество показаний давления воздуха в главных резервуарах, тормозной пневматической магистрали и тормозных цилиндрах:

$$P = \langle P_1, P_2, \dots, P_n \rangle,$$

где n – количество датчиков давления;

- значение скорости движения V и т.д.

При построении системы мониторинга для представления результатов пользователям используется аппарат нечёткой логики, который поддерживает эмоциональную окраску ситуации (первая типовая задача, рассмотренная ранее).

Значения температуры в нашей системе интерпретируются как «нормальная», «повышенная» и «аварийная». Ответственность за заполнение значений слотов во фреймах «лежит» на так называемых процедурах-демонах, которые получают и обрабатывают входные воздействия для каждого слота во фрейме, перед занесением результатов обработки в слот (рис. 3). Таким образом, при снятии и обработке очередного значения температуры в слот будет заноситься ссылка на субфрейм, характеризующий лексическое значение (рис. 3). Исходное значение температуры так же запоминается в других элементах фреймовой модели.

Рассмотрим процедуру выбора субфрейма на примере заполнения слотов фрейма описания температуры букс (рис. 2, подсистема 3). Значения лингвистических переменных определяются входными воздействиями с использованием функций принадлежности [5]. Реализация этой идеи потребовала прикрепления процедуры-демона к фрейму с именем «Температура букс». При обновлении значений температуры в слотах процедура-демон осу-

ществляет выбор значения лингвистической переменной «Температура буксового узла» с помощью функции определения максимального значения:

$$\max(F_1(t), F_2(t), F_3(t)), \quad (1)$$

где $F_{1,2,3}(t)$ – нечёткие переменные, отражающие температурный диапазон на множестве значений T_i для i -го узла (см. рис. 4). Выбранное по правилу (1) значение определяет «загрузку» в слот ссылки на субфрейм, характеризующий данную ситуацию (рис. 3).

Вторая типовая задача – это ранжирование (например, последовательность обработки слотов, построения цепочки сценариев работы системы и др.). Для решения этой задачи субфрейм оснащается значением меры-показателя приоритета, характеризующего «важность» этого параметра. Этот показатель-мера генерируется с помощью правил нечёткого вывода по алгоритму Мамдани [7] (рис. 4). Рассмотрим его работу более подробно.

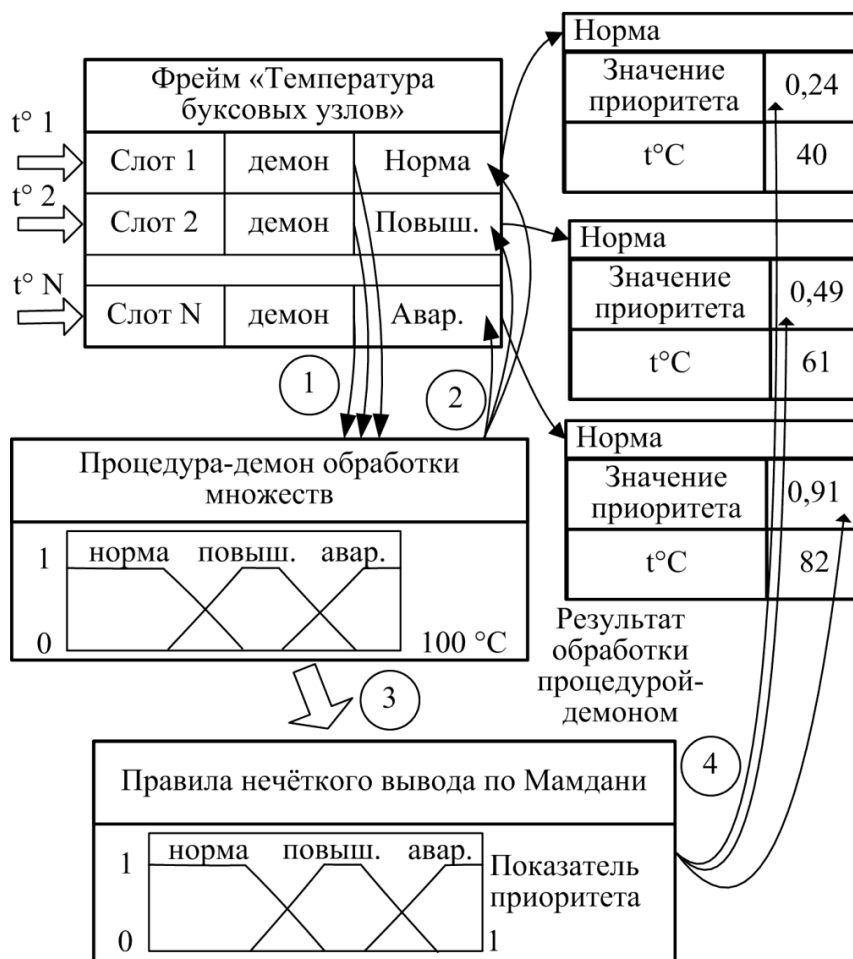


Рис. 3. Фрейм со слотами, имеющими демоны, основанные на аппарате нечёткой логики

Сначала вычисляется верхняя граница отсечения для правила $Z_j(m)$, значение функции $F_j(t)$ при заданном значении горизонтальной оси t на левом графике (в данном случае множества температуры). Таким образом, из правила дефаззификации $Z_j(m)$ получается фигура, относящаяся к данной нечёткой переменной с усечением по верхней границе (значению по оси $F_j(t)$ в данной точке оси t). После обработки всех правил, которых затронуло данное значение температуры, полученные фигуры объединяются и образуется суммарная фигура Z_s (заштрихована). Процесс дефаззификации происходит по формуле центра тяжести (2). По приближённой формуле (3) вычисляется центр массы Z_s и проецируется на горизонтальную ось t . Полученное число t является результатом нечёткого вывода.

$$m_o = \frac{\int_0^1 mZ_s(m)dm}{\int_0^1 Z_s(m)dm}, \tag{2}$$

$$m_o = \frac{\sum_k m_k Z_s(m) \Delta m_k}{\sum_k Z_s(m) \Delta m_k}. \tag{3}$$

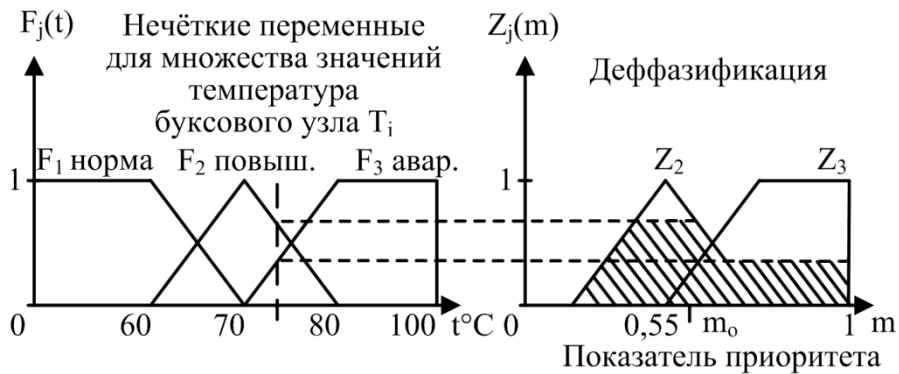


Рис. 4. Графическое представление нечётких переменных на множестве «Температура буксового узла» и правило нечёткого вывода Мамдани для определения показателя приоритета

Ранжирование субфреймов приводит к заданию иерархии на сценариях $S = \langle S_1, S_2, \dots, S_a \rangle$. Введение пороговых значений позволяет включать в список сценариев обработки результатов мониторинга только те элементы ранжируемого множества, которые имеют проблемно ориентированные (критические) значения в данный момент времени.

Применение модифицированной фреймовой модели позволяет генерировать ситуационное описание объекта мониторинга, связывающее все контролируемые параметры в единую картину. Каждой ситуации соответствует свой фрейм-состояние системы, который является корнем сети фреймов, характеризующих эту ситуацию. Пример такого описания – фрагмент фреймовой модели – представлен на рис. 5.

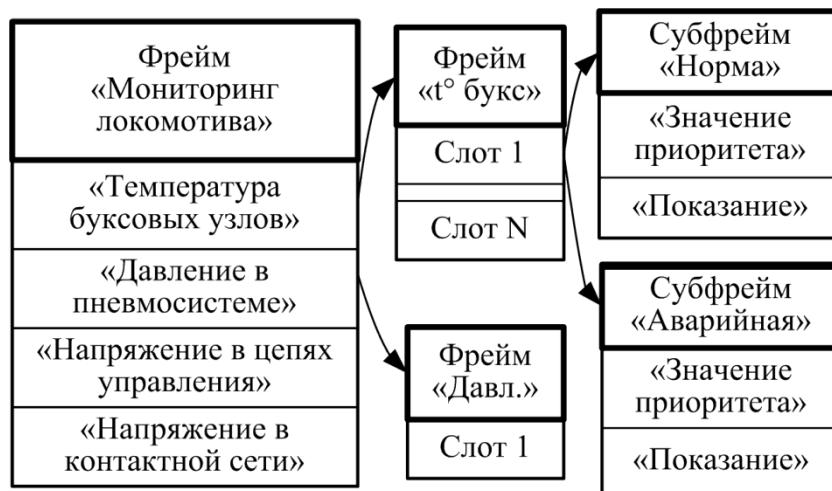


Рис. 5. Ситуационное описание объекта мониторинга при помощи модифицированной фреймовой модели

Результаты

1. Предложена модификация фреймового подхода, которая направлена на использование аппарата нечёткой логики для решения комплекса задач построения и поддержки систем мониторинга.

2. Создана теоретическая база для построения инструментального комплекса автоматизации генерации информационного и программного обеспечения автоматизированных систем мониторинга в рассматриваемой предметной области.

Библиографический список

1. **Басалин, П.Д.** Организация процесса проектирования в САПР с использованием фреймово-продукционной модели / П.Д. Басалин, П.В. Мисевич // Математическое моделирование и оптимальное управление: межвуз. тематич. сб. научн. тр. / под ред. Р.Г. Стронгина. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 1996. С. 164–171.
2. **Минский, М.** Фреймы для представления знаний / М. Минский. – М: Энергия, 1979. – 151 с.
3. **Семенов, В.В.** Принципы формирования и фрагменты базы знаний теории управления. Общее математическое обеспечение систем автоматизированного проектирования / В.В. Семенов. – М.: МАИ, 1981. – 158 с.
4. **Белов, Д.А.** Разработка инструментариев проектирования автоматизированных систем дистанционного мониторинга и управления: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Н.Новгород, 2010. – 131 с.
5. **Заде, Л.А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир 1976. – 167 с.
6. **Хранилов, В.П.** Нечеткая модель динамической системы интерактивного распределения ресурсов при проектировании и ее приложения // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. №2. С. 26–32.
7. **Леоненков, А.В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 736 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2015*

A.E. Ermilov, P.V. Misevich

APPLICATION OF FRAME MODEL AND FUZZY LOGIC IN THE BASIS OF CONSTRUCTION TOOLKIT OF AUTOMATED MONITORING SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: To examine the approaches composition of frame model and fuzzy logic as an information provision for automated monitoring systems.

Methodology: Procedures demons of frame model complemented by fuzzy logic for processing the input data of monitoring.

Findings: As result this approach assumes the formation of dynamic functioning scenarios of the automated monitoring system.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the monitoring systems sector.

Originality/value: This approach involves the formation of information provision with the model close to human thinking.

Key words: frame model, fuzzy logic, information provision, automated monitoring system.

УДК 681.3.513

Е. А. Никулин

СИНТЕЗ КУБИЧЕСКИХ СПЛАЙНОВ МЕТОДОМ ПЕРЕКРЫТИЯ ПАРАБОЛ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Тема работы: Разработка алгоритма построения кубических сплайнов методом перекрытия парабол.**Цель работы:** Развитие матричных алгоритмов синтеза полиномиальных линий и поверхностей.**Метод решения:** Линейная интерполяция параболических линий на интервале их перекрытия.**Оригинальность:** Разработан способ реализации краевых условий.**Выводы:** Получен алгоритм синтеза кубических перекрывающихся сплайнов с разными краевыми условиями.*Ключевые слова:* сплайн, сегмент, полином, краевые условия.

Статья посвящена разработке нового типа сплайна с конечным носителем, в основе которого лежит интерполяция перекрывающихся параболических кривых [1, 2], дополненная краевыми условиями, присущими кубическим сплайнам [1, 3]. В результате концевые сегменты составной линии становятся кубическими, тогда как все внутренние сегменты получаются кубическими благодаря линейной интерполяции линий второго порядка.

Пусть $\mathbf{P}_0\mathbf{P}_1\dots\mathbf{P}_n$ — полилиния в двух- или трехмерном пространстве, вершины которой являются узлами интерполяции, а $\mathbf{P}_{i-1}\mathbf{P}_i$, где $i \in [1, n]$ — отрезок, на котором строится i -й сегмент составной линии $\mathbf{p}_i(t)$, гладко сопряженный с соседними сегментами. Полиномиальная модель m -й степени имеет вид параметрической векторной функции

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{s}_0 + \mathbf{s}_1 t + \dots + \mathbf{s}_m t^m = \mathbf{S} \mathbf{T}_m(t),$$

где $\mathbf{S} = [\mathbf{s}_0 \ \mathbf{s}_1 \ \dots \ \mathbf{s}_m]$ — строчный вектор полиномиальных коэффициентов (ВПК), а $\mathbf{T}_m(t) = [1 \ t \ t^2 \ \dots \ t^m]^T$ — столбцовый вектор базисных функций. В дальнейшем нам понадобятся векторы его первой $\mathbf{T}'_m(t) = [0 \ 1 \ 2t \ \dots \ mt^{m-1}]^T$ и второй $\mathbf{T}''_m(t) = [0 \ 0 \ 2 \ \dots \ m(m-1)t^{m-2}]^T$ производных.

Поставим задачу синтеза модели i -го сегмента сплайна $\mathbf{p}_i(t) = \mathbf{S}_i \mathbf{T}_3(t)$, т. е. вычисления ее ВПК \mathbf{S}_i посредством линейной интерполяции параболических линий, перекрывающихся на i -м интервале и исследования путей реализации краевых условий в точках \mathbf{P}_0 и \mathbf{P}_n .

Сначала используем метод локальной нормализованной параметризации, в котором отсчет параметра $t \in [0, 1]$ на всех интервалах начинается с нуля и длины всех интервалов равны единице. Составим кубический полином i -го сегмента как линейную интерполяцию

$$\mathbf{p}_i(t) = (1-t)\mathbf{l}_i(t) + t\mathbf{r}_i(t) \quad \forall t \in [0, 1], \quad i = \overline{1, n}, \quad (1a)$$

левого и правого параболических сегментов

$$\mathbf{l}_i(t) = \mathbf{L}_i \mathbf{T}_2(t), \quad \mathbf{r}_i(t) = \mathbf{R}_i \mathbf{T}_2(t). \quad (1b)$$

На тех интервалах, где эти сегменты не зависят от краевых условий (рис. 1, а), их ВПК находятся решением уравнений трехузловой интерполяции:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_i &= [\mathbf{P}_{i-2} \ \mathbf{P}_{i-1} \ \mathbf{P}_i] [\mathbf{T}_2(-1) \ \mathbf{T}_2(0) \ \mathbf{T}_2(1)]^{-1} = [\mathbf{P}_{i-2} \ \mathbf{P}_{i-1} \ \mathbf{P}_i] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \\ &= \left[\mathbf{P}_{i-1} \ \frac{-\mathbf{P}_{i-2} + \mathbf{P}_i}{2} \ \frac{\mathbf{P}_{i-2} - 2\mathbf{P}_{i-1} + \mathbf{P}_i}{2} \right] \forall i = \overline{2, n}, \end{aligned} \tag{1в}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_i &= [\mathbf{P}_{i-1} \ \mathbf{P}_i \ \mathbf{P}_{i+1}] [\mathbf{T}_2(0) \ \mathbf{T}_2(1) \ \mathbf{T}_2(2)]^{-1} = [\mathbf{P}_{i-1} \ \mathbf{P}_i \ \mathbf{P}_{i+1}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 4 \end{bmatrix}^{-1} = \\ &= \left[\mathbf{P}_{i-1} \ \frac{-3\mathbf{P}_{i-1} + 4\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i+1}}{2} \ \frac{\mathbf{P}_{i-1} - 2\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_{i+1}}{2} \right] \forall i = \overline{1, n-1}. \end{aligned}$$

Тогда из (1а, б) следует узловая модель **внутреннего** сегмента

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_i(t) &= \mathbf{L}_i(1-t)\mathbf{T}_2(t) + \mathbf{R}_i t \mathbf{T}_2(t) = \\ &= \left[\mathbf{P}_{i-1} \ \frac{-\mathbf{P}_{i-2} + \mathbf{P}_i}{2} \ \frac{\mathbf{P}_{i-2} - 2\mathbf{P}_{i-1} + \mathbf{P}_i}{2} \right] \begin{bmatrix} 1-t \\ t-t^2 \\ t^2-t^3 \end{bmatrix} + \left[\mathbf{P}_{i-1} \ \frac{-3\mathbf{P}_{i-1} + 4\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i+1}}{2} \ \frac{\mathbf{P}_{i-1} - 2\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_{i+1}}{2} \right] \begin{bmatrix} t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix} (1г) \\ &= \mathbf{P}_{i-1} + \frac{-\mathbf{P}_{i-2} + \mathbf{P}_i}{2} t + \frac{2\mathbf{P}_{i-2} - 5\mathbf{P}_{i-1} + 4\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i+1}}{2} t^2 + \frac{-\mathbf{P}_{i-2} + 3\mathbf{P}_{i-1} - 3\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_{i+1}}{2} t^3 \quad \forall i = \overline{2, n-1}, \end{aligned}$$

удовлетворяющая условиям интерполяции $\mathbf{p}_i(0) = \mathbf{P}_{i-1}$, $\mathbf{p}_i(1) = \mathbf{P}_i$.

Точно такие же коэффициенты кубического полинома $\mathbf{p}_i(t) = \mathbf{S}_i \mathbf{T}_3(t)$ при степенях параметра t получим с помощью операций расширения ВПК парабол нулевыми элементами \mathbf{O} , повышающими степени полиномов со второй до третьей:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_i &= [\mathbf{L}_i \ \mathbf{O}] - [\mathbf{O} \ \mathbf{L}_i] + [\mathbf{O} \ \mathbf{R}_i] = \\ &= \left[\mathbf{P}_{i-1} \ \frac{-\mathbf{P}_{i-2} + \mathbf{P}_i}{2} \ \frac{\mathbf{P}_{i-2} - 2\mathbf{P}_{i-1} + \mathbf{P}_i}{2} \ \mathbf{O} \right] - \left[\mathbf{O} \ \mathbf{P}_{i-1} \ \frac{-\mathbf{P}_{i-2} + \mathbf{P}_i}{2} \ \frac{\mathbf{P}_{i-2} - 2\mathbf{P}_{i-1} + \mathbf{P}_i}{2} \right] + \\ &\quad + \left[\mathbf{O} \ \mathbf{P}_{i-1} \ \frac{-3\mathbf{P}_{i-1} + 4\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i+1}}{2} \ \frac{\mathbf{P}_{i-1} - 2\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_{i+1}}{2} \right] = \\ &= \left[\mathbf{P}_{i-1} \ \frac{-\mathbf{P}_{i-2} + \mathbf{P}_i}{2} \ \frac{2\mathbf{P}_{i-2} - 5\mathbf{P}_{i-1} + 4\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i+1}}{2} \ \frac{-\mathbf{P}_{i-2} + 3\mathbf{P}_{i-1} - 3\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_{i+1}}{2} \right]. \end{aligned} \tag{1д}$$

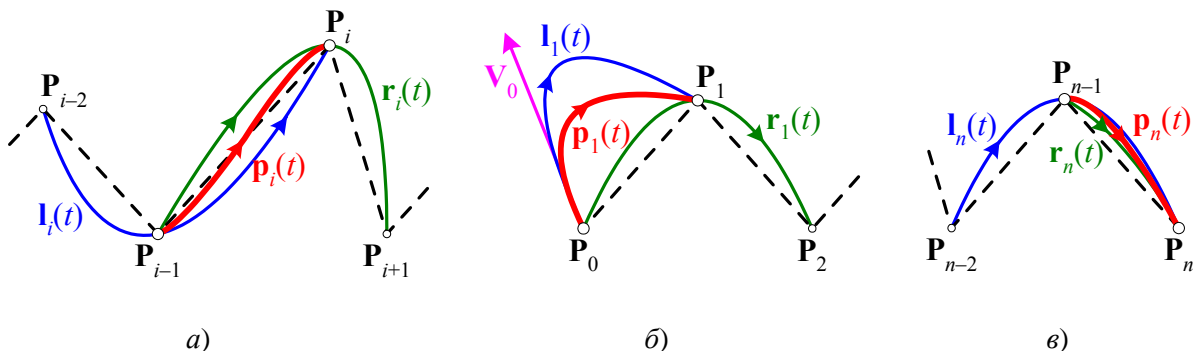


Рис. 1. Интерполяция параболических сегментов

В отличие от (1в, г) модели параболических $\mathbf{l}_1(t)$, $\mathbf{r}_n(t)$ и кубических $\mathbf{p}_1(t)$, $\mathbf{p}_n(t)$ сегментов зависят от краевых условий в точках \mathbf{P}_0 и \mathbf{P}_n . Например, для **первого** сегмента с начальным направлением \mathbf{V}_0 (рис. 1,б) ВПК левой и правой парабол имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_1 &= [\mathbf{V}_0 \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1] [\mathbf{T}'_2(0) \ \mathbf{T}_2(0) \ \mathbf{T}_2(1)]^{-1} = [\mathbf{V}_0 \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = [\mathbf{P}_0 \ \mathbf{V}_0 \ -\mathbf{V}_0 - \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_1], \\ \mathbf{R}_1 &= [\mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1 \ \mathbf{P}_2] [\mathbf{T}_2(0) \ \mathbf{T}_2(1) \ \mathbf{T}_2(2)]^{-1} = [\mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1 \ \mathbf{P}_2] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 4 \end{bmatrix}^{-1} = \\ &= \left[\mathbf{P}_{01} \ \frac{-3\mathbf{P}_0 + 4\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{2} \ \frac{\mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{2} \right]. \end{aligned} \quad (2a)$$

Тогда из (1а, б) следует узловая эрмитова модель первого сегмента, удовлетворяющая условиям $\mathbf{p}_1(0) = \mathbf{P}_0$, $\mathbf{p}_1(1) = \mathbf{P}_1$ и $\mathbf{p}'_1(0) = \mathbf{V}_0$:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1(t) &= \mathbf{L}_1(1-t)\mathbf{T}_2(t) + \mathbf{R}_1 t \mathbf{T}_2(t) = \\ &= [\mathbf{P}_0 \ \mathbf{V}_0 \ -\mathbf{V}_0 - \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_1] \begin{bmatrix} 1-t \\ t-t^2 \\ t^2-t^3 \end{bmatrix} + \left[\mathbf{P}_0 \ \frac{-3\mathbf{P}_0 + 4\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{2} \ \frac{\mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{2} \right] \begin{bmatrix} t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_0 t + \frac{-4\mathbf{P}_0 - 5\mathbf{P}_0 + 6\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{2} t^2 + \frac{2\mathbf{P}_0 + 3\mathbf{P}_0 - 4\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{2} t^3. \end{aligned} \quad (2б)$$

Что до краевого условия $\mathbf{p}''_1(0) = \mathbf{A}_0$, то оно, вопреки ожиданиям, не реализуется вычислением вектора \mathbf{L}_1 по образцу (2а) как

$$\mathbf{L}_1 = [\mathbf{A}_0 \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1] [\mathbf{T}''_2(0) \ \mathbf{T}_2(0) \ \mathbf{T}_2(1)]^{-1} = [\mathbf{A}_0 \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \left[\mathbf{P}_0 \ -\frac{\mathbf{A}_0}{2} - \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_1 \ \frac{\mathbf{A}_0}{2} \right].$$

Подставив его в (2б) вместе с вектором \mathbf{R}_1 из (2а), получим

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1(t) &= \mathbf{L}_1(1-t)\mathbf{T}_2(t) + \mathbf{R}_1 t \mathbf{T}_2(t) = \\ &= \left[\mathbf{P}_0 \ -\frac{\mathbf{A}_0}{2} - \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_1 \ \frac{\mathbf{P}_0}{2} \right] \begin{bmatrix} 1-t \\ t-t^2 \\ t^2-t^3 \end{bmatrix} + \left[\mathbf{P}_0 \ \frac{-3\mathbf{P}_0 + 4\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{2} \ \frac{\mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{2} \right] \begin{bmatrix} t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{P}_0 + \frac{-\mathbf{A}_0 - 2\mathbf{P}_0 + 2\mathbf{P}_1}{2} t + \frac{2\mathbf{A}_0 - \mathbf{P}_0 + 2\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{2} t^2 + \frac{-2\mathbf{A}_0 + \mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{2} t^3 \end{aligned}$$

и ускорение $\mathbf{p}''_1(0) = 2\mathbf{A}_0 - \mathbf{P}_0 + 2\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2$. Причина его несовпадения с \mathbf{A}_0 в том, что в отличие от (1а) вторая производная $\mathbf{p}''_i(t)$ не является линейной интерполяцией $(1-t)\mathbf{I}'_i(t) + t\mathbf{r}''_i(t)$, отсюда $\mathbf{p}''_i(0) \neq \mathbf{I}''_i(0)$! Для достижения успеха нужно создать векторы

$$\mathbf{A} = (\mathbf{A}_0 + \mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)/2,$$

$$\mathbf{L}_1 = [\mathbf{A} \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \left[\mathbf{P}_0 \ -\frac{\mathbf{A}}{2} - \mathbf{P}_0 + \mathbf{P}_1 \ \frac{\mathbf{A}}{2} \right] = \left[\mathbf{P}_0 \ \frac{-\mathbf{A}_0 - 5\mathbf{P}_0 + 6\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{4} \ \frac{\mathbf{A}_0 + \mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{4} \right]. \quad (2в)$$

Тогда вместе с вектором \mathbf{R}_1 из (2а), аналогично (2б), получим

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1(t) &= \left[\mathbf{P}_0 \ \frac{-\mathbf{A}_0 - 5\mathbf{P}_0 + 6\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{4} \ \frac{\mathbf{A}_0 + \mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{4} \right] \begin{bmatrix} 1-t \\ t-t^2 \\ t^2-t^3 \end{bmatrix} + \\ &+ \left[\mathbf{P}_0 \ \frac{-3\mathbf{P}_0 + 4\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{2} \ \frac{\mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{2} \right] \begin{bmatrix} t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{P}_0 + \frac{-\mathbf{A}_0 - 5\mathbf{P}_0 + 6\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_2}{4} t + \frac{\mathbf{A}_0}{2} t^2 + \frac{-\mathbf{A}_0 + \mathbf{P}_0 - 2\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2}{4} t^3. \end{aligned} \quad (2г)$$

Проверяем: $\mathbf{p}_1(0)=\mathbf{P}_0$, $\mathbf{p}_1(1)=\mathbf{P}_1$ и $\mathbf{p}_1''(0)=\mathbf{A}_0$ — все правильно! При желании создать в начале сплайна свободный конец задается нулевой вектор $\mathbf{A}_0=\mathbf{O}$.

Для **последнего** сегмента $\mathbf{p}_n(t)$ с конечным направлением \mathbf{V}_n ВПК левой и правой парабол имеют следующий вид:

$$\mathbf{L}_n = [\mathbf{P}_{n-2} \ \mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \left[\mathbf{P}_{n-1} \quad \frac{-\mathbf{P}_{n-2} + \mathbf{P}_n}{2} \quad \frac{\mathbf{P}_{n-2} - 2\mathbf{P}_{n-1} + \mathbf{P}_n}{2} \right],$$

$$\mathbf{R}_n = [\mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{V}_n] [\mathbf{T}_2(0) \ \mathbf{T}_2(1) \ \mathbf{T}_2'(1)]^{-1} = [\mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{V}_n] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}^{-1} =$$

$$= [\mathbf{P}_{n-1} \ -2\mathbf{P}_{n-1} + 2\mathbf{P}_n - \mathbf{V}_n \ \mathbf{P}_{n-1} - \mathbf{P}_n + \mathbf{V}_n].$$
(3а)

Тогда из (1а, б) следует узловая эрмитова модель конечного сегмента

$$\mathbf{p}_n(t) = \left[\mathbf{P}_{n-1} \quad \frac{-\mathbf{P}_{n-2} + \mathbf{P}_n}{2} \quad \frac{\mathbf{P}_{n-2} - 2\mathbf{P}_{n-1} + \mathbf{P}_n}{2} \right] \begin{bmatrix} 1-t \\ t-t^2 \\ t^2-t^3 \end{bmatrix} +$$

$$+ \left[\mathbf{P}_{n-1} \ -2\mathbf{P}_{n-1} + 2\mathbf{P}_n - \mathbf{V}_n \ \mathbf{P}_{n-1} - \mathbf{P}_n + \mathbf{V}_n \right] \begin{bmatrix} t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix} =$$

$$= \mathbf{P}_{n-1} + \frac{-\mathbf{P}_{n-2} + \mathbf{P}_n}{2} t + (\mathbf{P}_{n-2} - 3\mathbf{P}_{n-1} + 2\mathbf{P}_n - \mathbf{V}_n) t^2 + \frac{-\mathbf{P}_{n-2} + 4\mathbf{P}_{n-1} - 3\mathbf{P}_n + 2\mathbf{V}_n}{2} t^3.$$
(3б)

Сами убедитесь, что $\mathbf{p}_n(0)=\mathbf{P}_{n-1}$, $\mathbf{p}_n(1)=\mathbf{P}_n$ и $\mathbf{p}_n'(1)=\mathbf{V}_n$.

И, наконец, для реализации краевого условия $\mathbf{p}_n''(1)=\mathbf{A}_n$ создадим векторы

$$\mathbf{A} = (\mathbf{P}_{n-2} - 2\mathbf{P}_{n-1} + \mathbf{P}_n + \mathbf{A}_n) / 2,$$

$$\mathbf{R}_n = [\mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{A}_n] [\mathbf{T}_2(0) \ \mathbf{T}_2(1) \ \mathbf{T}_2'(1)]^{-1} = [\mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{A}] \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}^{-1} =$$

$$= \left[\mathbf{P}_{n-1} \quad -\mathbf{P}_{n-1} + \mathbf{P}_n - \frac{\mathbf{A}}{2} \quad \frac{\mathbf{A}}{2} \right] = \left[\mathbf{P}_{n-1} \quad \frac{-\mathbf{P}_{n-2} - 2\mathbf{P}_{n-1} + 3\mathbf{P}_n - \mathbf{A}_n}{4} \quad \frac{\mathbf{P}_{n-2} - 2\mathbf{P}_{n-1} + \mathbf{P}_n + \mathbf{A}_n}{4} \right].$$
(3в)

Тогда вместе с вектором \mathbf{L}_n из (3а) аналогично (3б) получим

$$\mathbf{p}_n(t) = \left[\mathbf{P}_{n-1} \quad \frac{-\mathbf{P}_{n-2} + \mathbf{P}_n}{2} \quad \frac{\mathbf{P}_{n-2} - 2\mathbf{P}_{n-1} + \mathbf{P}_n}{2} \right] \begin{bmatrix} 1-t \\ t-t^2 \\ t^2-t^3 \end{bmatrix} +$$

$$+ \left[\mathbf{P}_{n-1} \quad \frac{-\mathbf{P}_{n-2} - 2\mathbf{P}_{n-1} + 3\mathbf{P}_n - \mathbf{A}_n}{4} \quad \frac{\mathbf{P}_{n-2} - 2\mathbf{P}_{n-1} + \mathbf{P}_n + \mathbf{A}_n}{4} \right] \begin{bmatrix} t \\ t^2 \\ t^3 \end{bmatrix} =$$

$$= \mathbf{P}_{n-1} + \frac{-\mathbf{P}_{n-2} + \mathbf{P}_n}{2} t + \frac{3\mathbf{P}_{n-2} - 6\mathbf{P}_{n-1} + 3\mathbf{P}_n - \mathbf{A}_n}{4} t^2 + \frac{-\mathbf{P}_{n-2} + 2\mathbf{P}_{n-1} - \mathbf{P}_n + \mathbf{A}_n}{4} t^3.$$
(3г)

Проверка $\mathbf{p}_n(0)=\mathbf{P}_{n-1}$, $\mathbf{p}_n(1)=\mathbf{P}_n$ и $\mathbf{p}_n''(1)=\mathbf{A}_n$ подтверждает правильность полученной модели последнего сегмента. При желании создать сплайн со свободным правым концом задается нулевой вектор $\mathbf{A}_n=\mathbf{O}$ (рис. 1, в).

Полный нормализованный сплайн, фрагменты которого приведены на рис. 1, построен на рис. 2. Там же пунктирными линиями показано, что изменения узловой точки и краевых векторов распространяются на конечное число сегментов, а точки более дальних сегментов остаются неподвижными.

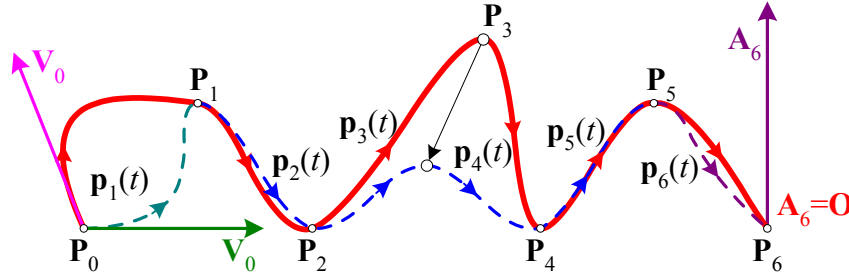


Рис. 2. Конечные свойства сплайна

Составим из узловых точек $\mathbf{P}_0 \div \mathbf{P}_n$ и краевых векторов \mathbf{V}_0 и \mathbf{A}_n вектор из $n+3$ -х возмущающих факторов $\mathbf{F} = [\mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1 \ \dots \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{V}_0 \ \mathbf{A}_n]$. На рис. 2 хорошо видно, что смещение какой-либо узловой точки \mathbf{P}_k с номером $k \in [0, n]$ влияет на форму не более чем двух примыкающих к ней как слева, так и справа сегментов, а изменения факторов $\mathbf{F}_{n+1} \equiv \mathbf{V}_0$ и $\mathbf{F}_{n+2} \equiv \mathbf{A}_n$ воздействуют только на крайние сегменты:

- согласно соотношению (2б), на **первом** ($i=1$) интервале $t \in [0, 1)$ активны возмущающие факторы $\mathbf{F}_0 \div \mathbf{F}_2$ и \mathbf{F}_{n+1} , откуда же получаем интервальные весовые функции (ВФ)

$$l_1^{(k)}(t) = \begin{cases} 1 - 2.5t^2 + 1.5t^3 & \text{при } k=0; \\ 3t^2 - 2t^3 & \text{при } k=1; \\ -0.5t^2 + 0.5t^3 & \text{при } k=2; \\ t - 2t^2 + t^3 & \text{при } k=n+1; \\ 0 & \text{при остальных } k; \end{cases} \quad (4a)$$

- распределив зависимость (1г) по узловым точкам, сформируем интервальные ВФ влияния k -х возмущающих факторов на точки **внутренних** i -х сегментов, используя нормализованные сквозной $t \in [i-1, i)$ и локальный $\tau = t - i + 1 \in [0, 1)$ параметры:

$$l_i^{(k)}(t) = \begin{cases} -0.5\tau + \tau^2 - 0.5\tau^3 & \text{при } k=i-2; \\ 1 - 2.5\tau^2 + 1.5\tau^3 & \text{при } k=i-1; \\ 0.5\tau + 2\tau^2 - 1.5\tau^3 & \text{при } k=i; \\ -0.5\tau^2 + 0.5\tau^3 & \text{при } k=i+1; \\ 0 & \text{при остальных } k; \end{cases} \quad (4б)$$

- наконец, на **последнем** ($i=n$) интервале $t \in [n-1, n]$ с локальным параметром $\tau = t - n + 1 \in [0, 1]$, судя по (3б), активны факторы $\mathbf{F}_{n-2} \div \mathbf{F}_n$ и \mathbf{F}_{n+2} с интервальными ВФ

$$l_n^{(k)}(t) = \begin{cases} -0.5\tau + \tau^2 - 0.5\tau^3 & \text{при } k=n-2; \\ 1 - 3\tau^2 + 2\tau^3 & \text{при } k=n-1; \\ 0.5\tau + 2\tau^2 - 1.5\tau^3 & \text{при } k=n; \\ -\tau^2 + \tau^3 & \text{при } k=n+2; \\ 0 & \text{при остальных } k. \end{cases} \quad (4в)$$

С помощью ВФ (4) представление i -го сегмента выглядит взвешенной смесью

$$\mathbf{p}_i(t) = \sum_k l_i^{(k)}(t) \mathbf{F}_k \quad \forall t \in [i-1, i], \quad i = \overline{1, n}. \quad (5a)$$

Интервальные ВФ с одинаковым значением k сшиваются в факторные ВФ

$$l_k(t) = \sum_{i=1}^n l_i^{(k)}(t) \quad \forall k = \overline{0, n+2}, \quad (5б)$$

характеризующие влияние возмущающих факторов \mathbf{F}_k на весь сплайн. На рис. 3 построены

восемь графиков факторных ВФ (нулевых интервальных ВФ показаний нет), соответствующих перекрывающемуся сплайну на рис. 2. С помощью вектора $\mathbf{L}(t)=[l_0(t) \ l_1(t) \ \dots \ l_{n+2}(t)]^T$ полный сплайн представляется в виде

$$\mathbf{p}(t)=\sum_{k=0}^{n+2} l_k(t)\mathbf{F}_k=\mathbf{FL}(t) \quad \forall t \in [0, n]. \tag{5B}$$

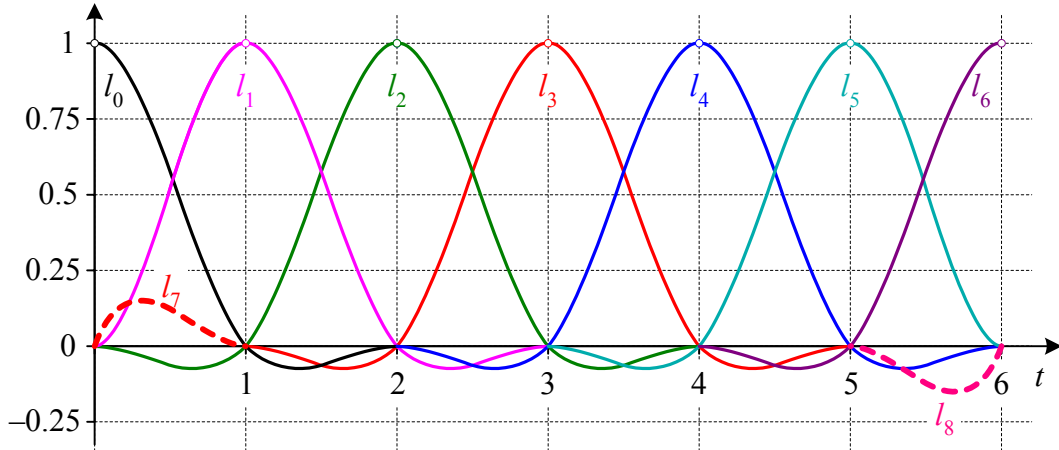


Рис. 3. Факторные весовые функции

Обобщим тему построением сегментов перекрывающегося сплайна $\mathbf{p}_i(t)$ на интервалах $t \in [a_i, b_i]$ с $b_i = a_i + d_i$ и произвольно выбранной параметризацией — локальной ($a_i = 0$) либо сквозной ($b_i = a_{i+1}$), нормализованной ($d_i = 1$) либо хордовой ($d_i = |\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i-1}|$), где d_i — длина i -го параметрического интервала.

Обобщением модели (1а) является линейная интерполяция

$$\mathbf{p}_i(t) = \mathbf{l}_i(t) \frac{b_i - t}{d_i} + \mathbf{r}_i(t) \frac{t - a_i}{d_i} \quad \forall t \in [a_i, b_i], \quad i = \overline{1, n} \tag{6a}$$

левой $\mathbf{l}_i(t) = \mathbf{L}_i \mathbf{T}_2(t)$ и правой $\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{R}_i \mathbf{T}_2(t)$ парабол, у которых векторы коэффициентов независимы от краевых условий (см. рис. 1) и находятся обобщением (1в) как

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_i &= [\mathbf{P}_{i-2} \ \mathbf{P}_{i-1} \ \mathbf{P}_i][\mathbf{T}_2(a_i - d_{i-1}) \ \mathbf{T}_2(a_i) \ \mathbf{T}_2(b_i)]^{-1} \quad \forall i = \overline{2, n}, \\ \mathbf{R}_i &= [\mathbf{P}_{i-1} \ \mathbf{P}_i \ \mathbf{P}_{i+1}][\mathbf{T}_2(a_i) \ \mathbf{T}_2(b_i) \ \mathbf{T}_2(b_i + d_{i+1})]^{-1} \quad \forall i = \overline{1, n-1}. \end{aligned} \tag{6б}$$

Глядя на (6а), запишем обобщающие (1д) ВПК кубических сегментов $\mathbf{p}_i(t) = \mathbf{S}_i \mathbf{T}_3(t)$:

$$\mathbf{S}_i = \frac{b_i [\mathbf{L}_i \ \mathbf{O}] - [\mathbf{O} \ \mathbf{L}_i] + [\mathbf{O} \ \mathbf{R}_i] - a_i [\mathbf{R}_i \ \mathbf{O}]}{d_i} \quad \forall i = \overline{1, n}. \tag{6в}$$

Модели параболических $\mathbf{l}_1(t)$, $\mathbf{r}_n(t)$ и кубических $\mathbf{p}_1(t)$, $\mathbf{p}_n(t)$ сегментов зависят от краевых условий в точках \mathbf{P}_0 и \mathbf{P}_n . Для *первого* эрмитова сегмента с заданным начальным направлением \mathbf{V}_0 (см. рис. 1,б) ВПК левой параболы находится обобщением (2а):

$$\mathbf{L}_1 = [\mathbf{V}_0 \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1][\mathbf{T}'_2(a_1) \ \mathbf{T}_2(a_1) \ \mathbf{T}_2(b_1)]^{-1}. \tag{7a}$$

Что касается краевого условия $\mathbf{p}'_1(a_1) = \mathbf{A}_0$ с заданным ускорением \mathbf{A}_0 , то оно реализуется расчетом вектора

$$\mathbf{L}_1 = [\mathbf{A} \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1][\mathbf{T}''_2(a_1) \ \mathbf{T}_2(a_1) \ \mathbf{T}_2(b_1)]^{-1} \tag{7б}$$

с таким вектором \mathbf{A} , который создает в начале сплайна ускорение $\mathbf{F}(\mathbf{A})=\mathbf{Z}+k\mathbf{A}$, равное \mathbf{A}_0 . Подходящие вектор \mathbf{Z} и скалярный коэффициент k этой линейной функции находим по двум выборкам:

- задаем нулевой вектор $\mathbf{A}=\mathbf{O}$ и по (7б) находим вектор \mathbf{L}_1 , а по (6в) вектор $\mathbf{S}_1\equiv[\mathbf{s}_0 \ \mathbf{s}_1 \ \mathbf{s}_2 \ \mathbf{s}_3]$ коэффициентов кубического сегмента $\mathbf{s}_0+\mathbf{s}_1t+\mathbf{s}_2t^2+\mathbf{s}_3t^3$ и его начальное ускорение $\mathbf{F}(\mathbf{O})=2\mathbf{s}_2+6\mathbf{s}_3a_1$, равное \mathbf{Z} ;
- задаем единичный вектор $\mathbf{A}=\mathbf{x}^0$, (\mathbf{x}^0 — единичный орт оси x) и по тем же формулам находим новые векторы \mathbf{L}_1 , \mathbf{S}_1 и $\mathbf{F}(\mathbf{x}^0)=2\mathbf{s}_2+6\mathbf{s}_3a_1=\mathbf{Z}+k\mathbf{x}^0$, откуда

$$k=(\mathbf{F}(\mathbf{x}^0)-\mathbf{Z})_x=F(\mathbf{x}^0)_x-\mathbf{Z}_x.$$

Теперь из условия $\mathbf{Z}+k\mathbf{A}=\mathbf{A}_0$ получаем искомое значение

$$\mathbf{A}=\frac{\mathbf{A}_0-\mathbf{Z}}{k}=\frac{\mathbf{A}_0-\mathbf{F}(\mathbf{O})}{\mathbf{F}(\mathbf{x}^0)_x-\mathbf{F}(\mathbf{O})_x}. \quad (7в)$$

Для создания у сплайна свободного левого конца берется вектор $\mathbf{A}_0=\mathbf{O}$.

У *последнего* эрмитова сегмента с заданным конечным направлением \mathbf{V}_n вектор коэффициентов правой параболы находится как

$$\mathbf{R}_n=[\mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{V}_n][\mathbf{T}_2(a_n) \ \mathbf{T}_2(b_n) \ \mathbf{T}'_2(b_n)]^{-1}. \quad (8а)$$

Краевое условие $\mathbf{p}''(b_n)=\mathbf{A}_n$ с заданным ускорением \mathbf{A}_n реализуется расчетом аналогичного (3в) вектора

$$\mathbf{R}_n=[\mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{A}_n][\mathbf{T}_2(a_n) \ \mathbf{T}_2(b_n) \ \mathbf{T}''_2(b_n)]^{-1} \quad (8б)$$

с найденным аналогично (7в) вектором \mathbf{A} , дающим конечное ускорение \mathbf{A}_n :

$$\mathbf{A}=\frac{\mathbf{A}_n-\mathbf{F}(\mathbf{O})}{\mathbf{F}(\mathbf{x}^0)_x-\mathbf{F}(\mathbf{O})_x}. \quad (8в)$$

Здесь значение $\mathbf{F}(\mathbf{A})$ от произвольного вектора \mathbf{A} находится расчетом по (8б) и (6в) векторов \mathbf{R}_n и $\mathbf{S}_n\equiv[\mathbf{s}_0 \ \mathbf{s}_1 \ \mathbf{s}_2 \ \mathbf{s}_3]$, после чего $\mathbf{F}(\mathbf{A})=2\mathbf{s}_2+6\mathbf{s}_3b_n$. Чтобы получить сплайн со свободным правым концом (см. рис. 1,в), нужно задать нулевой вектор $\mathbf{A}_n=\mathbf{O}$.

Обсудим вычислительную эффективность *интерактивного построения сегментов сплайна* при вариации узловых точек и краевых условий:

- использование сложных, но зато прямых формул (1г), (2б, г) и (3б, г) оказалось возможным только после их достаточно трудоемкого вывода и лишь в нормализованном локальном варианте параметризации, что ограничивает их универсальность;
- применение несложных интерполяционных формул (1а), (6а) либо параметрического разложения $\mathbf{p}_i(t)=\mathbf{S}_i\mathbf{T}_3(t)$ требует пересчета векторов полиномиальных коэффициентов \mathbf{L}_i , \mathbf{R}_i и \mathbf{S}_i при каждом изменении любого возмущающего фактора. Для ускорения отрисовки сплайна можно ценой небольшого усложнения программы пересчитывать не все ВПК, а, благодаря конечности сплайна, лишь зависимые от изменяемого фактора;
- наиболее сложными в выводе (и опять лишь в рамках нормализованной локальной параметризации) являются поэлементное (5а) и общее (5б, в) узловое разложение, требующие тщательного программирования интервальных весовых функций (4).

С учетом сказанного разработаем метод расчета числовых матриц \mathbf{H}_i , с помощью которых интерактивный вывод сегментов по формуле бинарного разложения

$$\mathbf{p}_i(t) = \mathbf{U}_i \mathbf{H}_i \mathbf{T}_3(t) \quad \forall i = \overline{1, n}$$

происходит максимально быстро. К тому же при использовании нормализованной параметризации с равными значениями $d_i = 1 \quad \forall i = \overline{1, n}$ все эти матрицы становятся независимыми от возмущающих факторов.

Введем операции двустороннего расширения матрицы $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ нулевыми строками и столбцами согласно направлениям надсимвольных стрелок:

$$\mathbf{H} \stackrel{\Downarrow \Rightarrow}{=} \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{O}_{2 \times 1} \\ \mathbf{O}_{1 \times 2} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} \stackrel{\Leftarrow \Downarrow}{=} \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{2 \times 1} & \mathbf{H} \\ 0 & \mathbf{O}_{1 \times 2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} \stackrel{\Uparrow \Rightarrow}{=} \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{1 \times 2} & 0 \\ \mathbf{H} & \mathbf{O}_{2 \times 1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} \stackrel{\Leftarrow \Uparrow}{=} \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{O}_{1 \times 2} \\ \mathbf{O}_{2 \times 1} & \mathbf{H} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Сформируем из возмущающих факторов (узловых точек $\mathbf{P}_0 \div \mathbf{P}_n$ и векторов конечных производных, например, \mathbf{V}_0 и \mathbf{A}_n) такой вектор

$$\mathbf{F} = \left[\underbrace{\mathbf{V}_0 \quad \mathbf{P}_0 \quad \mathbf{P}_1 \quad \mathbf{P}_2 \quad \mathbf{P}_3}_{\mathbf{U}_2} \quad \dots \quad \underbrace{\mathbf{P}_{n-2} \quad \mathbf{P}_{n-1} \quad \mathbf{P}_n \quad \mathbf{A}_n}_{\mathbf{U}_n} \right],$$

чтобы по нему можно было перемещать слева направо четырехэлементный шаблон факторов

i -го интервала $\mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{Li} \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ \mathbf{U}_{Ri} \end{bmatrix}$, содержащий перекрывающиеся трехэлементные узловые векторы \mathbf{U}_{Li} и \mathbf{U}_{Ri} левой и правой парабол в (6а).

Записав ВПК этих парабол как $\mathbf{L}_i = \mathbf{U}_{Li} \mathbf{H}_{Li}$ и $\mathbf{R}_i = \mathbf{U}_{Ri} \mathbf{H}_{Ri}$ с элементами

$$\mathbf{U}_{Li} = [\mathbf{P}_{i-2} \quad \mathbf{P}_{i-1} \quad \mathbf{P}_i], \quad \mathbf{H}_{Li} = [\mathbf{T}_2(a_i - d_{i-1}) \quad \mathbf{T}_2(a_i) \quad \mathbf{T}_2(b_i)]^{-1} \quad \forall i = \overline{2, n},$$

$$\mathbf{U}_{Ri} = [\mathbf{P}_{i-1} \quad \mathbf{P}_i \quad \mathbf{P}_{i+1}], \quad \mathbf{H}_{Ri} = [\mathbf{T}_2(a_i) \quad \mathbf{T}_2(b_i) \quad \mathbf{T}_2(b_i + d_{i+1})]^{-1} \quad \forall i = \overline{1, n-1},$$

получим бинарное разложение полинома i -го сегмента

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_i(t) &= \mathbf{U}_{Li} \mathbf{H}_{Li} \frac{b_i - t}{d_i} \mathbf{T}_2(t) + \mathbf{U}_{Ri} \mathbf{H}_{Ri} \frac{t - a_i}{d_i} \mathbf{T}_2(t) = \\ &= \frac{1}{d_i} \mathbf{U}_i \left(\begin{bmatrix} b_i \mathbf{H}_{Li} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{H}_{Li} \\ 0 & \mathbf{O} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{H}_{Ri} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{O} & 0 \\ a_i \mathbf{H}_{Ri} & \mathbf{O} \end{bmatrix} \right) \mathbf{T}_3(t) \end{aligned}$$

со сформированной с помощью операций (9) матрицей

$$\mathbf{H}_i = d_i^{-1} \left(\begin{matrix} \Downarrow \Rightarrow & \Leftarrow \Downarrow & \Leftarrow \Uparrow \\ \mathbf{b}_i \mathbf{H}_{Li} - \mathbf{H}_{Li} + \mathbf{H}_{Ri} - a_i \mathbf{H}_{Ri} & & \end{matrix} \right) \quad \forall i = \overline{1, n} \quad (10)$$

В рамках локальной ($a_i = 0$) нормализованной ($d_{i-1} = d_i = d_{i+1} = b_i = 1$) параметризации с присутствующими в (1в) матрицами

$$\mathbf{H}_{Li} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0.5 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{Ri} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 4 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1.5 & 0.5 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

по (10) получим матрицу

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_i &= \begin{matrix} \Downarrow \Rightarrow & \Leftarrow \Downarrow & \Leftarrow \Uparrow \\ \mathbf{H}_{Li} - \mathbf{H}_{Li} + \mathbf{H}_{Ri} = \end{matrix} \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 1 & -0.5 \\ 1 & 0 & -2.5 & 1.5 \\ 0 & 0.5 & 2 & -1.5 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Элементы моделей крайних сегментов, зависящих от краевых условий, имеют особый вид. Так, для *первого* сегмента с начальным направлением \mathbf{V}_0 из (7а) следует

$$\mathbf{U}_{L1} = [\mathbf{V}_0 \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1], \quad \mathbf{H}_{L1} = [\mathbf{T}'_2(a_1) \ \mathbf{T}_2(a_1) \ \mathbf{T}_2(b_1)]^{-1}.$$

В случае локальной ($a_1=0$) нормализованной ($d_1=b_1=1$) параметризации с матрицами из (2а)

$$\mathbf{H}_{L1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{R1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 4 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1.5 & 0.5 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

по (10) получим матрицу

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_1 &= \mathbf{H}_{L1} - \mathbf{H}_{L1} + \mathbf{H}_{R1} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 0 & -2.5 & 1.5 \\ 0 & 0 & 3 & -2 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Если же в начале сплайна задано ускорение \mathbf{A}_0 , то, вычислив по (7в) вектор \mathbf{A} , формируем элементы бинарного разложения левой параболы

$$\mathbf{U}_{L1} = [\mathbf{A} \ \mathbf{P}_0 \ \mathbf{P}_1], \quad \mathbf{H}_{L1} = [\mathbf{T}''_2(a_1) \ \mathbf{T}_2(a_1) \ \mathbf{T}_2(b_1)]^{-1}.$$

Для *последнего* сегмента с конечным направлением \mathbf{V}_n из (8б) следует

$$\mathbf{U}_{Rn} = [\mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{V}_n], \quad \mathbf{H}_{Rn} = [\mathbf{T}_2(a_n) \ \mathbf{T}_2(b_n) \ \mathbf{T}'_2(b_n)]^{-1}.$$

Если же в конце сплайна задано ускорение \mathbf{A}_n , то, вычислив по (8в) вектор \mathbf{A} , формируем элементы бинарного разложения правой параболы

$$\mathbf{U}_{Rn} = [\mathbf{P}_{n-1} \ \mathbf{P}_n \ \mathbf{A}], \quad \mathbf{H}_{Rn} = [\mathbf{T}_2(a_n) \ \mathbf{T}_2(b_n) \ \mathbf{T}''_2(b_n)]^{-1}.$$

В случае локальной ($a_n=0$) нормализованной ($d_n=b_n=1$) параметризации с присутствующими в (3а, в) матрицами

$$\mathbf{H}_{Ln} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0.5 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{Rn} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

по (10) получим матрицу

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_n &= \mathbf{H}_{Ln} - \mathbf{H}_{Ln} + \mathbf{H}_{Rn} = \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 1 & -0.5 \\ 1 & 0 & -2.5 & 1.5 \\ 0 & 0 & 3 & -2 \\ 0 & 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Работу алгоритма синтеза перекрывающегося сплайна иллюстрирует рис. 4:

- плоский сплайн 1 со свободными концами построен методом хордовой параметризации на той же неравномерной сетке, что и обычный сплайн 2, но демонстрирует более плотное прилегание к узловой сети;
- у трехмерного нормализованного сплайна 3 векторы краевых направлений $\mathbf{V}_0=10(\mathbf{P}_1-\mathbf{P}_0)$ и $\mathbf{V}_7=\mathbf{P}_7-\mathbf{P}_6$ заданы такими же, как у обычного эрмитова сплайна 4, но отклонения от узловой сети также уменьшились;
- последний график 5 показывает богатые возможности свободного творчества, предоставляемые разработанным сплайном с конечным носителем.

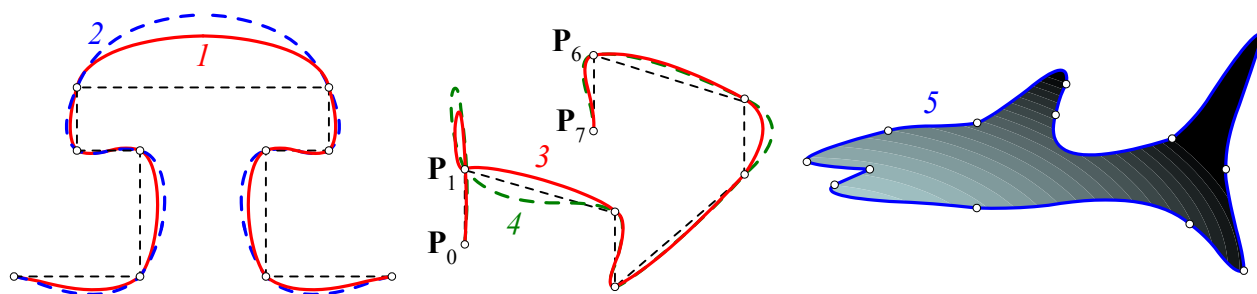


Рис. 4. Примеры реализации алгоритма

Таким образом, сплайны с перекрытием параболических сегментов показывают лучшее качество интерполирования в сравнении с типовыми кубическими сплайнами при меньшей вычислительной сложности, характеризуемой размерностями обрабатываемых матриц — 3×3 вместо $4n \times 4n$ в [3, (8)], даже 4×4 в итеративном алгоритме [3, (9)].

Главным недостатком перекрывающегося сплайна является пониженная, но визуально незаметная, степень гладкости сопряжения его сегментов — первая вместо второй в [3, (6в)]. Это означает скачки ускорения в точках сшивки сегментов. С другой стороны, разрывность кривизны сплайновой линии можно обратить на пользу для создания в стыках сегментов точек перегиба и расширения возможностей конструирования сложных линий.

Библиографический список

1. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики / Д. Роджерс, Дж. Адамс. — М.: Мир, 2001. — 604 с.
2. Никулин, Е.А. Построение гладких составных линий с перекрытием сегментов // Труды НГТУ. 2006. Т. 58. Вып. 11. С. 5–12.
3. Никулин, Е.А. Прямой параметрический синтез сплайновых линий // Труды НГТУ. 2007. Т. 65. Вып. 14. С. 123–130.

Дата поступления
в редакцию 05.02.15

Е.А. Nikulin

SYNTHESIS OF CUBIC SPLINES BY OVERLAPPING PARABOLAS METHOD

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Subject: Design of an algorithm for constructing cubic splines by method of overlapping parabolas.

Purpose: Development of matrix synthesis algorithms of polynomial curves and surfaces.

Methodology: Linear interpolation parabolic lines on the range of their overlap.

Originality: A method of implementing the boundary conditions is developed.

Findings: The algorithm of the synthesis of cubic splines overlapping with different boundary conditions is obtained.

Key words: spline, segment, polynome, boundary conditions.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.914.3

Г.В. Маслов

К ВОПРОСУ ПРЕДПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА НЕТРАДИЦИОННОЙ КОМПОНОВКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты предпроектного моделирования фрезерного станка нетрадиционной компоновки.

Ключевые слова: фрезерный станок, несущая система станка, конструктивный вариант, предпроектное моделирование, критерии оценки качества, статика.

Автоматизация и скорость проектирования машин (в том числе и металлорежущих станков) за последние 10 - 15 лет сильно возросли в связи с появлением и внедрением в конструкторские подразделения заводов современных пакетов трёхмерного геометрического моделирования, обеспечивающих высокую производительность проектных работ.

Автоматизированное проектирование всегда является многовариантным, поэтому при его использовании возникает острая потребность в получении и анализе количественных показателей качества различных вариантов конструкции для определения их иерархии и выбора наиболее рационального варианта.

Получение численных значений критериев оценки конструктивных вариантов металлорежущих станков – сложная, трудоёмкая и на современном этапе до конца не решённая задача. Её решение возможно только на основе использования эффективных методов и автоматизированных средств, обеспечивающих быстрое получение ответов на вопросы конструкторов: «Что и почему лучше или хуже?» и «В каком направлении должно идти развитие конструкции?» Ответы на подобного рода вопросы, а также и на многочисленные другие вопросы, возникающие при проектировании, можно найти лишь при использовании и внедрении в процесс создания проекта машины математического моделирования, охватывающего все этапы проектирования.

Основные требования, которым должно удовлетворять такого рода математическое моделирование, заключаются в следующем. Во-первых, оно также, как и процесс проектирования, должно быть автоматизированным. Во-вторых, по времени оно всегда должно опережать проектирование и ни в коем случае не отставать от него.

Опыт показывает, что результаты моделирования конкретного металлорежущего станка, как правило, никого из разработчиков не интересуют, если процесс проектирования или отдельные его этапы завершены и началась технологическая подготовка производства. В связи с этим особая роль принадлежит предпроектному моделированию, поскольку от его результатов зависит выбор концепции будущей машины.

Выбор идеализации и построение расчётных схем моделируемой конструкции металлорежущего станка является одним из наиболее важных и ответственных этапов при разработке его математических моделей. При неправильно выбранной идеализации и не корректно построенной расчётной схеме невозможно достичь совпадения статических и дина-

мических свойств реального станка и его идеализированной расчётной схемы не только в количественном, но и в качественном отношении. Естественно, в такой ситуации нельзя в дальнейшем ставить и вопрос о коррекции и отработке параметров математических моделей по экспериментальным данным.

Одна из основных особенностей предпроектного моделирования заключается в том, что оно всегда проводится в условиях максимальной неполноты и наибольшей неопределённости информации о параметрах создаваемой машины. Поэтому в такой ситуации для построения расчётной схемы машины целесообразно использование наиболее грубых уровней абстракции и соответствующих им методов линеаризации её нелинейных свойств.

Приведем результаты предпроектного моделирования универсального фрезерного станка с нетрадиционной компоновкой его несущей системы (рис. 1). (Автор идеи создания такого станка - конструктор Шаганов В.К.) Поскольку при предпроектном моделировании конструкция станка полностью была ещё не проработана, то моделирование проводилось с использованием результатов её грубой неполной эскизной проработки.

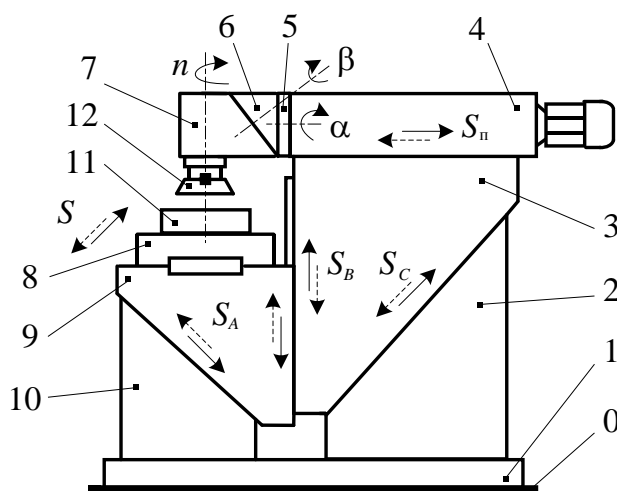


Рис. 1. Общий вид универсального фрезерного станка нетрадиционной компоновки:

0 – пол цеха (или фундамент); 1 – основание станка; 2 – тумба задняя; 3 – стойка;
4 – ползун; 5 – плита; 6 – корпус; 7 – головка поворотная; 8 – стол,
9 – тумба подвижная; 10 – тумба передняя; 11 – обрабатываемая деталь; 12 – фреза

Конструктивно несущая система моделируемого станка состоит из десяти корпусных деталей и узлов. С основанием 1 станка посредством фланцевых соединений связаны две неподвижные тумбы: задняя 2 и передняя -10. Каждая из этих тумб имеет наклонные прямоугольные направляющие. По наклонным направляющим задней тумбы 2 перемещается подвижная стойка 3, а по направляющим неподвижной передней тумбы 10 – подвижная тумба 9.

Стойка 3 и подвижная тумба 9 сопряжены посредством направляющих, обеспечивающих их относительные перемещения в вертикальном направлении. При этом указанные движения стойки 3 и тумбы 9 всегда происходят в противоположных направлениях. В результате, если в относительном движении стойка 3 двигается вверх, то тумба 9 – вниз, и наоборот.

В верхних частях тумбы 9 и стойки 3 имеются горизонтальные прямоугольные направляющие. По горизонтальным направляющим тумбы 9 двигается стол 8 с закреплённой на нём обрабатываемой деталью 11, а по направляющим стойки 3 – ползун 4. Последний через плиту 5 и корпус 6 связан с поворотной головкой 7, несущей в себе режущий инструмент – фрезу 12, вращающуюся во время обработки с частотой n , об/мин.

Поворотная головка имеет угловые установочные перемещения, определяемые углами поворотов α и β относительно горизонтальной и наклонной осей соответственно. Скорости

сти рабочих подач S , S_{π} и S_B , а также линейные установочные перемещения, определяются движениями стола 11 и ползуна 4 в горизонтальных взаимно ортогональных направлениях и вертикальным движением тумбы 9 относительно стойки 3.

Предпроектное математическое моделирование фрезерного станка нетрадиционной компоновки проводилось, главным образом, с двумя целями. Первая из них заключалась в определении необходимого числа и мест расположения ходовых винтов, обеспечивающих движения рабочих органов станка при рабочих и установочных перемещениях. Вторая - в получении ориентировочных численных значений абсолютных и относительных перемещений обрабатываемой детали и режущего инструмента в зоне обработки при тестовом статическом нагружении.

Начальным этапом при математическом моделировании любого объекта всегда является построение его расчетной схемы. При построении расчётной схемы данного станка учитывались общие закономерности статического поведения станочных конструкций. Они заключаются в следующем.

Корпусные детали несущих систем подавляющего большинства металлорежущих станков, как правило, представляют собой полые чугунные отливки. Они обладают достаточно высокой статической жёсткостью в кручении и изгибе. Это достигается, с одной стороны рациональным выбором их размеров, с другой – наличием внутренних ребер жесткости. Благодаря этому в статике доля приведённых в зону резания упругих деформаций корпусных деталей для широкого круга металлорежущих станков не превышает (10–15) % от общего уровня суммарных деформаций в зоне резания, определяющих относительные перемещения используемого режущего инструмента и обрабатываемой детали. Основная же доля суммарных деформаций (85 – 90%) возникает вследствие контактных деформаций в подвижных (в направляющих скольжения и качения) и неподвижных затянутых соединениях (типа фланцевых), связывающих эти детали [1, 2].

С учётом сказанного (а также ввиду отсутствия в данном станке направляющих качения) в качестве его расчётной схемы первого приближения была принята система абсолютно твёрдых тел (1–11), связанных распределёнными нелинейно деформируемыми контактными соединениями с плоскими стыками (рис. 2). На рис. 2 они обозначены скобками.

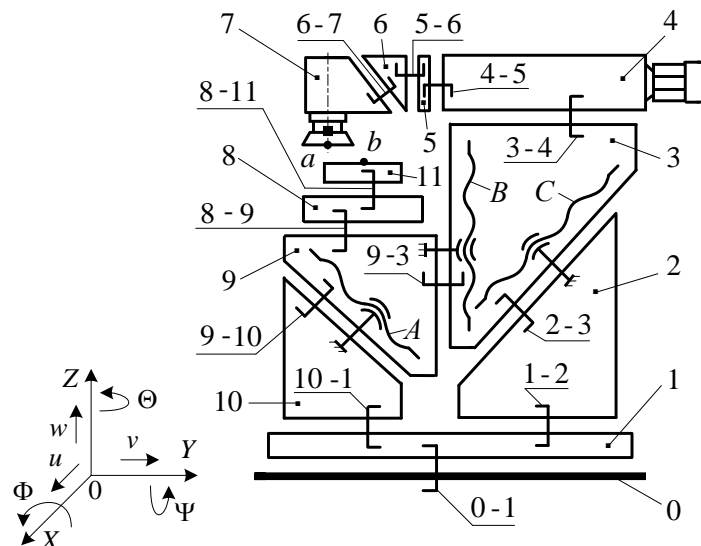


Рис. 2. Расчётная схема станка:

1, 2, ...10 – узлы и корпусные детали несущей системы станка; 11 – обрабатываемая деталь; 0 - 1 – соединение «основание станка - пол цеха (или фундамент)»; 1 - 2 – соединение «основание – задняя тумба»; 2 - 3 – «задняя тумба - стойка»; 3 - 4 – «стойка - ползун»; 4 - 5 – «ползун - плита»; 5 - 6 – «плита - корпус»; 6 - 7 – «корпус – поворотная головка»; 8 - 11 – «стол – обрабатываемая деталь»; 8 - 9 – «стол - тумба подвижная»; 9 - 10 – «тумба подвижная – тумба передняя»; 10 - 1 – «тумба передняя - основание»; A, B, C – ходовые винты; XYZ – используемая при расчётах инерциальная прямоугольная правая система координат; u, v, w – линейные перемещения вдоль координатных осей

X, Y, Z соответственно; Φ, Ψ, Θ – углы поворотов относительно тех же осей

В нормальных и тангенциальных направлениях (по отношению к плоскостям контактных соединений корпусных деталей) эти соединения были наделены свойствами, описываемыми известными эмпирическими нелинейными законами контактного взаимодействия твердых тел с плоскими шероховатыми поверхностями контактов [1–3].

Далее при выбранной расчётной нагрузке в соответствии с методикой, описанной в [4], была выполнена дискретизация нелинейных распределённых контактов расчётной схемы первого приближения и построена окончательная расчётная схема станка в виде линейной системы с сосредоточенными параметрами. Её вид будет совпадать с приведённой расчётной схемой, если считать, что каждой скобе на рис. 2 будет соответствовать уже не распределённый контакт, а три группы сосредоточенных пружин растяжения – сжатия. При этом одна группа содержит пружины, оси которых ортогональны контактной плоскости. Пружины двух других групп находятся в контактной плоскости. Характерно, что оси любой пары «касательных» пружин, принадлежащих разным группам, ориентированы во взаимно ортогональных направлениях.

Нахождение параметров дискретной расчётной схемы (рис. 2) и построение в соответствии с ней математической модели, описывающей статическое поведение станка, было выполнено с использованием специально созданной для решения подобных задач подсистемы [5]. В основу её функционирования были положены два разработанных автором метода [4, 6], обеспечивающих машинную линеаризацию (в окрестности состояния статического равновесия) и дискретизацию нелинейных контактных систем высокой степени сложности, а также автоматическое построение их линейных математических моделей.

Прокомментируем результаты полученных описанным способом решений ряда практически важных задач, возникших на концептуальной стадии создания указанного фрезерного станка.

Задача 1. Выбор целесообразного количества и мест расположения ходовых винтов для осуществления линейных перемещений подвижных органов станка.

Для получения проектных оценок возможных конструктивных вариантов несущей системы фрезерного станка (рис. 2), отличающихся числом и расположением ходовых винтов, было рассмотрено и проанализировано семь вариантов, приведённых в таблице.

Таблица

Оценка влияния числа и расположения ходовых винтов на тяговые силы

Вариант	Наличие ходовых винтов (рис. 2)	Направление движения (см. рис. 1, 2)		Тяговая сила, кН						Иерархия вариантов при движении стойки			
				на ходовом винте			суммарная при движении стойки 3						
				тумбы 9	стойки 3	A	B	C	вниз	вверх	вниз – вверх	вниз	вверх	вниз – вверх
1	A			Заклинивание						-	-	-	-
				29,3	-	-		29,3				6	
2	B			-	7,9	-	7,9		19,8	1		1	
				-	11,9	-		11,9			1		
3	C					18,2	18,2		-	6		-	
				Заклинивание							-		
4	A, B			4,4	4,3	-	8,7		23,7	2		3	
				5,4	9,6	-		15,0			4		
5	A, C			7,2	-	4,8	12,0		29,0	5		5	
				7,0	-	10,0		17,0			5		
6	B, C			-	6,4	3,5	9,9		22,4	4		2	
					6,5	6,0		12,5			2		
7	A, B, C			4,1	3,9	1,6	9,6		23,7	3		4	

		↘	↗	2,8	5,8	5,5		14,1			3	
--	--	---	---	-----	-----	-----	--	------	--	--	---	--

Варианты 1 – 3 имели по одному ходовому винту: *A*, *B* или *C*. Варианты 4 – 6 - по два винта в комбинациях: *A* и *B*, *A* и *C*, *B* и *C*. В варианте 7 предусматривалось наличие трёх винтов: *A*, *B* и *C*. Каждый из вариантов оценивался по значениям тяговых сил на ходовых винтах при движениях стойки вниз, вверх и за цикл движений вниз – вверх (см. три последних столбца таблицы). Анализ полученных численных решений показал следующее.

Конструктивные варианты 1 и 3 являются нереализуемыми из-за возникших заклиниваний в направляющих «ведомых» узлов при их движениях вниз. В варианте 1 таким узлом была стойка 3, в варианте 3 – тумба 9. Характерно, что подобные явления всегда возникали в случаях, когда «ведомые» узлы оказывались не впереди, а позади «ведущих» узлов. В варианте 1 заклинивание происходило тогда, когда стойка 3 двигалась вслед за тумбой 9, а в варианте 3 - тумба 9 вслед за стойкой 3.

Как видно из таблицы, наименьшие значения тяговых сил (как при подъёме, так и опускании стойки), а следовательно, и наименьшие значения затрат мощности на реализацию движений соответствуют варианту 2, характеризующемуся наличием всего одного вертикально расположенного ходового винта *B*, соединяющего стойку 3 с тумбой 9. Поэтому вариант 2 – наилучший.

Второе место в иерархии вариантов следует отдать варианту 6, имеющему два ходовых винта (*B* и *C*) и отличающемуся от варианта 2 наличием дополнительного ходового винта *C*.

Обращает на себя внимание факт, связанный с тем, что введение второго винта *C*, хотя и приводит к уменьшению тяговой силы на винте *A* (см. вариант 6), но не уменьшает суммарной тяговой силы на обоих винтах.

Варианты 4 и 7 по величине суммарной тяговой силы за цикл движения стойки вверх - вниз практически оказались равнозначными. Однако предпочтение следует отдать варианту 4, как имеющему меньшее количество ходовых винтов. Поэтому в иерархии вариантов третье место за вариантом 4, а четвёртое - за вариантом 7.

Наихудшим оказался вариант 5, имеющий ходовые винты *A* и *C*.

В заключение анализа рассмотренных вариантов следует сделать замечание относительно выбора целесообразного количества ходовых винтов. Для обеспечения высокой плавности перемещений кинематически связанных подвижных узлов и отсутствия их заклиниваний при движениях количество ходовых винтов в станке должно быть минимальным. Лучше всего, когда ходовой винт один, поскольку наличие нескольких ходовых винтов всегда требует обеспечения высокой степени синхронности и синфазности их вращений.

Задача 2. Определение тяговых сил при силовом резании: а) с подачей стола, б) с подачей ползуна.

В качестве силового резания был выбран режим симметричного фрезерования сплошного образца из серого чугуна СЧ 15-32 шириной 150 мм твердосплавной торцевой фрезой (из сплава ВК8) диаметром 200 мм и числом зубьев $z=14$.

Параметры выбранного тестового режима обработки следующие: глубина резания $t = 8$ мм, частота вращения фрезы $n = 63$ об./мин, минутная рабочая подача $S_m = 500$ мм/мин.

При торцевом фрезеровании плоских поверхностей обрабатываемых деталей в качестве рабочей подачи на данном станке возможно использование либо продольной подачи стола S , либо поперечной подачи ползуна S_{Π} (рис. 1). При использовании в качестве рабочей подачи продольного движения стола векторы статических составляющих сил резания, приложенные к фрезе и детали в точках *a* и *b* (рис. 2) будут

$$F_a = -F_b = [14.5; 5.4; 10.0]^T, \text{ кН.} \tag{1}$$

При использовании в качестве рабочей подачи движения ползуна

$$F_a = -F_b = [5.4; 14.5; 10.0]^T, \text{ кН.}$$

Результат решения задачи следующий: тяговая сила при фрезеровании с подачей стола равняется 11,07 кН, с подачей ползуна - 17,74 кН. Таким образом, при фрезеровании с подачей ползуна тяговая сила оказалась в 1,6 раза больше, чем при фрезеровании с подачей стола. Это свидетельствует о том, что при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать варианту обработки с подачей стола как экономически более выгодному.

Задача 3. Оценка нагруженности соединений корпусных деталей несущей системы станка в рабочих условиях.

Оценка особенностей восприятия нагрузки несущей системой данного станка проводилась путём сравнения вычисленных значений энергий деформаций соединений корпусных деталей, вызываемых действием сил веса её узлов, сил затяжки болтами фланцевых соединений и сил резания (рис. 3).

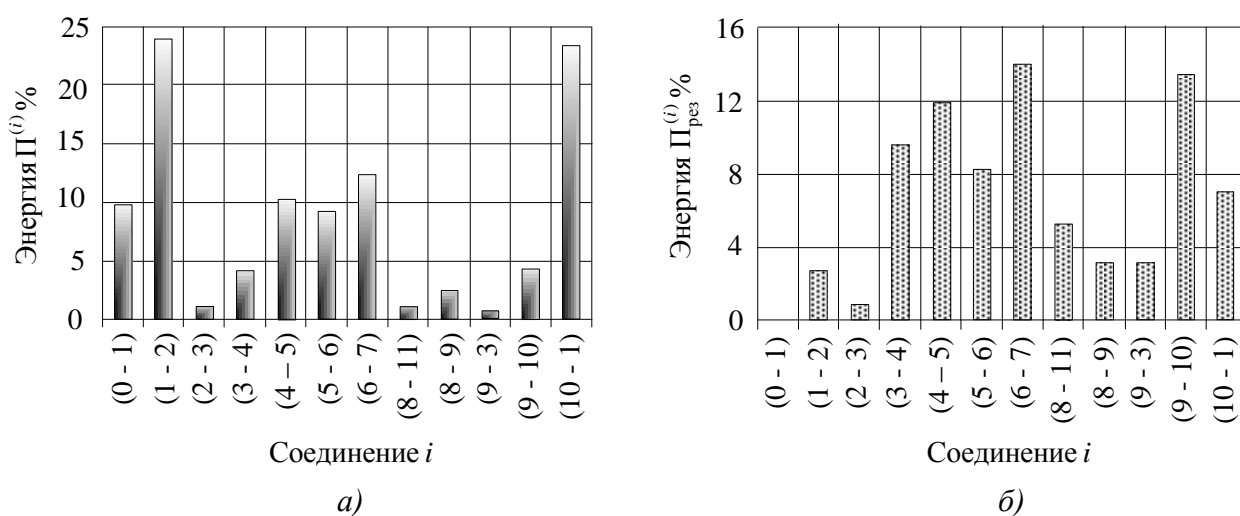


Рис. 3. Распределения энергий деформаций по соединениям корпусных деталей несущей системы станка (рис. 2), вызываемых:

a – силами веса, затяжки болтов и резания; *б* – только силами резания

(суммарные значения энергий $\sum_i \Pi^{(i)}$ и $\sum_i \Pi_{рез}^{(i)}$ равны 9,4 и 0,9 Нм соответственно)

Выделение и оценка эффекта действия сил резания осуществлялось по результатам двух расчётов, полученным вначале с учётом всех указанных выше сил, затем всех, но без сил резания.

Из рис. 3, *a* следует, что наиболее энергетически нагруженными являются соединения «основание – задняя тумба» 1 – 2 и «основание – передняя тумба» 10 – 1. Сумма энергий деформаций этих соединений достигает 48% от полной энергии, составляющей 9,4 Нм. Суммарная энергия деформаций соединений «ползун – плита» 4 – 5, «плита – корпус» 5 – 6 и «корпус – поворотная головка» 6 – 7 составляет 32%. На долю соединения «основание станка – пол цеха» приходится 10% полной энергии. Таким образом, энергия деформаций указанных соединений составляет примерно 90% от полной энергии.

Из анализа приведённых результатов следует вывод о том, что при последующей конструкторской проработке необходимо обеспечить достаточно высокую жёсткость центральной части основания станка, а также жёсткость группы соединений, связывающих ползун с поворотной головкой.

Что касается энергии деформаций соединений под действием сил резания, то здесь следует отметить её достаточно низкий уровень (0,9 Нм) в сравнении с общей энергией (9,4 Нм). Около 43% энергии деформаций соединений, вызываемых силами резания, сосредоточено в соединениях «стойка - ползун» 3 – 4, «ползун - плита» 4 – 5, «плита - корпус» 5 – 6 и «корпус – поворотная головка» 6 – 7. Около 20% энергии деформаций приходится на соединения

«тумба подвижная – тумба передняя» 9 – 10 и «тумба передняя - основание» 10 – 1.

Задача 4. Оценка деформаций в рабочем пространстве станка.

Такого рода оценка была выполнена при нагружении станка в зоне резания распорными силами (1), имитирующими статические составляющие силы фрезерования. Соответствующие этому случаю нагружения абсолютные и относительные перемещения т. *a* (фреза) и т. *b* (обрабатываемая деталь) приведены на рис. 4.

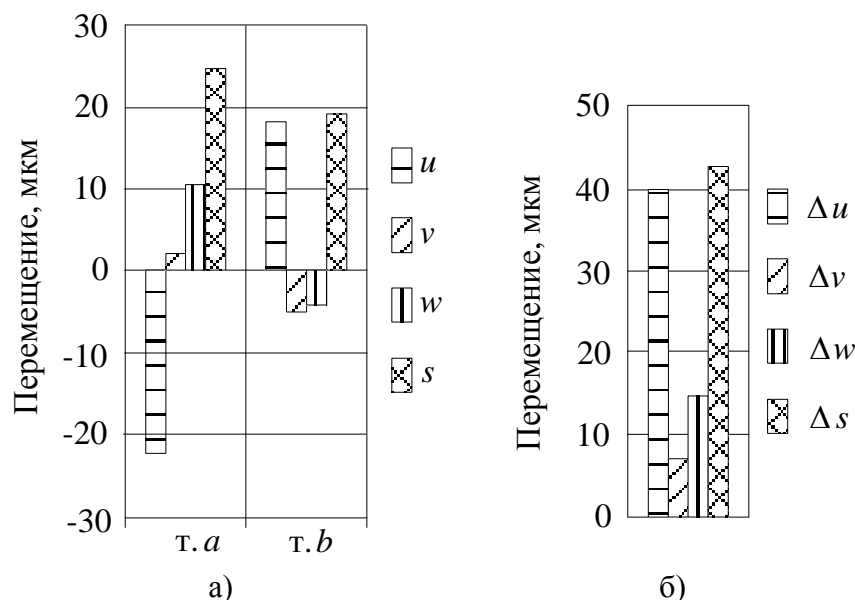


Рис. 4. Абсолютные (а) и относительные (б) перемещения контрольных точек фрезы (т. а) и обрабатываемой детали (т. б) при действии распорной нагрузки (1):

u, v, w – составляющие абсолютного перемещения *s* указанных точек по координатным осям X, Y, Z ;

$\Delta u, \Delta v, \Delta w$ - то же, но относительного перемещения Δs

Полученные расчётные значения перемещений примерно соответствуют уровню перемещений в рабочих пространствах других существующих фрезерных станков подобного габарита, возникающих в них при аналогичных условиях нагружения. Поэтому сомнений относительно того, достаточной ли жёсткостью в зоне резания будет обладать исследуемый станок после детальной конструкторско – технологической проработки и изготовления, не возникает.

Библиографический список

1. **Соколовский А.П.** Жесткость в технологии машиностроения / А.П. Соколовский. – М. – Л.: Машгиз, 1946. – 454 с.
2. **Левина, З.М.** Контактная жесткость машин / З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.
3. **Бэк, Н.** Анализ контактных деформаций методом отдельных элементов / Н. Бэк, М. Бурдекин, А. Кавли // Экспресс-информация «Автоматические линии и металлорежущие станки». – М.: ВИНТИ, 1975. № 45. С. 18–33.
4. **Маслов, Г.В.** Расчёт станочных контактных систем на основе дискретизации стыков / Г.В. Маслов, А.А. Ершов // СТИН. 2003. № 1. С. 8–14.
5. **Маслов, Г. В.** Автоматизация динамического анализа механических систем / Г. В. Маслов, А.М. Стерлин, С.О. Хвостов // Нелинейные колебания механических систем: труды VIII Всерос. науч. конф.: в 2 т. / под ред. Д. В. Баландина, В. И. Ерофеева. – Н. Новгород: Издательский дом «Диалог Культур», 2008. Т. 2. С. 146–150.

6. **Маслов, Г.В.** Инженерный метод получения динамической модели станка. // Проектирование технологических машин: сб. науч. тр. / под ред. А.В. Пуша. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 1998. Вып. 11. С. 7–16.

*Дата поступления
в редакцию 26.01.2015*

G.V. Maslov

**THE QUESTION PRE-ASSESSMENT OF THE QUALITY MILLING
MACHINE ALTERNATIVE LINK**

Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The results pre-simulation modeling milling machine unconventional layout.

Key words: milling machine, the carrier system of the machine, a constructive option, pre-simulation, evaluation criteria quality, statics.

УДК 621.9.044

Е.В. Басова

**ОПИСАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ, ОБРАБОТАННОЙ МЕТОДОМ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,
Харьков (Украина)

Получил дальнейшее развитие метод оценки шероховатости поверхности, обработанной по технологии высокоскоростного фрезерования, на базе интегрального функционала качества с учетом деформационных процессов в материале. Показано, что для оценки шероховатости фрезерованной поверхности требуется использование параметра Rg^2 , а текстуру такой поверхности можно описать с помощью wavelet-функции, поскольку шероховатость поверхности приобретает случайный характер.

Ключевые слова: шероховатость, высокоскоростное фрезерование, концевая фреза, интегральный функционал качества, деформация, wavelet-анализ.

Современное производство развивается в рамках цифровых технологий и характеризуется повышением требований к качеству изготовления машиностроительной продукции. Из анализа наиболее современных и перспективных тенденций развития методов металлообработки установлено, что минимальное значения шероховатости поверхности детали можно ожидать от применения высокоскоростной обработки (ВСО) [1]. Однако использование ВСО требует как овладения технологией в целом, так и изучения механизма формирования качественных характеристик нарушенного слоя после ее применения. Одной из основных характеристик процесса высокоскоростной лезвийной обработки является именно шероховатость обработанной поверхности. В качестве основного критерия оценки шероховатости принято использовать среднеарифметическое отклонение профиля Ra , однако, профессор Добротворский С.С. в 1996 г. доказал, что такой параметрический подход не способен полноценно оценить картину распределения шероховатости шлифованных поверхностей, и предложил использование параметра Rg (среднеквадратического отклонения профиля) [2]. Рассмотрим подход оценки шероховатости поверхности, обработанной по технологии высокоскоростного фрезерования концевыми сферическими фрезами с использованием результатов профессора Добротворского С.С.

Целью статьи является изучение механизма формирования и описание шероховатости поверхности обработанной методом ВСО концевыми фрезами.

В процессе применения ВСО различных материалов актуальным является не только обеспечение низкой шероховатости обработанных поверхностей, но и стабильность полученного результата. Решение этой задачи возможно при глубоком понимании, изучении и мониторинге процессов и явлений, протекающих при резании и формировании поверхностных характеристик. Специфика технологии ВСО позволяет говорить об ограниченности применения традиционных знаний о процессе фрезерования при назначении режимов резания для обеспечения оптимальных параметров шероховатости поверхностей деталей. В связи с этим авторами работы [3] был проведен анализ работ отечественных и зарубежных исследователей, позволивший получить краткую характеристику факторов, влияющих на шероховатость обработанной поверхности при ВСО.

Результаты анализа позволили сформулировать интегральный функционал шероховатости поверхности, обработанной концевым высокоскоростным фрезерованием. Разработанный функционал по своей сути являлся отображением влияния геометрических составляющих технологического процесса обработки на среднеарифметическое отклонение профиля поверхности. Ранжирование параметров такого функционала дает возможность обоснованно

выбрать условия обработки для получения минимального значения параметра R_a . Дальнейшие исследования особенностей формирования шероховатости поверхностей, обработанных с применением технологии высокоскоростного фрезерования (ВСФ) концевыми фрезами, дали основание полагать, что, помимо геометрической составляющей процесса механообработки, на формирование поверхностной текстуры влияют еще и деформационные процессы в зоне обработки. Так как применение технологии ВСФ, в отличие от обработки с традиционными скоростями резания, порождает задачи изучения и учета механизма тепловыделения в зоне резания, внутреннего трения частиц металла в стружке и в зоне пластического деформирования, а также давление на инструмент в процессе ВСФ (рис. 1).



Рис. 1. Сводная структурная схема факторов, влияющих на качество обрабатываемой поверхности (на базе схемы Бернардоса, Воснякоса [4])

Известно, что при фрезеровании концевыми сферическими фрезами величины продольной и поперечной шероховатости поверхности сильно отличаются. Величина поперечной шероховатости ($R_{a\text{попереч}}$) может превышать значение продольной ($R_{a\text{продол.}}$) в несколько раз, что объясняется наличием остаточных гребешков между соседними проходами фрезы. В этом случае использование параметра R_a для оценки шероховатости обработанной поверхности является недостаточным, так как он не способен отразить истинное распределение шероховатости по поверхности. Тогда необходимо использовать параметр, способный отразить как периодические, так и случайные составляющие распределения шероховатости обработанной поверхности. Такому условию соответствует квадратичный интегральный функционал R_g .

В работе профессора Добротворского С.С. [2] рассмотрены процессы формирования продольной и поперечной шероховатости при шлифовании инструментом из сверхтвердых материалов. Им установлено, что шероховатость в поперечном и продольном направлениях можно оценить квадратичным отклонением профиля, что позволяет учитывать как периодические, так и случайные составляющие шероховатости шлифованной поверхности с нормальным распределением амплитуд. В этом случае шероховатость поверхности рассматривалась в пределе как сигнал белого шума, который состоит из периодических, случайных составляющих и их произведения (суперпозиции). Такой подход решает задачу описания шероховатости поверхности, используя обратное преобразование Лапласа, а для принятия пра-

вильного решения – критерий Пирсона. На основании этого можно говорить, что равенство R_a в продольном и поперечном направлениях является доказательством того, что поверхность после высокоскоростного фрезерования концевыми сферическими фрезами по своей шероховатости стремится к поверхности, характерной для шлифования, однако для ее достаточного описания необходимо использовать квадратичный функционал.

Дальнейшее развитие этого подхода возможно именно за счет учета деформационной составляющей процесса лезвийной обработки, которую в работе [1] предлагается учитывать в виде угла наклона нормали фрезы и угла наклона стружкоотводной канавки инструмента при реализации технологии ВСФ (рис. 1). Необходимо отметить, что величина деформационной составляющей зависит от твердости обрабатываемого материала. Для усиления деформационной составляющей, а следовательно, и уменьшения шероховатости обработанной поверхности в работе [1] предложена технология ВСФ с половинным перекрытием, суть которой заключается в том, что после проведения строчной обработки поверхность обрабатывается по эквидистантной траектории с половинным шагом (рис. 2).

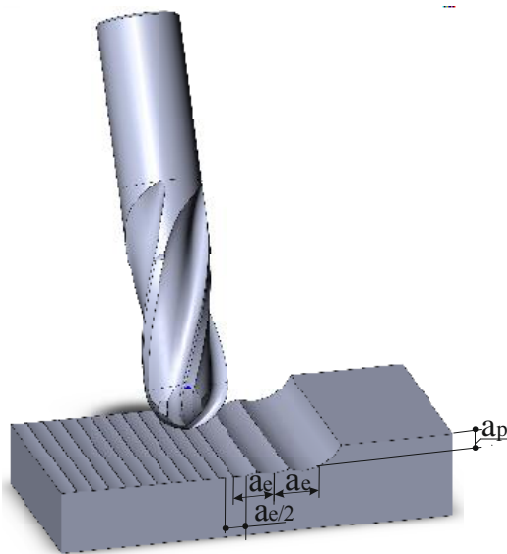


Рис. 2. Технология ВСФ строчной обработки с половинным перекрытием:
 a_p – глубина резания (мм); a_e – ширина между соседними проходами фрезы (мм)

Изложенные результаты дали основание для доработки интегрального функционала шероховатости обработанной поверхности, представленного в работе [3], с учетом не только геометрической составляющей процесса механообработки, но и с учетом деформационной составляющей. В качестве деформационной составляющей предложено учесть угол наклона нормали режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности и угол наклона спирали стружкоотводной канавки фрезы [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_g^\Sigma = \int (R, a_p, S, V_{рез}, V_{деф}, i, \angle N) dt \rightarrow \min \\ 0^\circ \leq i < 90^\circ \\ 0^\circ < \angle N < 90^\circ \rightarrow \text{optimal (ooptima= } 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ \text{ в зависимости от условий обработки)} \end{array} \right. \quad (1)$$

где R – радиус сферической части концевой фрезы (мм); a_p – глубина резания (мм); S – подача (мм/мин); $V_{рез}$ – скорость резания (м/мин); $V_{деф}$ – скорость деформации (c^{-1}); $\angle N$ – угол наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности; i – угол наклона стружкоотводной канавки инструмента.

Минимизацию данного функционала можно осуществить методом профессора Тагучи или методом, предложенным профессором Добротворским С.С., в зависимости от реальных

условий обработки, что позволит ранжировать параметры и контролировать качество обрабатываемой поверхности путём корректировки входных параметров. Оба метода базируются на рассмотрении разных уровней соотношения сигнал-шум для принятия правильных решений. Однако выполнить многокритериальную оптимизацию функционала достаточно сложно, так как метод, предложенный Доброворским С.С., не позволяет осуществить многокритериальную оптимизацию с одновременным учетом семи технологических параметров; метод Тагучи не рассматривает взаимосвязь параметров, а выбирает наиболее существенный, т.е. не отражает физику процесса обработки. Поэтому оптимальным решением выполнения многокритериальной оптимизации интегрального функционала качества является моделирование процесса обработки на базе метода конечных элементов. Для усиления деформационной составляющей процесса обработки необходима разработка новой технологии со сложными траекториями перемещения режущего инструмента. Анализ параметров функционала показал, что по мере увеличения скорости резания при ВСО вклад геометрических параметров в интегральный функционал качества обработанной поверхности методом ВСФ концевым сферическим инструментом должна уменьшаться и возрастет роль деформационных процессов [1]. В случае придания инструменту сложной траектории движения фрезерованная поверхность по своим параметрам должна стремиться к поверхности, характерной для шлифования, т.е. иметь случайный характер.

Исследования текстуры поверхности, обработанной с применением технологии ВСФ со сложными траекториями перемещения инструмента, проводили с применением wavelet-анализа (рис. 3). Были проведены ряд исследований, которые позволили определить предельные частоты срезов фильтров, что дало возможность отделить шероховатость сложнопрофильной поверхности от волнистости и профиля. Задачу разделения сигнала на каналы решали с применением wavelet-преобразования в качестве набора фильтров.

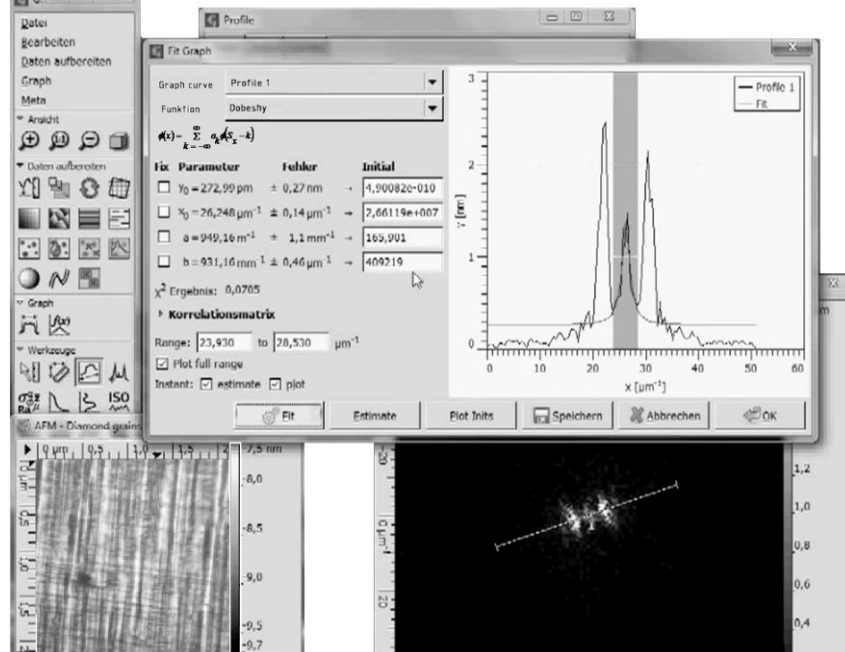
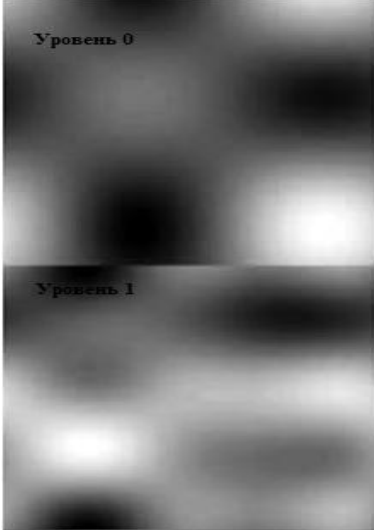
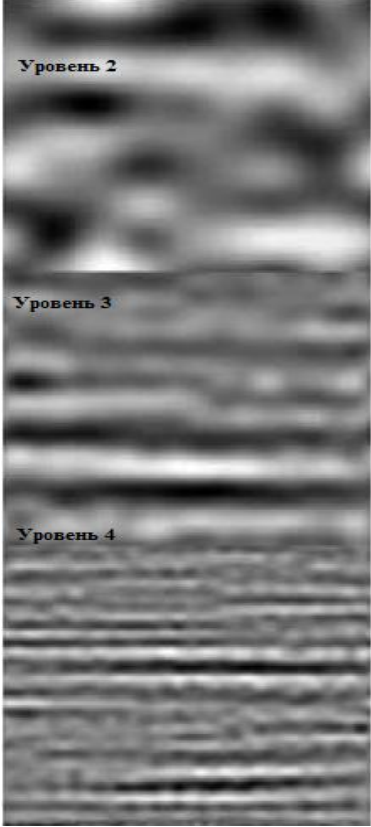
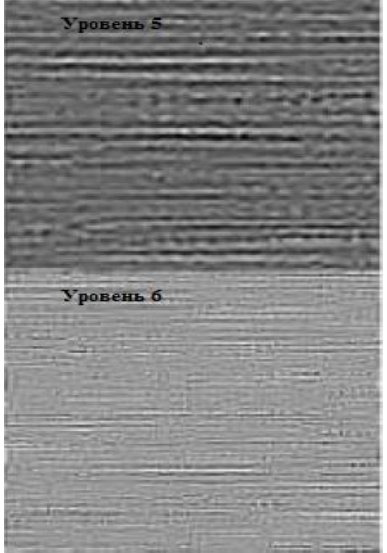
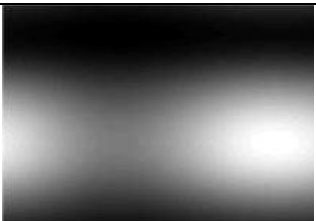
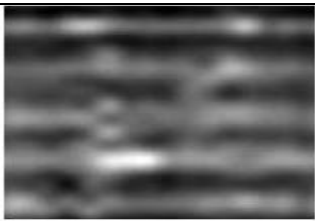
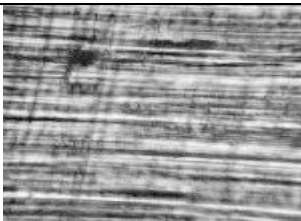
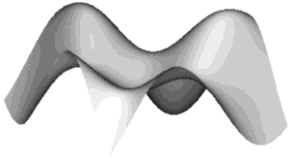
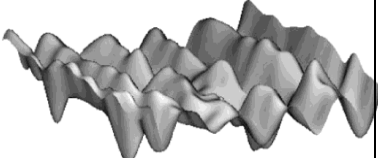
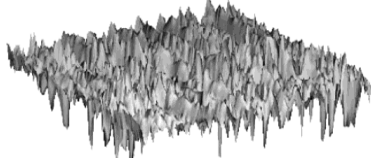


Рис. 3. Разложение поверхности на каналы посредством wavelet Добеши порядка 20 в среде пакета Gwyddion

Фильтрация профилограммы и изображения поверхности после ВСФ на первом этапе позволила получить уровневое разложение обработанной поверхности. На втором этапе оценки шероховатости удалось получить пространственное отображение шероховатости, волнистости и профиля поверхности (табл. 1).

Таблица 1

Многомасштабное разложение изображения поверхности

Фильтры для отделения профиля	Фильтры для отделения волнистости	Фильтры для отделения шероховатости
Многоуровневое разложение		
		
Наложение уровней для отделения составляющих поверхности		
		
Оценка текстуры поверхности		
 <p data-bbox="288 1684 464 1715">Ra=0,056 мкм</p>	 <p data-bbox="719 1684 895 1715">Ra=0,012 мкм</p>	 <p data-bbox="1129 1684 1305 1715">Ra=0,011 мкм</p>

Выводы

В результате исследований установлено, что на формирование шероховатости поверхности, обработанной методом высокоскоростного фрезерования, влияют две составляющие процесса механообработки: геометрическая и деформационная. Сама же фрезерованная поверхность, после применения технологии ВСФ со сложными траекториями перемещения инструмента, соответствует по характеристикам шлифованной и является случайным процессом распределения амплитуд как в продольном, так и поперечном направлении ($Ra_{\text{попереч}} = Ra_{\text{прод}} = 0,011$ мкм) (табл. 1). Шероховатость такой поверхности является процессом с

нормальным распределением амплитуд, которую с точки зрения пространственной оценки перспективно описывать параметром R_g^2 . Так как квадратичный интегральный функционал, в отличие от традиционных методов оценки шероховатости среднеарифметическим отклонением профиля (R_a) и высотой неровностей профиля по десяти точкам (R_z), позволяет детально описать профиль шероховатости поверхности в одном сечении.

Описание профиля шероховатости всей поверхности с помощью разработанного интегрального функционала качества является достаточно сложной проблемой. Задача оценки величины шероховатости сложных криволинейных поверхностей является еще более сложной. Использование современного математического аппарата с применением wavelet-функций позволяет отделить кривизну обрабатываемой поверхности от параметров шероховатости. Текстура поверхности после ВСФ со сложными траекториями перемещения инструмента в пределе стремится к текстуре, характерной для шлифованной поверхности, что подтверждает правильность учета в интегральном функционале качества деформационной составляющей процесса обработки.

Библиографический список

1. **Басова, Е.В.** Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закаленных хромомолибденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с.
2. **Добротворський, С.С.** Наукові основи процесу лазерної правки шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів : автореферат дисс. ... доктора технічних наук : 05.03.07 / Сергій Семенович Добротворський. – Київ, 1996. – 37 с.
3. **Добротворский, С.С.** Разработка интегрального функционала качества обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании / С.С. Добротворский, Е.В. Басова // Вісник інженерної академії України. – К., 2011. №3. С. 125–130.
4. **Benardos, P.O.** Predicting surface roughness in machining: a review / P.O. Benardos, G.C. Vosniakos // International Journal of machine Tools and Manufacture. 2003. №43. P. 833–844.

Дата поступления
в редакцию 09.02.2015

E.V. Basova

DESCRIPTION SURFACE ROUGHNESS TREATED BY HIGH-SPEED MILLING

National technical university «Kharkov polytechnic institute», Kharkov (Ukraine)

Purpose: Study of the source mechanism and description of surface roughness treated by *high speed ball milling*.

Method: Theoretical studies based on scientific foundations of engineering technology, theoretical mechanics and cutting, digital signal processing in the program Gwyddion in the study of profilograms complex surfaces.

Results: In order further developed method for estimating surface roughness treated by high-speed milling technology, on the basis of an integral functional quality with the deformation processes in the material. The study shown that the evaluation requires the use of roughness parameter R_g^2 , and the texture of a surface can be described using wavelet-function, since the surface roughness becomes random.

Application domain: The presented results allow getting an accurate description of surface roughness based on random and periodic components. The article can be useful for students, teachers, engineers and other specialists of engineering and aircraft construction enterprises.

Key words: roughness, high-speed milling, end mill, integral functional quality, deformation, wavelet-analysis.

УДК 006.057

Т.Н Гребнева, Е.А. Куликова

СТАНДАРТИЗАЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ КАЧЕСТВО КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены изменения в стандартизации допусков формы, месторасположения, ориентации и биения, связанные с введением национального стандарта ГОСТ Р 53442-2009 (ИСО1101:2004) взамен ГОСТ 24642-81. Проведен сравнительный анализ указанных стандартов, в процессе которого выявлены изменения в терминологии, в видах допусков, в их обозначении на чертежах. Кроме того, выявлено отсутствие согласованности с другими стандартами, в которых затронуты вопросы нормирования геометрических допусков, что ухудшает качество конструирования изделий машиностроения.

Ключевые слова: качество, стандартизация, взаимозаменяемость, допуски и посадки в машиностроении, допуски формы, допуски месторасположения, ориентации, биения, геометрические допуски.

В связи с тем, что срок действия ГОСТ 24642-81 закончился 01.01.2012 г., возникла необходимость установить, какие изменения вносятся заменившим его ГОСТ Р 53442-2009 (ИСО 1101:2004) в область нормирования геометрических характеристик изделий, которые оказывают существенное влияние на формирование требуемых свойств качества как деталей, так и машины в целом.

ГОСТ Р 53442-2009 распространяется на нормирование геометрических характеристик изделий и устанавливает определения видов допусков и правила указания на чертежах допусков формы, ориентации, месторасположения и биения. В этом стандарте применены термины по ГОСТ 31254-2004 (введен в действие 01.07.2005 г.) и новое определение термина «поле допуска». В то же время в нем дается ссылка на ГОСТ 2.308-2011 ЕСКД, в котором указывается, что в этом стандарте применены термины ГОСТ 24642-81, и тут же делается примечание, что на территории Российской Федерации этот стандарт не действует.

Выходит, что одни и те же требования в разных нормативных документах будут выражаться разной терминологией. Почему разработчиками этих стандартов не выполняется принцип стандартизации - принцип гармонизации стандартов, обеспечивающий идентичность документов, относящихся к одному и тому же объекту? Это мешает практической реализации программы комплексной стандартизации – основы создания новой техники, технологии и материалов.

Основные положения

ГОСТ 31254-2004 (ИСО 14660-1999) устанавливает общие термины и определение объектов нормирования: *полный элемент* (поверхность, линия на поверхности), *производный элемент* (центральная точка, средняя линия, средняя поверхность), *реальный элемент*, *выявленный полный элемент*, *выявленный производный элемент*, *присоединенный* (совмещенный) *полный элемент*, *присоединенный* (совмещенный) *производный элемент* и т.д., примененные для формулировки определений геометрических характеристик в ГОСТ Р 53442-2009 (в отличие от ГОСТ 24642). В этих терминах формулируются основные положения стандарта, в том числе и то, что геометрический допуск элемента определяет *поле допуска*, в пределах которого должен располагаться *полный* или *производный элемент*, и распространяется на *всю длину элемента*, если нет иных указаний. По ГОСТ Р 53442-2009 *поле допуска* - это область на плоскости или в пространстве, ограниченная одной или несколькими идеальными линиями или поверхностями и характеризуемая линейным размером, называемым допуском.

В ГОСТ Р 53442-2009 перечислены различные формы полей допусков в зависимости

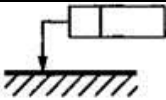
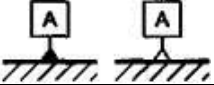






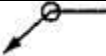
от нормируемой геометрической характеристики элемента и способа указания допуска на чертеже:

- область внутри окружности;
- область между двумя концентрическими окружностями;
- область между двумя равноотстоящими (эквидистантными) линиями или двумя параллельными прямыми линиями;
- область внутри цилиндра;
- область между двумя соосными цилиндрами;
- область между двумя равноотстоящими (эквидистантными) поверхностями или двумя параллельными плоскостями;
- область внутри сферы.

Элемент, для которого установлен геометрический допуск, может иметь любую *форму* или *ориентацию* в пределах поля допуска при отсутствии дополнительного знака (табл. 1), накладывающего ограничения на его форму или месторасположение.

Таблица 1

Дополнительные знаки для указания геометрических допусков

Описание обозначения	Обозначение	Описание обозначения	Обозначение
Указание элемента, для которого установлен допуск		Требование к внешней границе	ⓔ
Указание базового элемента		Общее поле допуска	CZ
Указание базового участка		Внутренний диаметр	LD
Теоретически точный размер		Наружный диаметр	MD
Выступающее поле допуска		Делительный диаметр	PD
Требование максимума материала		Элемент - линия	LE
Требование минимума материала		Невыпуклый	NC
Условие свободного состояния (нежесткие детали)		Любое поперечное сечение	ACS
Со всех сторон (профиль)			

Виды допусков

Наибольшему изменению подверглась группа допусков расположения. В соответствии с ГОСТ Р 53442-2009 все виды допусков, являющихся геометрическими характеристиками, разделены на *четыре* группы – допуски *формы*, допуски *ориентации*, допуски *месторасположения*, допуски *биения* (табл. 2) – в отличие от межгосударственного стандарта ГОСТ 24642-81, в котором разделение допусков расположения на допуски ориентации и допуски месторасположения рассматривалось как дополнительное. В то же время в ГОСТ 2.308-2011 сохраняется прежняя классификация.

Таким образом, вместо одной группы «*допуски расположения*» появились две группы – допуски *ориентации* и допуски *месторасположения*. В связи с этим возникает вопрос о возможности применения термина «*допуски расположения*» вообще, в том числе и в ссылке на общие допуски формы и расположения по ГОСТ 3089.2-2002, например: «Общие допуски формы и расположения - ГОСТ 30893.2-К». Но если это невозможно, тогда должна быть

следующая запись: «Общие допуски формы, месторасположения, ориентации и биения - ГОСТ 30893.2-К», или оставлен вариант записи без поясняющих слов, а в ГОСТ3089.2-2002 должны быть внесены соответствующие изменения.

Таблица 2

Наименование и условные обозначения геометрических характеристик по ГОСТ Р 53442-2009

Группа допусков	Геометрическая характеристика	Обозначение геометрической характеристики	Необходимость указания базы
Допуски формы	Прямолинейность		Нет
	Плоскостность		
	Круглость		
	Цилиндричность		
	Форма заданного профиля		
	Форма заданной поверхности		
Допуски ориентации	Параллельность		Да
	Перпендикулярность		
	Наклон		
	Форма заданного профиля		
	Форма заданной поверхности		
Допуски месторасположения	Позиционирование		Да или нет
	Концентричность (для точек)		Да
	Соосность (для осей)		
	Симметричность		
	Форма заданного профиля		
	Форма заданной поверхности		
Допуски биения	Биение		Да
	Полное биение		

ГОСТ Р 53442-2009 не предусматривает применение допуска «пересечение осей», который устанавливался по ГОСТ 24642-81 и сохраняется в ГОСТ 2.308-2011. Возникает вопрос, как тогда нормировать точность расположения (ориентации) осей в конических передачах?

Что касается допусков формы, в перечне видов допусков формы (табл. 2) отсутствует такой вид допуска как «*допуск профиля продольного сечения*» цилиндрической поверхности. По-видимому, вместо этого вида следует применять «*допуск прямолинейности*», так как именно прямая линия является образующей цилиндрической поверхности. Однако при описании обозначения этого допуска на чертеже, в пределах которого должна находиться выявленная образующая цилиндрической поверхности, в примечании указывается, что определение выявленной образующей не стандартизовано.

Не стандартизовано пока и определение *других видов отклонений, понятий прилегающего профиля или прилегающей поверхности*, а определения видов полей допусков формы и расположения приводятся в терминах ГОСТ 31254-2004 и основаны на *геометрически идеальных элементах*.

По ГОСТ 24642-81 допуски формы заданного профиля и формы заданной поверхности, а также допуски биения относились к группе *суммарных допусков*. Отклонение этих видов допусков являются результатом совместного проявления отклонений размеров и формы профиля (поверхности), а также отклонений расположения (месторасположения) его относительно заданных баз, что и определяет их основное отличие как от допусков формы, так и допусков расположения. В рассматриваемом стандарте назначение суммарных допусков вообще не рассматривается, также как и назначение частных видов отклонений формы.

По ГОСТ Р 53442-2009 допуски *формы заданного профиля* и *формы заданной поверхности* отнесены одновременно к трем группам допусков- допускам формы, ориентации и месторасположения – и задаются либо безотносительно базы, либо относительно базы. То есть проведена более детальная классификация допусков криволинейного профиля (поверхности).

Допуски биения выделены в отдельную группу «*допуски биения*». Здесь, наоборот (табл. 2), отсутствует детализация видов допусков в зависимости от вида поверхности, к которой они относятся (радиальное или торцовое), что имеет место в ГОСТ 2.308-2011. Однако дальше в ГОСТ Р 53442-2009 дается определение этих видов допусков (поз.18).

Ориентация ширины поля допуска

В ГОСТ Р 53442-2009 выделяется отдельная позиция, в которой рассматриваются вопросы *ориентации ширины поля* допуска по отношению к номинальному геометрическому размеру (направлена по нормали к нему). Например, поле допуска *круглости* всегда располагается в плоскости, перпендикулярной к номинальной оси.

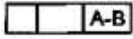
Для описания ориентации ширины поля позиционного допуска используется термин «шаблон теоретически точных размеров» (ГОСТ Р 53089-2008). *Шаблон теоретически точных размеров* - это совокупность теоретически точных размеров, установленных для нормируемого элемента или группы нормируемых элементов

Указание теоретически точных размеров

Если для элемента (или группы элементов) устанавливаются допуски *месторасположения, ориентации, формы заданного профиля или формы заданной поверхности*, то размеры, определяющие теоретически точное (номинальное) месторасположение, ориентацию, форму заданного профиля или форму заданной поверхности, называют *теоретически точными размерами* (ГОСТ Р 53442-2009). Термин «теоретически точный размер» не используется в ГОСТ 2.308-2011 г. для обозначения размеров, определяющих номинальное расположение и номинальную форму элементов, хотя обозначаются такие размеры одинаково (без предельных отклонений и заключаются в прямоугольные рамки).

Указание баз

ГОСТ Р 53442-2009 устанавливает, что базу, относительно которой задан допуск элемента, следует указывать прописной буквой в рамке базы. При этом не указывается буквами, какого алфавита, русского (в соответствии с ГОСТ 24642) или латинского, следует обозначать базу. В соответствии с приведенными примерами и в связи с тем, что ГОСТ Р 53442-2009 разработан на базе международного стандарта ИСО1101:2004, базы, видимо, должны обозначаться прописными буквами *латинского* алфавита.

По ГОСТ Р 53442-2009 если *два элемента* образуют *общую базу*, то каждый элемент обозначают самостоятельно и прописные буквы в рамке допуска разделяют дефисом , что не согласуется с обозначением по ГОСТ 2.308-2011, где буквы записываются подряд без разделения дефисом.

Если для указания поверхности используют выноску, то допускается треугольник, обозначающий базу, располагать на полке выноски – это дополнительный вариант обозначения, которого нет в ГОСТ 2.308-2011.

ГОСТ Р 53442-2009 устанавливает *дополнительные обозначения*, применяемые при установлении допусков (табл. 1). В частности, это касается негладких типовых поверхностей. Например, допуски и базы, устанавливаемые для резьбы, если нет иных указаний, относятся к оси цилиндра, диаметр которого равен среднему диаметру резьбы. Если же под рамкой указан знак «MD» или «LD», то допуски и базы относятся к оси цилиндра, диаметр которого равен наружному (рис. 1, а) или внутреннему диаметру резьбы соответственно (рис. 1, б).

Допуски и базы, устанавливаемые для зубчатых колес и деталей шлицевых соединений, следует указывать с дополнительными знаками «PD», «MD» или «LD», которые означают, что допуски и базы относятся к оси цилиндра, диаметр которого равен делительному диаметру, наружному диаметру, внутреннему диаметру соответственно.

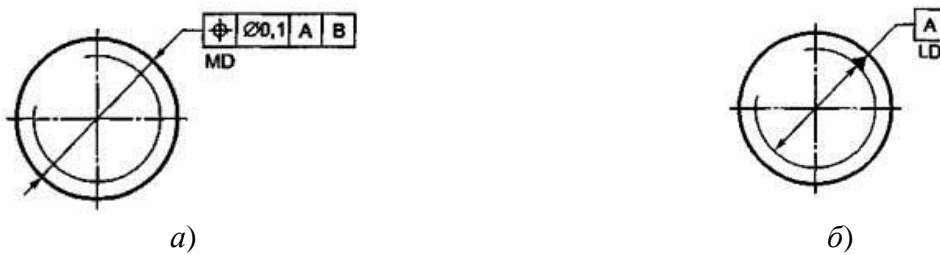


Рис. 1. Обозначение допусков и баз с дополнительными знаками

Указание требования максимума или минимума материала

ГОСТ Р 53442-2009 вводит вместо *зависимых допусков расположения* указание *требований максимума* или *минимума материала* (табл.1) в соответствии с ГОСТ Р 5309002008. Минусы такой замены, связанные с назначением позиционных допусков, подробно рассмотрены в статье [7].

Понятие о *требовании максимума* или *минимума* материала устанавливается ГОСТ Р 53090-2008 (дата введения 01.01.2011), в котором даются термины и их определения, связанные с этими требованиями, а также с требованием взаимодействия. Эти требования позволяют объединить ограничения, накладываемые допуском размера и геометрическим допуском в одно комплексное требование, которое позволяет увеличивать геометрический допуск нормируемого элемента детали, если действительный размер элемента не достигает предельного значения, определяемого установленным допуском размера.

Требование взаимодействия является дополнительным к требованию максимума материала или к требованию минимума материала. Оно может быть установлено только по отношению к нормируемому элементу и меняет его допуск в комплексе требований максимума материала или минимума материала и позволяет размеру использовать допущение, предоставляемое соответственно *действующей границей максимума материала* или *действующей границей минимума материала*.

Требование максимума (рис. 2, а) или минимума (рис. 2, б) материала обозначают символом \textcircled{M} или \textcircled{L} соответственно, который помещают либо после числового значения геометрического допуска, либо после буквенного обозначения базы, либо после того и другого (рис. 2, в) в зависимости от предъявляемых требований.

В случае установления *требования взаимодействия*, например, дополнительно к требованию максимума материала, указывают на чертеже знаком \textcircled{R} , который помещают в рамку допуска после знака \textcircled{M} .

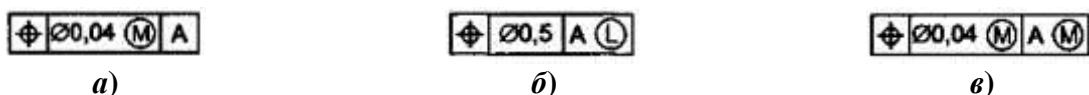


Рис. 2. Указание требования максимума или минимума материала

Выводы

1. Проведенный анализ показал, что имеет место несогласованность действующих стандартов в части трактовки и определений сходных терминов, параметров и обозначений, что нарушает основные принципы и методы стандартизации, затрудняет процесс проектирования изделий машиностроения, ухудшая качество технической документации и взаимопонимание специалистов в области стандартизации.

2. Не решен до конца вопрос оценки геометрических отклонений. Это затрудняет выполнение нормирования геометрических характеристик деталей и изделий в целом.

3. Нельзя вводить в действие недоработанные, негармонизированные стандарты, нарушая тем самым устоявшуюся систему стандартизации в области допусков и посадок.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 53442 -2009 (ИСО 1101:2004) ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения. – М.: Изд-во стандартов, 2009.
2. ГОСТ Р 53089-2008 (ИСО5458:1998) ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Установление позиционных допусков. – М.: Изд-во стандартов, 2008.
3. ГОСТ Р 53090-2008 (ИСО 2692:2006) ОНВ. Характеристики изделий геометрические. Требования максимума материала, минимума материала и взаимодействия. ГОСТ 2.308-2011 Единая система конструкторской документации. Указание на чертежах допусков формы и расположения поверхностей. – М.: Изд-во стандартов, 2008.
4. ГОСТ 31254-2004 ОНВ. Геометрические элементы. Общие термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2004.
5. ГОСТ 30893.2-2002 (ИСО 2768.2) ОНВ. Общие допуски. Допуски формы и расположения поверхностей, не указанные индивидуально. – М.: Изд-во стандартов, 2002.
6. ГОСТ 2.308-2011 ЕСКД. Указания допусков формы и расположения поверхностей. – М.: Изд-во стандартов, 2011.
7. **Кайнова, В.Н.** Роль термина «зависимый допуск», влияющего на снижение себестоимости и трудоемкости при изготовлении неотчетливых соединений / В.Н. Кайнова, Е.М., Демьянович // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №5 (102).

*Дата поступления
в редакцию 09.02.2015*

T. N. Grebneva, E. A. Kulikova

STANDARDIZING AS AN INSTRUMENT PROVIDING FOR THE QUALITY OF CONSTRUCTING AND DESIGN

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

Changes in standardizing of tolerances of form, location, orientation and runout according to GOST P 53442-2009 (ISO1101:2004) national standard implemented instead of GOST 24642-81, are considered. A comparative analysis of the specified standards is effected, resulting in finding changes in terminology, types of tolerances and their indications on drawings. Moreover, the inconsistency of other standards dealing with geometrical tolerances regulation matters is revealed, which affects the quality of engineering product construction.

Key words: quality, standardizing, interchangeability, fits and tolerances in engineering, form tolerances, location tolerances, tolerances of orientation (orientation tolerances), runout tolerances, geometrical tolerances.

УДК 621.791.01

Д.Ю. Шмельков¹, А.И. Поздышев¹, Е.А. Пигалова², Н.А. Курников²**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КАК ОДИН ИЗ ВИДОВ СВАРКИ НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева¹,
ОАО НАЗ «Сокол»²

Рассмотрены вопросы применения электронно-лучевой сварки. Приведена схема и методика работы оборудования для электронно-лучевой сварки. Указаны типы соединений этого способа сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, сварная конструкция, электронный луч.

Широкое применение новых конструкционных материалов на основе тугоплавких и высокоактивных металлов (титана, циркония, молибдена, вольфрама и др.) потребовало создания способа их обработки источником тепла с высокой плотностью энергии в условиях защиты от взаимодействия с газами воздуха (кислородом, азотом). Наиболее полно этим условиям отвечает электронно-лучевая технология.

Сущность электронно-лучевой обработки материалов состоит в использовании кинетической энергии пучка электронов, движущихся в вакууме без столкновений с остаточными молекулами воздуха. При бомбардировке электронами поверхности обрабатываемого материала подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в тепловую, которая и используется для обработки. Электронно-лучевая технология широко применяется в промышленности для плавки и переплава металлов и сплавов, с целью их очистки от вредных примесей и газов, а также для сварки, разделительной резки и пайки.

При электронно-лучевой сварке кинетическая энергия пучка электронов используется для расплавления стыка примыкающих друг к другу деталей и образования сварного шва. Формирование сварного шва (рис. 1) имеет ряд особенностей, обусловленных испарением свариваемого материала и силовым воздействием давления отдачи пара на расплавленный металл. Давление этой отдачи на 3...5 порядков превышает давление электронного луча.

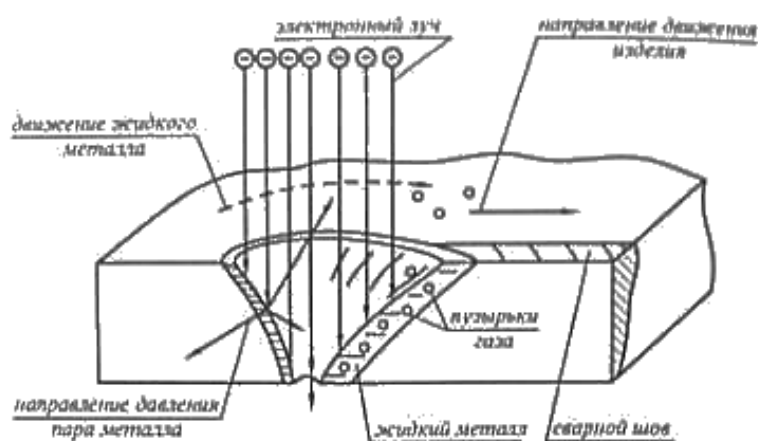


Рис. 1. Схема формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке

При определенном значении плотности и достаточной общей мощности электронного луча в сварочной ванне образуется канал-кратер, который может распространяться на всю толщину свариваемого материала, как и при сварке лучом лазера. Перемещение свариваемо-

го изделия или электронного луча приводит к периодическому переносу жидкого металла из зоны плавления в зону кристаллизации при непрерывном воздействии электронного пучка на свариваемый материал. Образование кратера на всю глубину проплавления позволяет получить исключительно малый объем сварочной ванны и, следовательно, минимальные деформации свариваемых изделий. Применение высоких скоростей сварки обеспечивает минимальное термическое воздействие на свариваемый материал в околошовной зоне, а высокие скорости кристаллизации (при эффективном теплоотводе) получение высоких механических свойств сварного соединения.

Технологические параметры электронно-лучевой сварки (табл. 1) – это ускоряющее напряжение U , кВ; скорость сварки $V_{св}$, м/ч; сила тока луча I_l , мА; сила тока магнитной фокусирующей линзы I_m , мА. Последний определяет диаметр пятна воздействия электронов на изделие. Изменением скорости сварки можно регулировать скорость кристаллизации металла сварного шва и термическое воздействие на основной металл в околошовной зоне.

Таблица 1

Режимы электронно-лучевой сварки некоторых конструкционных материалов

Свариваемый металл	Толщина кромок, мм	Режим сварки			Ширина шва, мм
		Ускоряющее напряжение, кВ	Сила тока луча, А	Скорость сварки, м/ч	
Вольфрам	0,5	18...20	40...50	60	1,0
Вольфрам	1,0	20...22	75...80	50	1,5
Тантал	1,0	20...22	50	50	1,5
Сталь Х18Н9	1,5	18...20	50...60	60...70	2,0
Сталь Х18Н9	20	20...22	270	50	7,0
Сталь Х18Н9	35	20...22	500	20	7,0
Молибден+вольфрам	0,5+0,5	18...20	45...50	35...50	1,0

При электронно-лучевой сварке применяют типы соединений, традиционные для сварки плавлением, и новые, присущие только этому способу (рис. 2). Общие требования ко всем типам соединений – это высокая точность сборки деталей перед сваркой. Допустимые зазоры в свариваемых стыках не должны превышать 0,2 мм. При электронно-лучевой сварке требуется более тщательная очистка свариваемых кромок от различных загрязнений, особенно от органических веществ.

Воздействие электронного луча на жидкий металл приводит к микровзрывам в вакууме, в результате чего часть металла сварочной ванны разбрызгивается, поверхность шва становится неровной, в шве могут возникнуть дефекты.

Для электронно-лучевой сварки предпочтительны стыковые соединения, так как в этом случае удается получать узкие сварные швы с минимальной деформацией изделий. Сварка с отбортовкой кромок на телах вращения применяется чаще в приборостроении. Изделия, значительно различающиеся по толщине (например, приварка мембраны к корпусу), сваривают с предварительной обработкой кромки большей толщины для выравнивания температурного поля, что обеспечивает симметричное проплавление деталей. Соединения внахлестку широко применяют при сварке разнородных металлов, различающихся по температуре плавления. Электронный луч в этом случае смещают на более тугоплавкую кромку.

Возможность сварки в узких разделках и труднодоступных местах является одним из преимуществ электронно-лучевой сварки. Это достигается благодаря малым размерам сечения электронного луча и его автономности по отношению к свариваемому изделию. Однопроходная сварка нескольких расположенных друг над другом стыков может быть выполнена проникающим лучом, а в некоторых конструкциях соединение двух оболочек может быть осуществлено через ребро жесткости.

Также электронно-лучевой сварка - это один из видов сварки, направленный на снижение сварочных деформаций. Практически исследована усадка элементов сварной авиационной конструкции. Толщина конструкции - 48 мм, длина - 1500 мм, линейная усадка составляет 0,5 мм.

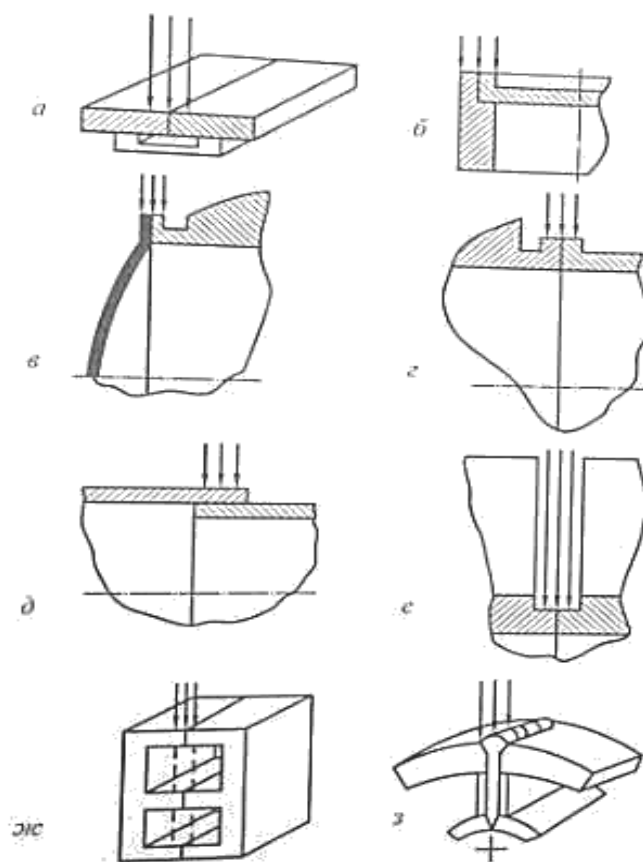


Рис. 2. Типы соединений:

а – встык тонколистовых деталей на подкладке и без нее; *б* – с отбортовкой кромок; *в, г* – с различной толщиной кромок; *д* – внахлест; *е* – в узких разделках и труднодоступных местах; *ж* – однопроводная сварка одновременно нескольких стыков проникающим лучом; *з* – сварка двух цилиндров электронным лучом через ребро жесткости

Основным узлом установки для электронно-лучевой сварки является электронно-лучевая пушка с системами электропитания и управления, формирующая электронный луч (рис. 3). Источником электронов в пушке является катод *1*, изготавливаемый из металлов с малым значением работы выхода электронов, допускающих нагрев до высокой температуры при сравнительно низкой скорости испарения. Наиболее полно этим требованиям отвечают вольфрам и тантал. В некоторых конструкциях сварочных пушек применяют катоды косвенного нагрева, изготовленные из лантаноборидных соединений (например, LaB6), нагреваемые специальным источником тепла. Они обладают лучшими эмиссионными характеристиками по сравнению с металлическими катодами.

Температура катода должна быть такой, чтобы сила тока эмиссии была несколько больше, чем сила тока электронного пучка. Для этого при фиксированном значении ускоряющего напряжения выбирается такая сила тока накала катода, дальнейшее повышение которой не приводит к заметному повышению силы тока луча.

Прикатодный электрод *2* и ускоряющий электрод (анод) *3* создают условия для электростатической фокусировки и разгона электронов под действием ускоряющего напряжения *U*. Расходящийся затем под действием кулоновских сил электронный луч *9* фокусируется магнитной линзой *б*, на фокусном расстоянии от которой размещается свариваемое изделие

8. Система отклонения электронного луча 7 состоит из четырех, реже шести, электромагнитов и служит для управления процессом сварки, настройки электронного луча на свариваемый стык, сообщения лучу колебательных движений по заданной программе.

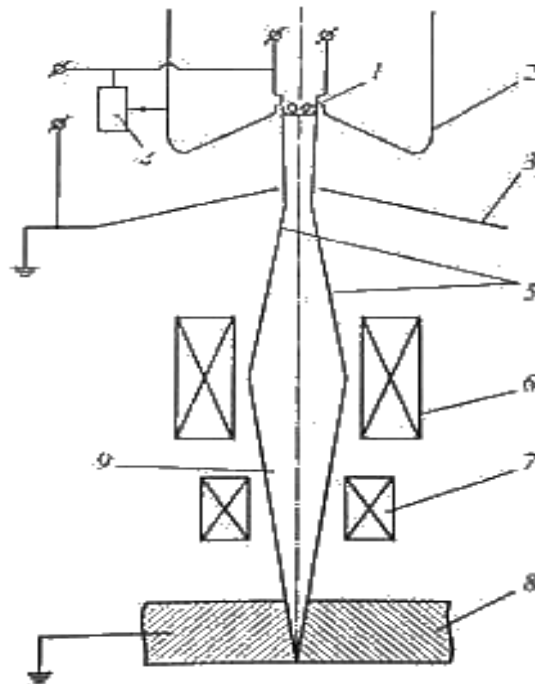


Рис. 3. Схема электроннолучевой пушки:

1 - катод; 2 - прикатодный электрод; 3 - ускоряющий электрод; 4 - потенционер электростатической фокусировки; 5 - траектория движения крайних электронов в луче; 6 - фокусирующая магнитная линза; 7 - система отклонения луча; 8 - свариваемое изделие; 9 - электронный луч

В сварочных установках (рис. 4) электронно-лучевая пушка, 1 соединенная с источником питания 2, встраивается в вакуумную камеру 5, изготавливаемую, как правило, из коррозионно-стойкой стали. Форма камеры и толщина ее стенок должны обеспечивать устойчивость камеры под действием атмосферного давления и надежную защиту сварщика от рентгеновского излучения. Размеры сварочной камеры определяются габаритами свариваемых изделий 5. Для загрузки и выгрузки изделий камеру оснащают крышкой-люком 4 с разъемными уплотнениями из вакуумной резины. Для наблюдения за настройкой электронного луча 6 на свариваемый стык и за процессом сварки камера снабжена смотровым окном 7. Внутреннюю поверхность камеры полируют для снижения количества остаточных газов. Вакуумная система установки состоит из высоковакуумного пароструйного насоса 8 форвакуумного механического насоса 9, системы трубопроводов и вентилях 11, а также приборов для контроля остаточного давления - вакуумметров. Вакуумная система должна поддерживать в рабочем объеме камеры разрежение $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

Для сварки крупногабаритных изделий имеются вакуумные сварочные камеры объемом в десятки кубических метров. По мере увеличения габаритов сварочных камер возрастает и время, необходимое для создания нужного разрежения. Кроме того, изготовление таких камер требует расхода большого количества дорогостоящих материалов, что значительно повышает стоимость установок. Поэтому ведутся интенсивные работы по созданию малогабаритных стационарных и передвижных вакуумных камер, обеспечивающих необходимое разрежение только в местах сварки. К большим достижениям при создании передвижных вакуумных сварочных камер следует отнести использование для подвижных вакуумных уплотнений ферромагнитных жидкостей, густеющих, даже твердеющих, под действием магнитного поля.

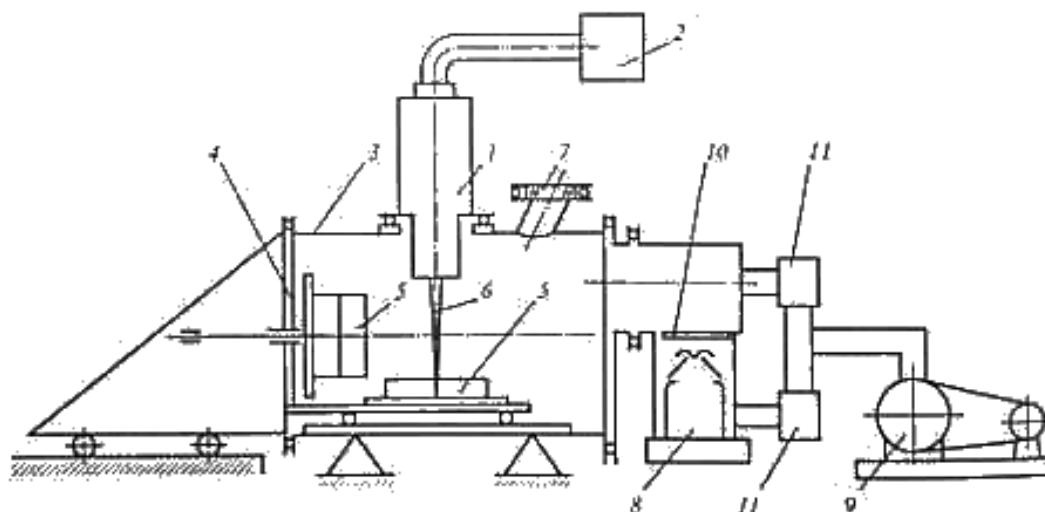


Рис. 4. Схема установки для электронно-лучевой сварки:

1 – электронно-лучевая пушка; 2 – источник питания; 3 – вакуумная камера; 4 – крышка-люк; 5 – свариваемые изделия; 6 – электронный луч; 7 – смотровое окно; 8 – высоковакуумный пароструйный насос; 9 – форвакуумный механический насос; 10 – заслонка; 11 – система трубопроводов и вентилей

Выводы

Технология электронно-лучевой сварки достигла новых высот, но развитие продолжается до сих пор. Электронно-лучевая сварка удовлетворяет потребности современных отраслей промышленности, таких как единичное производство, высокое качество авиационной промышленности, а также массового производства, ориентированного на автомобильную промышленность. Различные типы сварочных электронно-лучевых установок развивались в течение многих лет под влиянием рынка для удовлетворения конкретных потребностей как с технической, так и с экономической точек зрения. Электронно-лучевая сварка – это надежный процесс.

Электронно-лучевой сваркой можно выполнить соединения из таких материалов, как высоколегированные, низколегированные стали, алюминиевые, магниевые, никелевые сплавы, а также сплавы на основе кобальта.

Библиографический список

1. **Винокуров, В.А.** Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
2. **Назаренко, О.К.** Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, Е.И. Истомин, В.Е. Локшин. – М.: Машиностроение, 1985. – 127 с.

Дата поступления
в редакцию 09.02.2015

D. Yu. Shmelkov¹, A.I. Pozdyshev¹, E.A. Pigalova², N.A. Kurnikov²

ELECTRON-BEAM WELDING AS ONE OF THE TYPES OF WELDING AIMED AT REDUCING THE WELDING DEFORMATION

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev¹,
JSC NAP Sokol²

The article deals with problems of application of electron beam welding. Methods of equipment operation and connection types inherent to this welding mode are given.

Key words: electron beam welding, welded construction, electron beam.

УДК 658.512.22

И.Н. Фролова

РАЗМЕРНЫЕ СВЯЗИ И ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛУЖЕБНЫХ ФУНКЦИЙ ДЕТАЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексева

Рассмотрена классификация служебных функций поверхностей детали. Сформулирована последовательность простановки на чертежах деталей размеров, допусков формы и расположения, шероховатости. Показана возможность выявления служебных функций поверхностей детали по ее размерным связям и точностным характеристикам.

Ключевые слова: деталь, служебные функции, размерные связи, точностные характеристики.

Анализ различных источников [1-5] показывает, что выбор конструкторских и технологических баз основан на выявлении и анализе функционального (служебного) назначения поверхностей детали и установлении соответствующих размерных связей, определяющих точность положения одних поверхностей относительно других.

Служебные функции поверхностей детали используется технологом при проектировании технологического процесса механической обработки. В результате анализа чертежа определяются конструкторские базы детали, выявляются те поверхности детали и заготовки, которые могут быть использованы в качестве технологических баз. Наиболее рациональным считается использование конструкторских базующих поверхностей в качестве технологических баз.

Служебные функции детали

Любая деталь предназначена выполнять соответствующее служебное назначение посредством своих поверхностей. Следовательно, каждая поверхность детали предназначена выполнять определенную служебную функцию. Классификация поверхностей деталей по признаку служебного функционирования в конструкции узла или изделия представлена на рис. 1.

Свободная поверхность (СП) – не сопрягаемая с поверхностями других деталей. Все свободные поверхности являются связующими, то есть служат для объединения всех исполнительных поверхностей в единое пространство тело–деталь и придания детали нужных форм, размеров, технологичности, прочности, эстетичности.

Исполнительные поверхности (ИП) – поверхности, при помощи которых машина или отдельные ее механизмы выполняют свое служебное назначение. Исполнительные поверхности подразделяются на технологические и конструкторские.

Технологические поверхности, или поверхности технологического назначения (ПТН), предназначены для технологических целей и не влияют существенно ни на служебное назначение, ни на форму детали. К ним относятся:

- разделяющие ПТН - технологические канавки. Технологическая цель (функция) – разделение поверхностей с разной точностью во время обработки;
- базующие ПТН - центровые отверстия, технологические выточки и отверстия, технологические плоскости. Технологическая цель (функция) – базирование при обработке, то есть контакт с базовыми поверхностями приспособлений.

Конструкторские поверхности (КП) – поверхности, при помощи которых машина или отдельные ее механизмы выполняют свое служебное назначение, контактируя с поверхностями других деталей или с рабочей средой. Конструкторские поверхности: на рабочие и базующие.

Рабочие поверхности (РП) участвуют в осуществлении (исполнении) того или иного рабочего процесса машины.

Поверхности или заменяющие их сочетания поверхностей, относительно которых определяется положение других поверхностей детали, принято называть **базирующими поверхностями**, или **базами**. Для баз характерно определенное взаимное расположение, которое образует комплект баз.



Рис. 1. Классификация функций поверхностей деталей

Комплект баз – это совокупность баз, образующая систему координат (прямоугольную или цилиндрическую) для правильной и однозначной оценки точности расположения отдельных элементов детали или сборочной единицы в изделии.

Деталь может содержать несколько комплектов базирующих поверхностей (полных и неполных): один комплект базирующих поверхностей содержит основные базирующие поверхности, остальные комплекты содержат вспомогательные базирующие поверхности. Если в соответствии со служебным назначением или при обработке изделие должно быть неподвижным относительно выбранной системы координат, то необходим *полный комплект баз*. Если в соответствии со служебным назначением или при обработке изделие должно иметь определенное число степеней свободы, то часть связей снимается, образуя *неполный комплект баз*.

Основные базирующие поверхности (ОБП) – поверхности или заменяющие их сочетания поверхностей, при помощи которых деталь присоединяется к другим деталям машины и занимает в отношении их требуемое положение.

Вспомогательные базирующие поверхности (ВБП) – поверхности или заменяющие их сочетания поверхностей, при помощи которых деталь определяет положение всех других присоединяемых к ней деталей относительно своих основных баз.

По количеству лишаемых степеней свободы базы делятся на пять видов. Любая плоскость (поверхность, торец) может быть потенциальной установочной (У), направляющей (Н)

или опорной (О) базой, которые позволяют фиксировать три, две или одну степень свободы соответственно. Любая поверхность вращения является потенциальной двойной направляющей (ДН), двойной опорной (ДО) либо опорной (О) базой, которые позволяют фиксировать четыре, две или одну степень свободы соответственно.

В каждом комплекте баз существует главная база комплекта. **Главная база** – база, удовлетворяющая двум условиям [6]:

- 1) заготовка, установленная на одну эту базу, имеет наиболее устойчивое положение;
- 2) главная база лишает заготовку наибольшего числа степеней свободы.

Только установочная база отвечает обоим условиям (безусловно). Второму условию удовлетворяет также двойная направляющая база, которая в большинстве случаев удовлетворяет и первому условию. Таким образом, в качестве главной базы комплекта баз может выступать установочная или двойная направляющая базы. В неполных комплектах баз обязательно присутствует главная база.

Наложение размерных связей и точностных характеристик на поверхности детали

Чтобы деталь могла выполнять свое служебное назначение, она должна иметь соответствующий набор рабочих и базирующих поверхностей, на которые конструктор назначил определенные сочетания покрытий, размерно-точностных и прочностных параметров.

Положение РП и ВБП детали определяется относительно ОБП. Для этого вспомогательные базы и рабочие поверхности (передающие движение, режущие и др.) должны быть связаны с ОБП расстояниями (размерами) и поворотами, (то есть, допусками расположения).

При проектировании чертежа конструктор выполняет анализ сборочного узла и конструкции детали, и на основе этого анализа решает прямую задачу функционально-точностной зависимости: все служебные функции поверхностей отражает на чертеже через размерные связи и точностные характеристики поверхностей детали по следующим правилам.

1. Проставляет на сопрягаемые поверхности посадочные размеры с допусками. На базирующие ПТН обычно также назначают поля допусков по посадкам, требуемым при технологическом базировании.
2. Определяет поверхности, выполняющие функцию комплекта ОБП, выявляет главную базу комплекта ОБП.
3. Определяет количество комплектов ВБП и поверхности, выполняющие функции каждого комплекта ВБП, выявляет главные базы комплектов ВБП.
4. Проставляет допуски расположения на поверхности, выполняющие функции баз:
 - *Простановка допусков расположения в комплекте ОБП.* Главная база в комплекте ОБП назначается измерительной базой для допусков расположения на чертеже (3D-модели). На эту поверхность допуск расположения не назначается, поверхность является измерительной базой - началом отсчета погрешностей расположения в детали. Измерительную базу допусков расположения обозначают специальным символом. Остальные базы основного комплекта должны быть завязаны допуском расположения на измерительную базу. Количество координатных направлений определяется комплектом ОБП;
 - *Простановка допусков расположения в комплекте ВБП.* Все главные базы вспомогательных комплектов конструкторских баз должны быть завязаны допуском расположения на измерительную базу – безусловно. Остальные базы вспомогательных комплектов завязываются: а) допуском расположения на измерительную базу – главную базу ОБП (первоначальный вариант); б) допуском расположения на главную базу собственного ВБП (если допуск расположения, завязанный на главную базу ОБП, неудобно измерять).
5. Проставляет допуски расположения на рабочие поверхности (РП) детали. Рабочие поверхности детали (по своему качеству и уровню относительной геометрической точности) завязываются допуском расположения с измерительной базой – главной базой ОБП.

6. Проставляет допуски расположения на базирующие ПТН - поверхности технологического назначения. Обычно в технических требованиях чертежа имеются указания о технологическом применении таких поверхностей. Все базирующие ПТН (по своему качеству и уровню относительной геометрической точности) должны быть завязаны допуском расположения на измерительную базу – главную базу ОБП.

7. Проставляет размеры. Все ВБП, РП, ПТН, СП должны быть связаны размерами с базами ОБП по соответствующим направлениям, при этом один из размеров в каждом направлении должен быть габаритным. Поля допусков или отклонения на размеры проставляются по результатам расчетов конструкторских размерных цепей для обеспечения точности сборки.

8. Проставляет допуски формы. На любую измерительную базу допусков расположения, обозначенную специальным символом на чертеже, назначается допуск формы. Посадочные поверхности и базирующие ПТН, имеющие требования по полноте контакта в сопряжении, ограничиваются допуском формы по своему качеству и уровню относительной геометрической точности. Каждую базовую поверхность следует считать поверхностью с повышенными требованиями по полноте контакта.

9. Проставляет шероховатость. На все поверхности, имеющие ограничения по допускам формы и расположения, а также на измерительную базу допусков расположения, назначается шероховатость.

Технологическое использование размерных связей и точностных характеристик детали

При проектировании технологического процесса механической обработки технолог на первом этапе выполняет анализ чертежа (3D-модели) и выявляет служебные функции поверхностей детали с целью точности шероховатости поверхностей, проверяет полноту заданных размерных связей детали.

Служебные функции поверхностей для технологического проектирования выявляют несколькими путями:

- по чертежам сборочной единицы (машины), в состав которой входит рассматриваемая деталь;
- сравнением конструкции рассматриваемой детали с предварительно разработанными каталогами и классификаторами служебных или функциональных модулей.

Использование каталогов и классификаторов служебных или функциональных модулей заключается в том, что для этих модулей, как и для деталей-аналогов, заранее составлены технологические регламенты или технологические процессы, применяемые в качестве шаблона при проектировании техпроцесса на рассматриваемую деталь.

Возможность прямого проектирования структуры технологического процесса механической обработки без применения техпроцессов на детали-аналоги показана в работе [7]. Однако и в этом случае необходимо выявлять служебные функции поверхностей детали. Для выявления служебных функций детали применительно к технологическому проектированию анализировать сборочный чертеж не обязательно. Достаточно провести анализ чертежа детали на предмет выявления исполнительных поверхностей и основных конструкторских баз.

Сформулируем обратную задачу функционально-точностной зависимости. В обратной задаче по размерным связям и точностным характеристикам требуется выявить служебные функции поверхностей детали. Решается эта задача следующим образом:

- все поверхности детали, имеющие на чертеже (3D-модели) указанные допуски расположения или обозначенные как измерительные базы для допусков расположения, в сборке имеют контакт с другими деталями или с рабочей средой, то есть являются **исполнительными** поверхностями.
- основные конструкторские базы детали к чертежу детали выявляются достаточно

просто: от ОБП проставлено наибольшее количество размеров, главная база в комплекте ОБП служит измерительной базой для всех (или для наибольшего количества) допусков расположения.

Библиографический список

1. **Базров, Б.М.** Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. **Дунаев, П.Ф.** Расчет допусков размеров / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 304 с.
3. **Колесов, И.М.** Основы технологии машиностроения: учебник для машиностроительных спец. вузов / И.М. Колесов. – 3-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2001. – 591 с.
4. Технология машиностроения (специальная часть): учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.А. Гусев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
5. Технология машиностроения: в 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения: учеб. пособие для вузов / Э.Л. Жуков [и др.]; под ред. С.Л. Мурашкина. – М.: Высш. шк., 2003. – 278 с.
6. **Аверченков, В.И.** Автоматизация проектирования приспособлений: учеб. пособие / В.И. Аверченков, В.Б. Ильицкий. – Брянск: БИТМ, 1989 – 174 с.
7. Автоматизированное создание структуры технологического процесса: монография / О.И. Кутилова [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева., 2011. – 183 с.

*Дата поступления
в редакцию 09.02.2015*

I.N. Frolova

DIMENSIONAL COMMUNICATIONS AND ACCURACY CHARACTERISTICS OF THE UTILITY FUNCTIONS DETAILS

Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The classification of utility functions of the part surface is studied. The order of notation of sizes, tolerance and roughness on parts drawings is formulated. The possibility of determining utility functions of parts surface based on their dimensional connections and precision characteristics is shown.

Key words: part, utility functions, dimensional connections, precision characteristics.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

**В.Е. Бородина, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, Е.Н. Полозкова,
А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов**

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖКАССЕТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ МЕЖДУ СОСЕДНИМИ ТВСА–12 PLUS АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведены экспериментальные исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–12 PLUS реактора ВВЭР. Выявлены особенности течения потока теплоносителя при межкассетном взаимодействии между соседними кассетами ТВСА.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, межъячеечный массообмен, межкассетное взаимодействие, дистанционирующие и перемешивающие решетки.

Введение

Тенденции развития ядерной отрасли Российской Федерации диктуют необходимость создания энергоблоков, способных на максимально эффективное производство электроэнергии при условии гарантированной безопасности. Необходимо постепенно и поэтапно модернизировать отдельные элементы реакторной установки, а также повышать их технологические и эксплуатационные параметры.

В ОАО «ОКБМ Африкантов» на протяжении многих лет проводятся работы по усовершенствованию конструкций активных зон водо-водяных ядерных реакторов в целом так и тепловыделяющих сборок (ТВС). Работы в этом направлении ведутся для решения следующих основных задач: реализации безопасных и экономически эффективных топливных циклов, повышения эксплуатационного ресурса активных зон, обеспечения геометрической стабильности конструкции ТВС и повышения их эксплуатационной надежности [1].

Одно из перспективных направлений решения поставленных задач – улучшение теплогидравлических характеристик ТВС. С этой целью была создана ТВСА-12 PLUS, которая характеризуется оптимизированным размещением дистанционирующих решеток (ДР) и применением перемешивающих решеток (ПР) с размещением дефлекторов по схеме «порядная прогонка» [2].

Поскольку ТВСА-12 PLUS является бесчехловой, то перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними топливными сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе оценки и обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР, что обусловило необходимость проведения комплекса исследований закономерностей перераспределения теплоносителя при межкассетном взаимодействии между двумя кассетами ТВСА [3].

Экспериментальный стенд

Для исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР в НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух [4]. В состав

стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, система подачи и отбора трассера, измерительный комплекс.

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА-12 PLUS и межкассетное пространство. Выполнена ЭМ с соблюдением полного геометрического подобия и состоит из шестигранного чехла, 94 твэлов-имитаторов, уголков жесткости, поясов дистанционирующих и перемешивающих решеток.

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, расходомер газа, ЭВМ с программным обеспечением, трубка Пито-Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления.

Измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси осуществлялось газоанализатором. Принцип измерения C_nH_m основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения. Диапазон измеряемых концентраций 0 – 10000 ppm, погрешности измерений с учетом индивидуальной градуировки равны ± 15 ppm (0 – 1000 ppm) и $\pm 1,5\%$ (1000 – 10000 ppm) [5].

Поддержание заданного расхода газа-трассера осуществлялось массовым расходомером, позволяющим измерять и регулировать потоки газов. Погрешность составляла не более 0,5%.

Отбор проб трассера в газоанализатор осуществлялся с помощью отборного зонда выполненного в виде трубки Пито-Прандтля, с помощью которого также можно определить значение осевой скорости потока. Снятие показаний с трубки Пито-Прандтля производилось блоком аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составляет $\pm 0,25\%$.

Методика исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР

Для изучения межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР применяется метод диффузии примесей [6]. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами и не приводит к искажению картины течения теплоносителя.

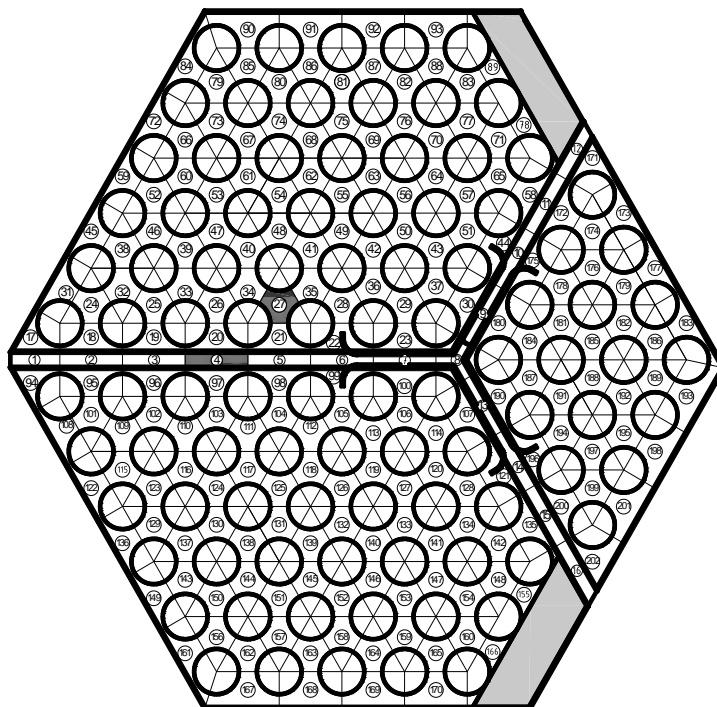


Рис. 1. Поперечное сечение ЭМ

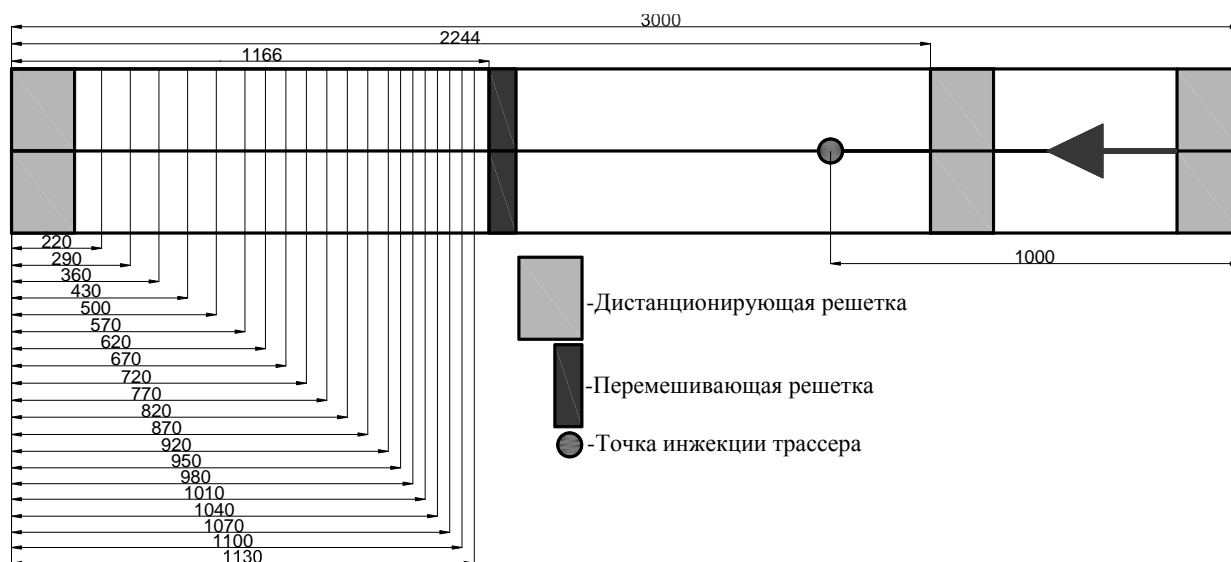


Рис. 2. Продольное сечение ЭМ

Методика проведения исследований локального массообмена теплоносителя заключалась в следующем: газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную ячейку ЭМ до пояса ПР по ходу течения потока теплоносителя (рис. 1); с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за исследуемым поясом ПР в характерных сечениях по длине ЭМ (рис. 2); затем на основе полученных данных строились картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ. По полученным картограммам и графикам была выявлена картина течения потока.

Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА-12 PLUS

Комплексный анализ результатов экспериментальных исследований межкассетного взаимодействия между соседними ТВСА-12 PLUS при подаче трассера в межкассетный зазор позволил заключить следующее:

1. В области межкассетного зазора происходит процесс вытеснения части потока теплоносителя из-под уголков жесткости (рис. 3).

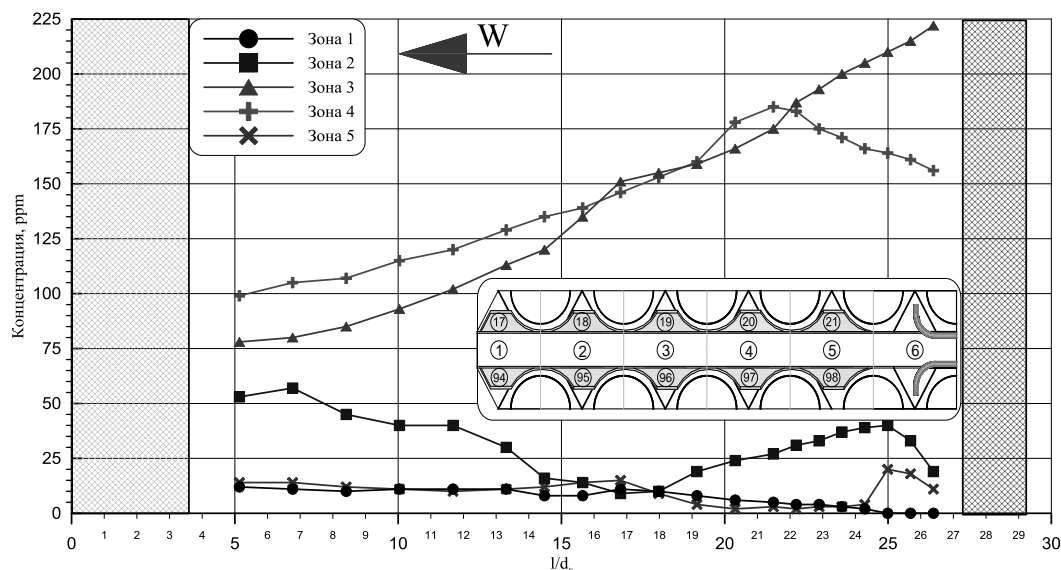


Рис. 3. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ для ячеек № 1, 2, 3, 4, 5 при подаче трассера в межкассетный зазор ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

2. В области периферийного ряда твэлов, прилежащей к межкассетному зазору, на движение потока теплоносителя, помимо дефлекторов, оказывают влияние зубчатые края обода ПР. Интенсивность массообменных процессов в области периферийного ряда твэлов кассет выше в тех ячейках, где ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатых краев обода ПР совпадает (рис. 4).

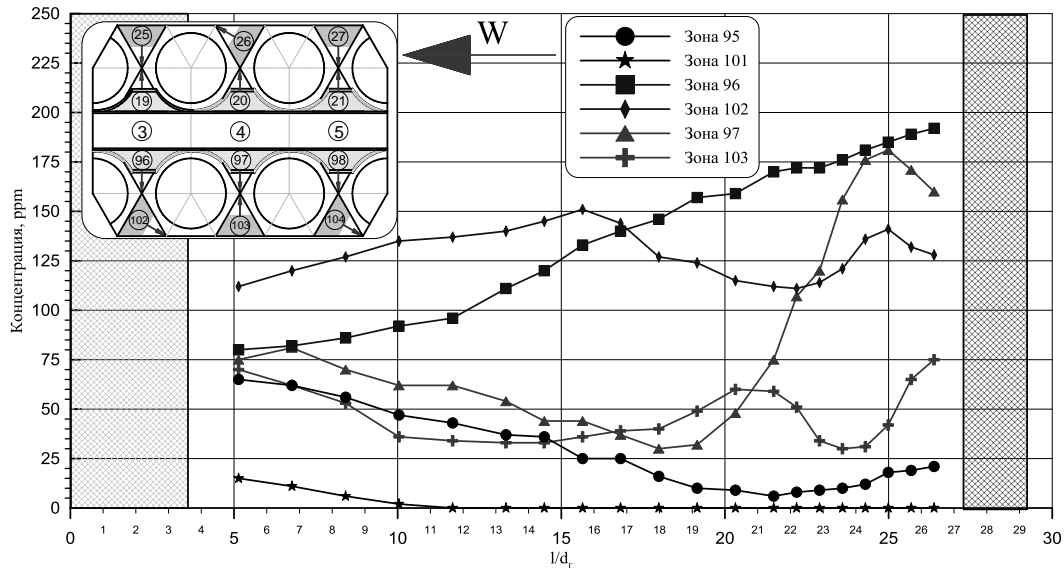


Рис. 4. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ для ячеек № 95, 101, 96, 102, 97, 103 при подаче трассера в межкассетный зазор ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

3. Определено, что перераспределение потока теплоносителя из области межкассетного зазора в соседние ТВСА-12 PLUS охватывает два периферийных ряда твэлов (рис. 5).

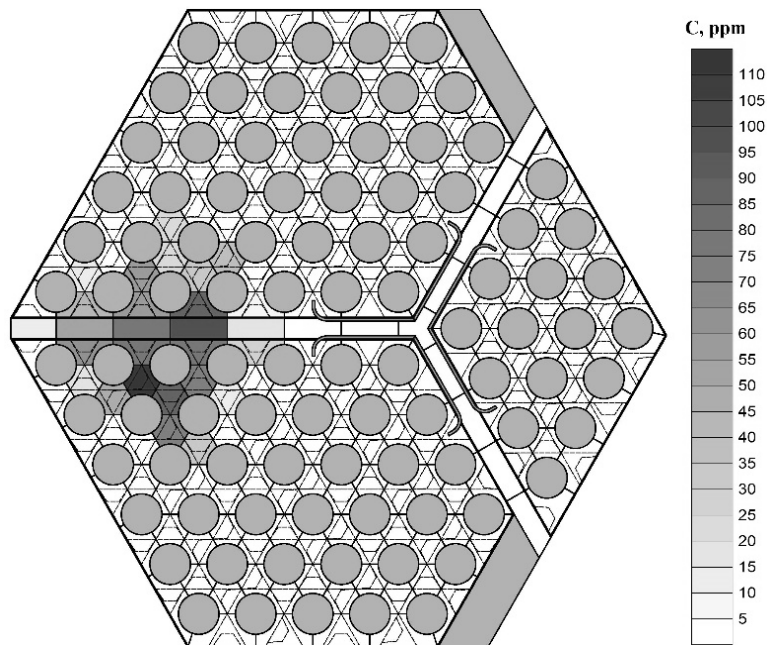


Рис. 5. Распределение концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера в межкассетный зазор ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

Анализ результатов исследований межкассетного взаимодействия между соседними ТВСА-12 PLUS при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты позволил заключить следующее:

1. Трассер из зоны подачи распространился в соседнюю кассету ТВСА-12 PLUS, охватив два периферийных ряда твэлов (рис. 6). Данный факт говорит о "существенном" перераспределении теплоносителя при межкассетном взаимодействии между двумя ТВСА-12 PLUS.

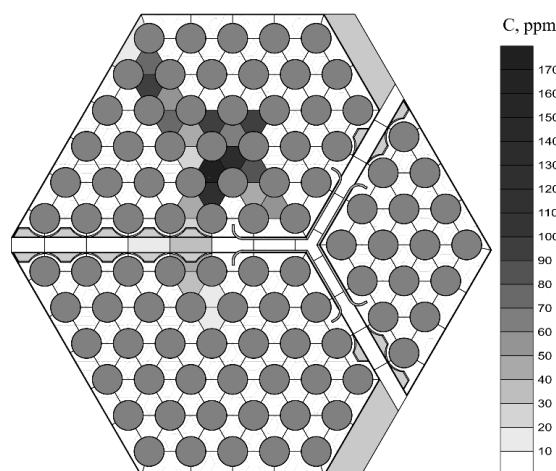


Рис. 6. Распределение концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

2. В области периферийного ряда твэлов ТВСА-12 PLUS наблюдается направленное внутрь кассеты движение потока теплоносителя, обусловленное соответствующим расположением зубчатых краев обода ПР. Данное явление негативно сказывается на интенсивности межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними кассетами ТВСА-12 PLUS (рис. 7).

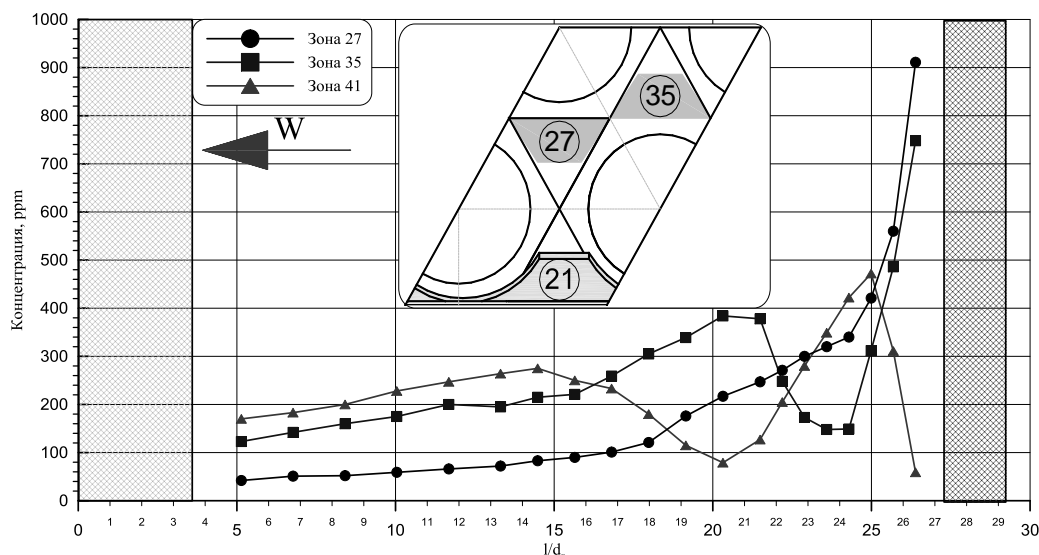


Рис. 7. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ для ячеек № 27, 35, 21 при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

3. Анализ распределения расхода теплоносителя проводился в области межкассетного зазора и периферийного ряда твэлов кассет ТВСА-12 PLUS. Определяя осевую скорость и, учитывая площадь проходного сечения ячеек, были рассчитаны расходы теплоносителя через ячейки выбранной области.

В конструкции ПР ТВСА-12 PLUS имеется два варианта взаимного расположения дефлектора и зубчатого края обода ПР (рис. 8), которые организуют течение потока теплоносителя в области межкассетного зазора.

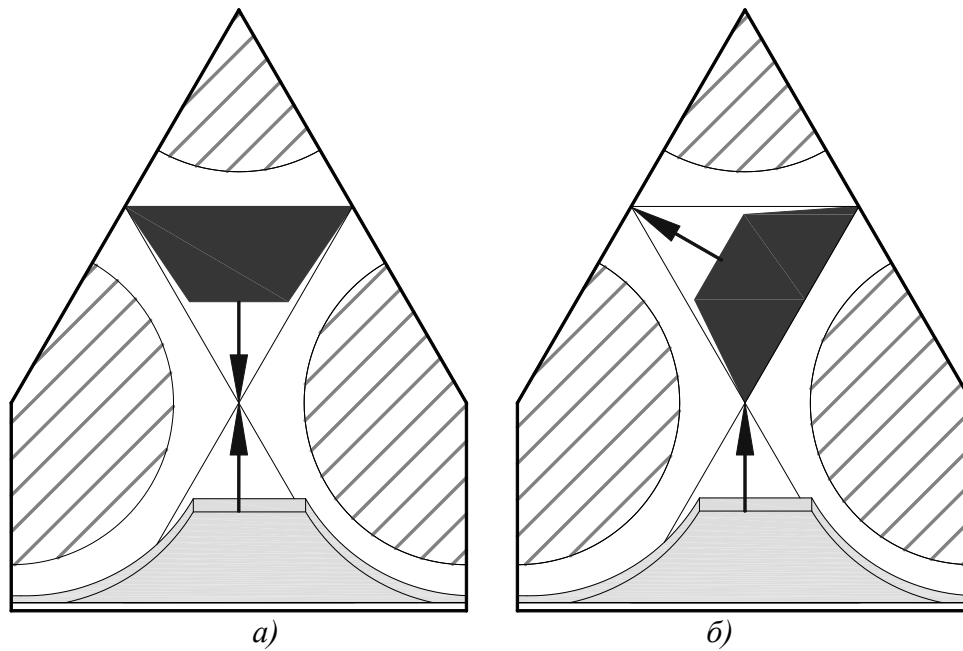


Рис. 8. Участки периферийной области кассеты TBСA-12 PLUS с различным взаимным расположением дефлектора и зубчатых краев обода ПР:
 а – область противоположным расположением дефлектора и края обода ПР;
 б – с сонаправленным расположением дефлектора и края обода ПР

Анализ распределения расходов теплоносителя через ячейки области межкассетного зазора позволил заключить следующее:

1. В области периферийного ряда твэлов кассеты TBСA-12 PLUS с противоположным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается уменьшение расхода теплоносителя на 10% (рис. 9).
2. В области периферийного ряда твэлов кассеты TBСA-12 PLUS с сонаправленным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается увеличение расхода теплоносителя на 10% (рис. 10).

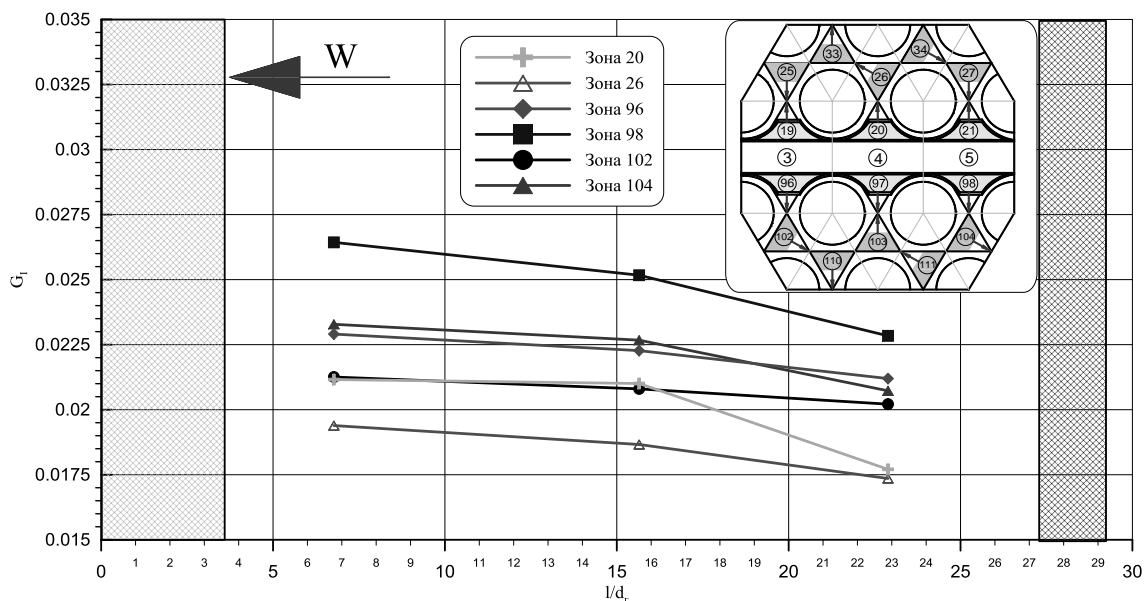


Рис. 9. Распределение расхода теплоносителя через ячейки №20, 26, 96, 98, 102, 104 верхней кассеты TBСA-12 PLUS ($w=28,16$ м/с, $Re=80100$)

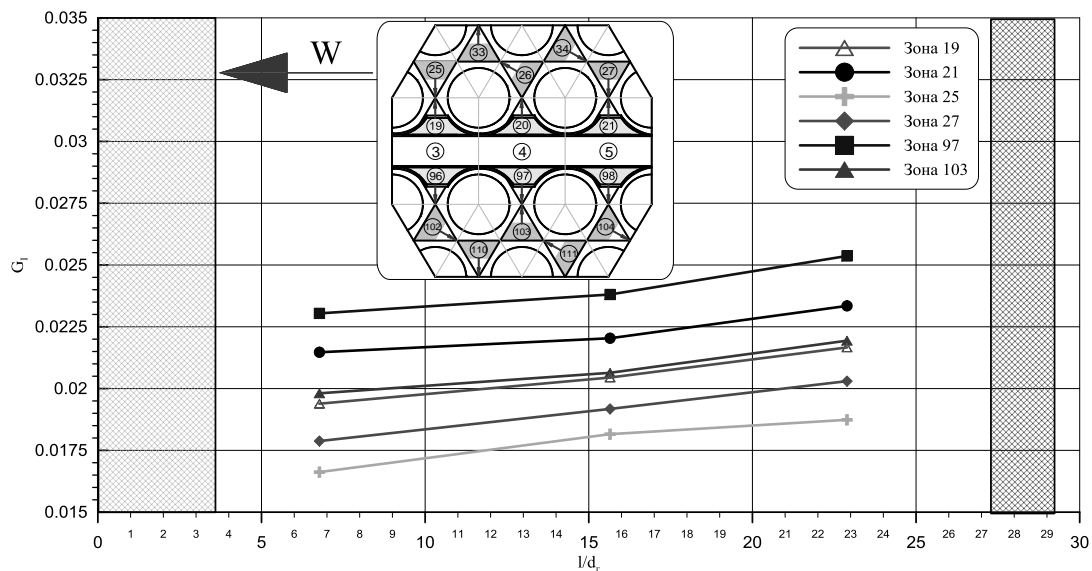


Рис. 10. Распределение расхода теплоносителя через ячейки №19, 21, 25, 27, 97, 103 верхней кассеты ТВСА-12 PLUS ($\bar{w}=28,16$ м/с, $Re=80100$)

Выводы

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА-12 PLUS сделаны следующие выводы:

1. В области периферийного ряда твэлов кассет ТВСА-12 PLUS наблюдается направленное движение потока теплоносителя, обусловленное соответствующим расположением зубчатых краев обода перемешивающей решетки.

2. Интенсивность массообменных процессов в области периферийного ряда твэлов кассет выше в тех ячейках, где ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатых краев обода перемешивающей решетки совпадает.

3. В области межкассетного зазора происходит вытеснение части потока теплоносителя из-под уголков жесткости кассет ТВСА-12 PLUS.

4. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора в соседние ТВСА-12 PLUS охватывает область двух периферийных рядов твэлов.

5. В межкассетном зазоре аксиальная составляющая вектора скорости на 10–15% больше аксиальной составляющей вектора скорости в стандартной ячейке.

6. В области периферийного ряда твэлов кассеты ТВСА-12 PLUS с противоположным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается уменьшение расхода теплоносителя на 10%, а в областях с сонаправленным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наоборот.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение. 2013.
2. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 5. С. 252–257.

3. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / А.А. Баринов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2. С. 98–108.
4. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / А.В. Варенцов [и др.] // Теплоэнергетика. 2014. №8. С. 20–27.
5. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5. Вып. 3. С. 98–107.
6. **Жуков, А.В.** Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса / А.В. Жуков, Н.М. Матюхин, А.П. Сорокин. – М.: Энергоатомиздат. 1989.

*Дата поступления
в редакцию 10.02.2012*

**V.E. Borodina, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, E.N. Polozkova, A.N. Pronin,
A.E. Khrobostov**

RESEARCHES OF INTERASSEMBLY INTERACTION OF COOLANT BETWEEN NEIGHBOURING TVSA-12 PLUS OF WWER-1000 REACTOR CORE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The main aim of research was to expose characteristics of interassembly interaction of coolant flow in fuel assemblies of the TVSA-12 PLUS.

Design/methodology/approach: The main method of hydrodynamics and mass transfer in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of scale cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands. For the local characteristics of intercellular mass transfer and hydrodynamics of the heat carrier in the TVSA-12 PLUS research the gas diffusion method was used.

Findings: Experimental researches of heat carrier's hydrodynamics and mass transfer in the experimental model were organized. The features of interassembly interaction of coolant flow in fuel assemblies of the TVSA-12 PLUS were revealed.

Research limitations/implications: The obtained experimental information has been generalized, and a data bank for verifying CDF codes and computer programs for cell-wise calculations for reactor cores with FA has been established. Investigations results are used to specify local hydrodynamics and mass transfer characteristics of coolant flow when assessing heat engineering reliability of WWER reactor core.

Originality/value: Topically of this article is in heat carrier mass transfer research in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the WWER-1000 reactor active zone.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, intercell mass transfer, interassembly interaction, spacing grid, mixing grid.

УДК 621.039

А.В. Безносков, П.А. Боков, А.Д. Зудин, А.В. Львов, Т.А. Бокова, Н.В. Трушков

**ГИДРОДИНАМИКА И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ГЦН БРЕСТ-ОД-300
В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ НА СТЕНДЕ ФТ-4 НГТУ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследовательских испытаний на стенде ФТ-4А, целью которых являлось предварительное определение работоспособности проточной части осевого насоса с подшипниковым узлом.

Ключевые слова: главный циркуляционный насос, напор, расход, осевое колесо, свинцовый теплоноситель, модель.

В НГТУ проводились исследовательские испытания и отработка моделей проточной части ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300 с осевыми рабочими колесами на стендах ФТ-4А НГТУ и ФТ-4 НГТУ.

Тяжелые жидкометаллические теплоносители (Pb, эвтектика Pb-Bi) по своим физическим свойствам существенно отличаются от традиционных теплоносителей (H₂O, Na). Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования, а также опыт создания ГЦН РУ АПЛ проектов 705 и 705К со свинец-висмутовым теплоносителем показывают, что существующие традиционные методы расчетов насосов непригодны для расчета насосов, перекачивающих ТЖМТ [1].

Испытания на стенде ФТ-4А

Целью исследовательских испытаний на стенде ФТ-4А являлось предварительное определение работоспособности проточной части осевого насоса с подшипниковым узлом.

Условия испытаний: рабочее колесо диаметром $\varnothing 220$ мм; температура свинцового теплоносителя $T = 420\text{--}550^\circ\text{C}$; подача насоса ок. 100 т/ч (расч.), напор ок. 2,0 м столба Pb; скорость вращения вала до 1200 об/мин; окружная скорость до 12 м/с; давление на входе в рабочее колесо ок. 0,05 МПа (ок. 0,5 кгс/см² (атм.)).

Какой-либо опыт создания и эксплуатации осевых насосов, перекачивающих высокотемпературные ТЖМТ, в мире отсутствовал. Испытания рассматривались как предварительные, поэтому рабочее колесо было выполнено из стали 3, обладающей невысокими характеристиками стойкости в рассматриваемых условиях.

На рис. 1 представлена схема циркуляции теплоносителя в экспериментальном стенде при вращении осевого колеса, а на рис. 2 – фотография экспериментального участка стенда ФТ-4А.

Циркуляция свинцового теплоносителя в каналах стенда осуществляется следующим образом. При вращении вала осевое колесо подает свинцовый теплоноситель снизу – вверх в выпрямляющий аппарат. Выйдя из выпрямляющего аппарата основной поток теплоносителя поднимается вверх до крышки емкости, затем поворачивает на 180°C и опускается на вход рабочего колеса. Расчетные параметры циркуляционного потока высокотемпературного (400–550^oC) потока свинцового теплоносителя при $n = 1200$ об/мин – подача – 1000 – 1200 т/ч, напор – ок. 1,5 м ст.свинца, давление на входе в рабочее колесо 0,08-0,05 МПа (0,8–0,5 кгс/см² (ата)). Часть потока с относительно небольшим расходом (ок. 0,5-0,8 т/ч) поступает в гидростатический подшипник.

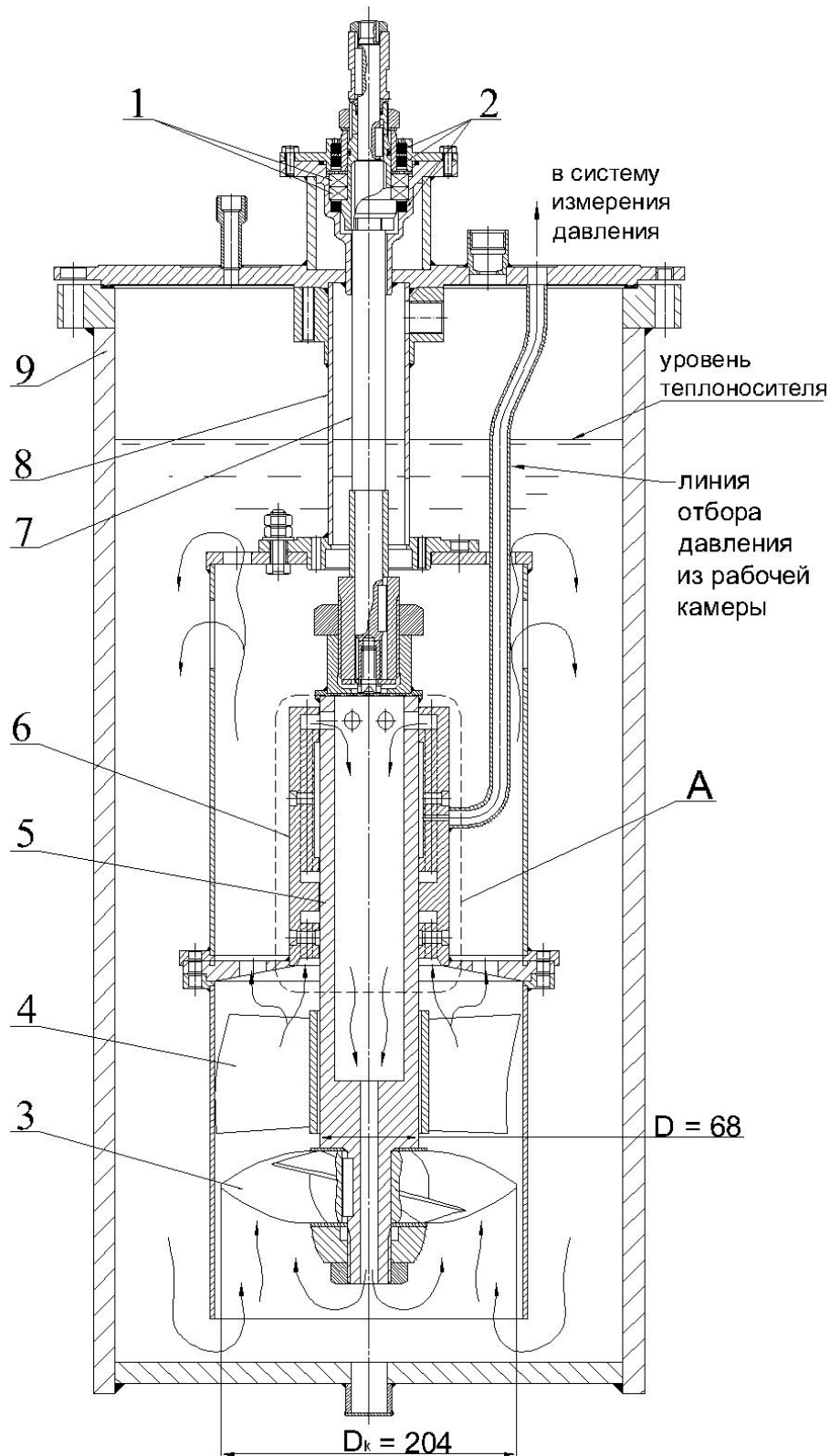


Рис. 1. Схема циркуляции теплоносителя в экспериментальном участке:
 1 – верхний подшипниковый узел; 2 – узел уплотнения по газу; 3 – осевое колесо;
 4 – спрямляющий аппарат; 5 – имитатор вала ГЦН; 6 – корпус подшипника;
 7 – вал; 8 – корпус выемной части; 9 – емкость с ТЖМТ



Рис. 2. Фото экспериментального участка (выемной части) стенда ФТ-4А

Результаты испытаний на стенде ФТ-4А

В первой серии исследований емкость заполнялась водой при температуре 20-25°C при атмосферном давлении (рис. 1). Скорость вращения осевого колеса составляла 300, 500, 750, 1000, 1200 и 1500 об/мин. Время испытаний на каждом режиме для проведения необходимых замеров – около 1 ч.

Во второй серии исследований (5 циклов) емкость (рис. 1) разогревалась до температуры 450-470 °С, заполнялась свинцом, проводился режим формирования оксидных покрытий на сталях в емкости и испытания при скорости вращения осевого колеса 300, 500, 750, 1000 и 1200 об/мин. Время испытаний на каждом режиме – ок. 1 ч при активности O_2 $a=10^{-1} - 10^0$.

В третьей серии (25 циклов) из-за отсутствия системы принудительного теплоотвода от свинца исследования проводились циклами. В состав цикла входили:

- работа насоса в течение 20-40 мин с увеличением температуры от 420 до 550 °С за счет адиабатического подвода тепла;
- останов насоса и естественное расхолаживание теплоносителя до 420 °С;
- включение и работа насоса в течение 20-40 мин с увеличением температуры от 420 до 550 °С.

В четвертой серии исследования проводились в режимах, аналогичных второму этапу, но при термодинамической активности O_2 в свинце $a=10^{-4} - 10^{-3}$.

• В пятой серии исследования проводились в режимах, аналогичных второму этапу, но при термодинамической активности O_2 в свинце $a=10^{-5} - 10^{-3}$. Общее число циклов за время исследований - 60 и суммарная продолжительность испытаний – ок. 80 ч.

После третьего этапа испытаний была проведена ревизия стенда, которая показала следующее:

- лопатки осевого колеса из низкокачественной стали 3 (для провоцирования износа при испытаниях) покрыты защитными оксидными покрытиями черного цвета;
- следы эрозионного износа поверхностей отсутствуют;
- зафиксировано замятие 2-4 мм периферийных кромок лопаток (рис. 3) по ходу потока;

возможной причиной является то, что толщина лопатки в данном сечении 1 мм и менее и низкие прочностные характеристики стали 3 при температуре 550 °С;

- следы эрозионного износа лопаток из выправляющего аппарата из стали 08Х18Н10Т-отсутствуют (рис. 4).

После ревизии загнутые периферийные участки были удалены. После четвертой и пятой серий исследований состояние поверхностей проточной части насоса не изменилось. Какие-либо следы кавитационного износа после всех испытаний – отсутствовали. Изменения акустических характеристик, аналогичных кавитационным, отсутствовали.

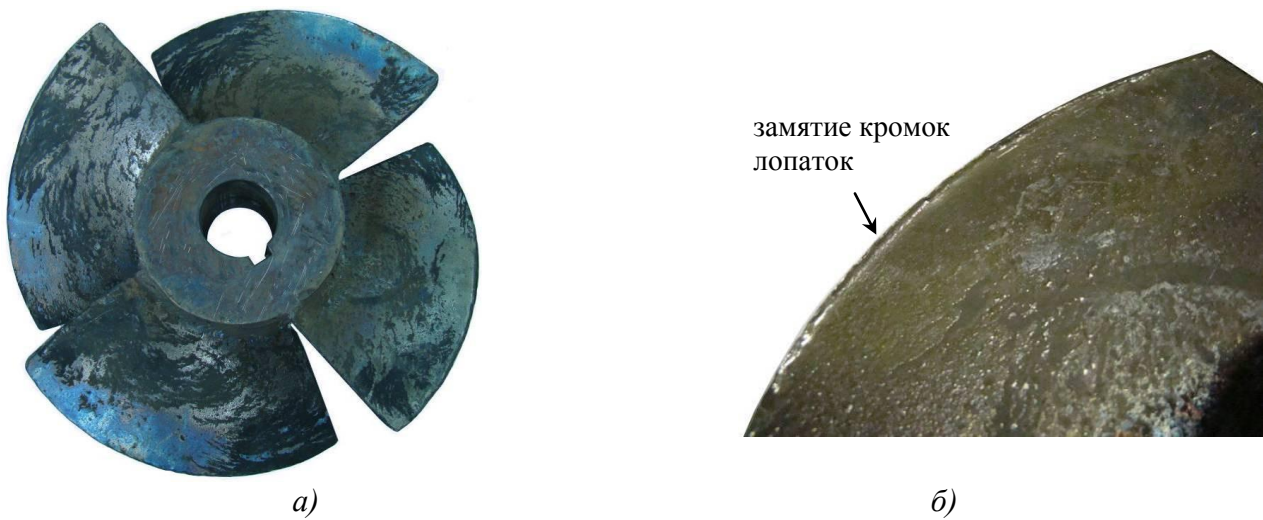


Рис. 3. Осевое колесо после третьего этапа:
а – осевое колесо; б – лопатка осевого колеса с замятым краем



Рис. 4. Спрямляющий аппарат
а – до испытаний; б – после испытаний на свинце после третьего этапа

Во всех сериях испытаний (на воде и на свинце) во всех режимах производилось фиксирование нагрузки (тока) на электродвигатель: на воде $N=7,8\text{кВт}$, $n_{\text{ном}}=1455\text{об/мин}$; на свинце $N=45\text{кВт}$, $n_{\text{ном}}=2960\text{об/мин}$. Не зафиксированы изменения нагрузки на электроприводе насоса, соответствующие признакам возникновения развитой кавитации в среде свинцового теплоносителя.

Проведенные исследования подтвердили принципиальную возможность создания осевого насоса, включающего гидростатический подшипник. Дальнейшие исследования кавитационных характеристик проточных частей осевых насосов конструкций НГТУ и ЦКБМ проводились на стенде ФТ-4 НГТУ.

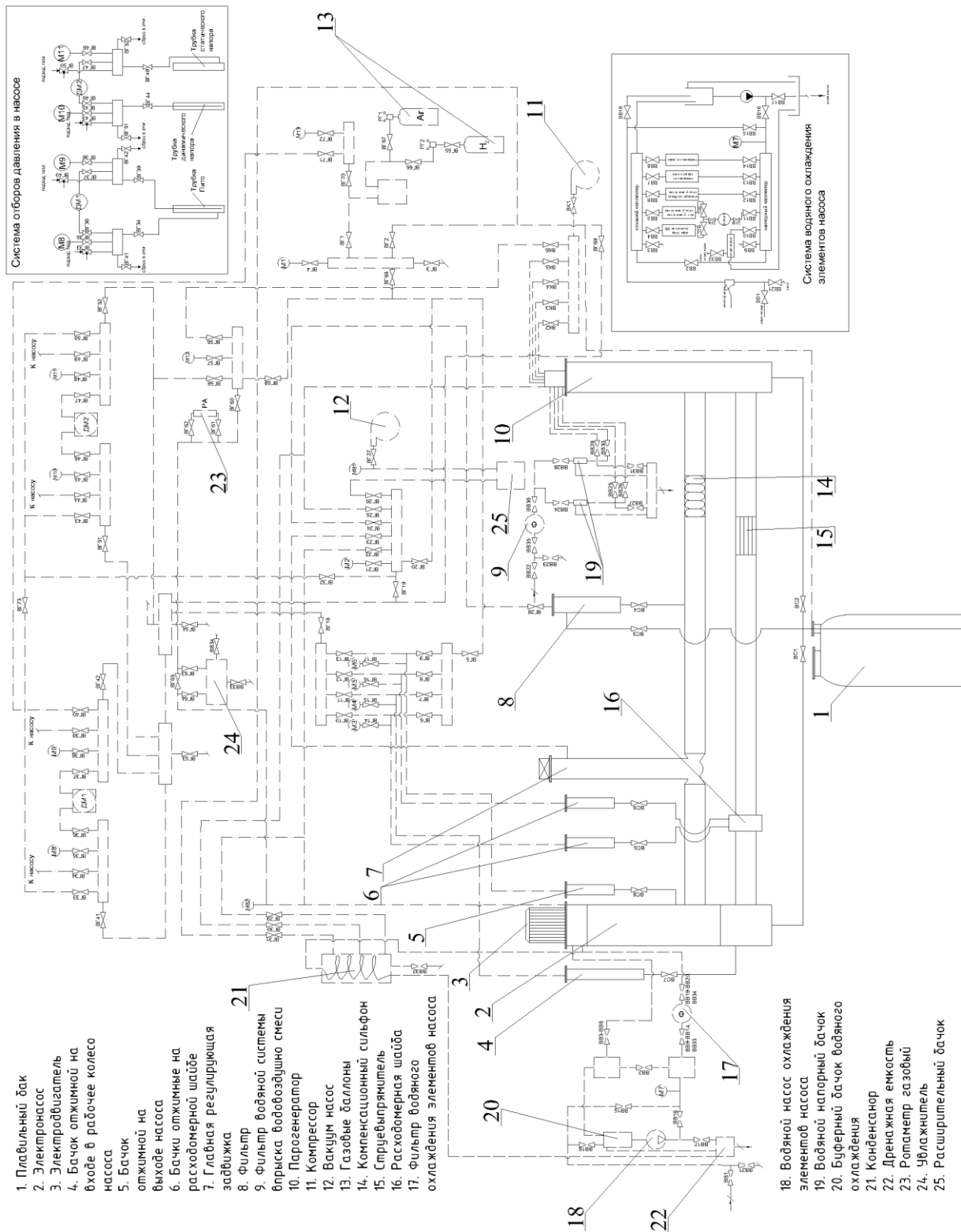


Рис. 5. Характеристика стенда ФТ-4НПТУ

Основные характеристики стенда ФТ-4 НГТУ (рис. 5)

1. Теплоноситель – расплав свинца марки С0 ГОСТ 3778-98.
2. Масса теплоносителя 1×10^4 кг.
3. Температура свинцового теплоносителя 450 – 500 °С, кратковременно 550°С.
4. Расход теплоносителя максимальный до $2,0 \cdot 10^3$ кг/ч (до $200 \text{ м}^3/\text{ч}$).
5. Термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе 10-5-10-4 до 100 плюс твердая фаза оксидов свинца.
6. Привод электронасоса – электродвигатель асинхронный, 2 шт., $n_{\text{ном}}=1500$ об/мин и 3000 об/мин, $N_{\text{ном}}$ до 50 кВт, с частотным регулированием скорости вращения.
7. Мощность электронагревательных спиралей стенд, суммарная до 100 кВт, напряжение 380/220 В.
8. Подшипник скольжения электронасоса контура свинцового теплоносителя на первом этапе – гидростатический щелевого типа.
9. Рабочее колесо и выпрямляющий аппарат сменные, 2 компонента ЦКБМ и 2 компонента НГТУ.
10. Газ в системе газа: аргон, водород, аргоно-водородная и аргоно-кислородная смеси.
11. Система обогрева оборудования и трубопровода контура свинцового теплоносителя – электрическая, нихромовыми спиралями с кордиеритовыми бусами. Дальнейшие работы проводились на специально созданном стенде ФТ-4 НГТУ по двум направлениям:

- обработка моделей конструкции ЦКБМ проточной части ГЦН БРЕСТ-ОД-300;
- проведение исследовательских испытаний моделей конструкций НГТУ проточной части осевого насоса применительно к ГЦН БРЕСТ-ОД-300 с целью разработки представительных методов расчета проточной части осевых насосов, перекачивающих высокотемпературные ТЖМТ, а также обработки этих моделей конструкций, применительно к ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300.

Основные характеристики стенда ФТ-4 НГТУ представлены на рис. 5.

Электронасос стенда НСО-01 НГТУ предназначен для проведения испытаний и обработки проточных частей моделей ГЦН РУ БРЕСТ-ОД-300, входящих в состав электронасоса, для обеспечения циркуляции по основному циркуляционному контуру стенда, а также для проверки конструктивных решений и обработки гидростатического подшипника, входящего в состав электронасоса.

Проточная часть электронасоса НСО-01 включает в себя сменные участки моделей (поставки ЦКБМ и НГТУ): входной патрубков; рабочее колесо и выпрямляющий аппарат. Участок модели проточной части от выпрямляющего аппарата и нижней части трубы постоянного напора входит в состав НСО-01 НГТУ и является несменным (постоянным). Участок верхней части трубы постоянного напора модели и устройства поворота потока входит в состав НСО-01 при испытаниях могут демонтироваться.

Испытания 2013 г. с проточной частью ЦКБМ включали в себя следующие этапы:

- кавитационные испытания;
- определение напорно-расходных и энергетических характеристик с установленной верхней частью и устройством поворота потока;
- определение напорно-расходных и энергетических характеристик с демонтированной верхней частью трубы постоянного напора и устройством поворота потока;
- ресурсные испытания.

Проведение кавитационных испытаний позволило определить режим возникновения кавитации (газовой) и его характеристики.

Напорно-расходные и энергетические испытания моделей, спроектированных по традиционным методикам, показали, как и следовало ожидать, существенное расхождение характеристик испытаний на свинце с расчетами.

После испытаний на третьем и четвертом этапах выявлено изменение геометрии (загиб) выходных кромок всех лопаток и появление на них эрозионного износа (рис. 7).

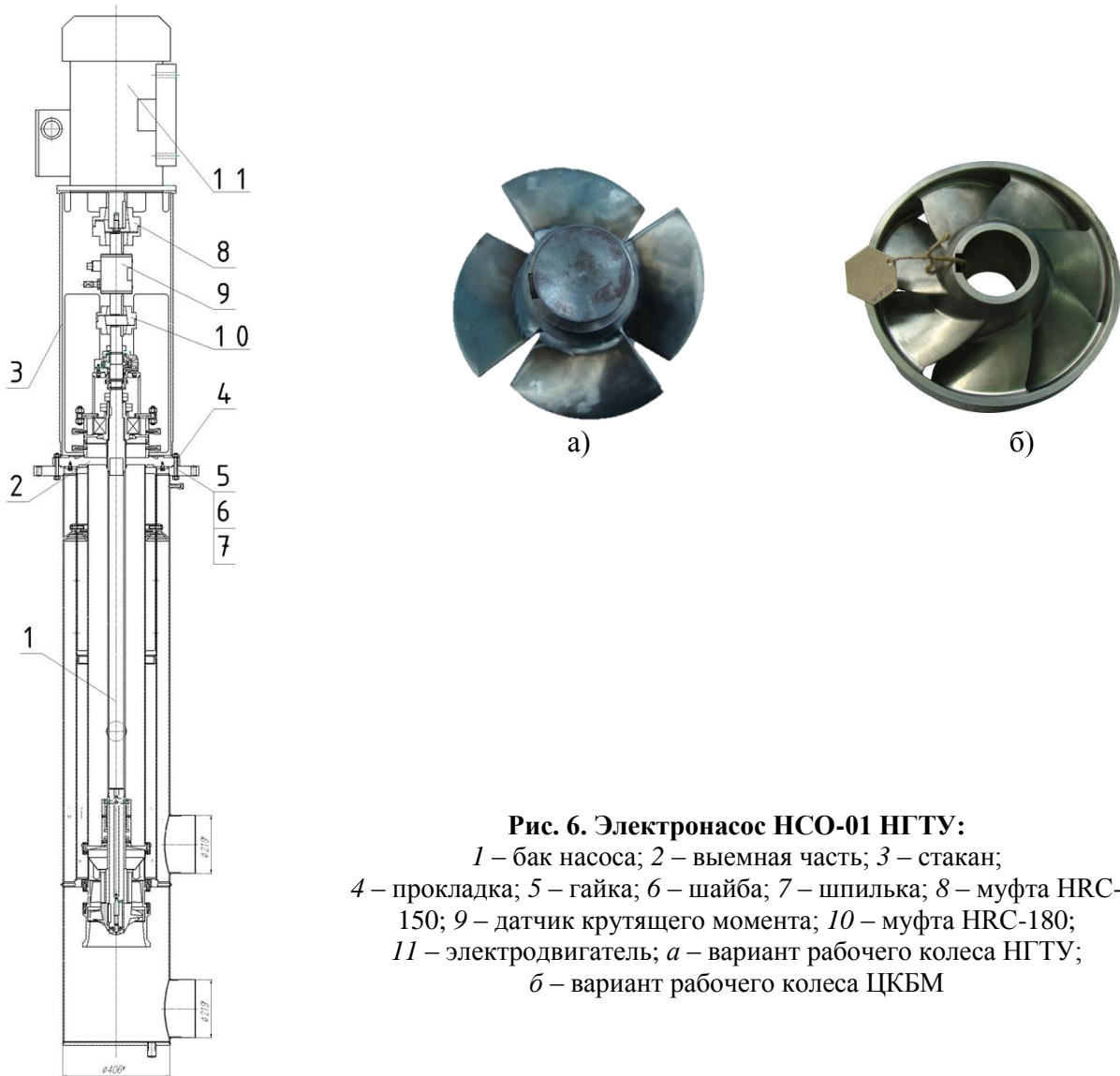


Рис. 6. Электронасос НСО-01 НГТУ:

1 – бак насоса; 2 – выемная часть; 3 – стакан;
 4 – прокладка; 5 – гайка; 6 – шайба; 7 – шпилька; 8 – муфта HRC-150; 9 – датчик крутящего момента; 10 – муфта HRC-180;
 11 – электродвигатель; а – вариант рабочего колеса НГТУ;
 б – вариант рабочего колеса ЦКБМ

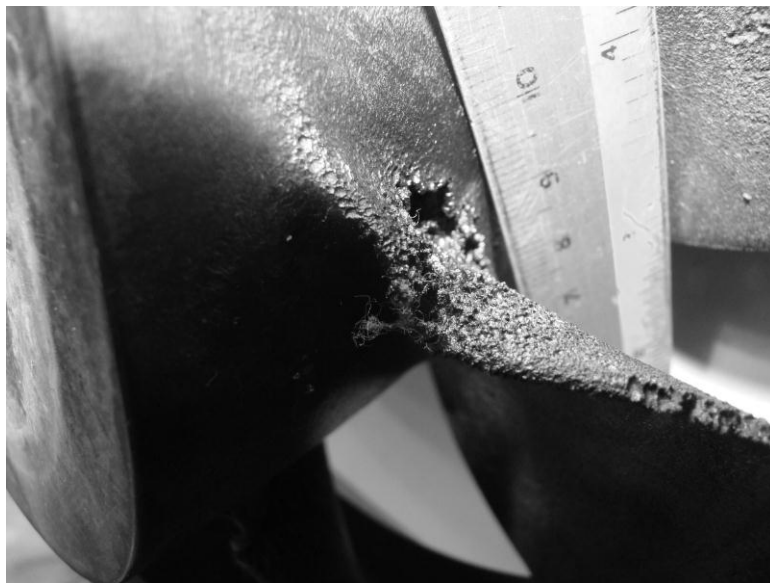


Рис. 7. Эрозионный износ выходных кромок лопаток после ресурсных испытаний

В процессе испытаний по определению влияния осевого зазора между рабочим колесом и выпрямляющим аппаратом конструкции модели НГТУ в результате аварийного самопроизвольного откручивания гаек на болтах крепления входного патрубка произошло совместное вращение рабочего колеса и входного патрубка ($n=1200$ об/мин) со смещением на $\sim 3,0$ мм с осью последнего. Заклинивание вала насоса, развитие и протекание аварии привело к разрушению выходных участков лопаток рабочего колеса (рис. 8, рис. 9).



Рис. 8. Разрушение лопаток колеса



Рис. 9. Разрушение ступицы колеса

Выводы

1. Проведение на начальном этапе испытаний модели рабочего колеса РУ БРЕСТ-ОД-300 на свинцовом теплоносителе подтвердило неприменимость традиционных расчетных методик для проектирования проточной части осевых насосов перекачивающих ТЖМТ.

Экспериментально полученные характеристики проточной части с колесами с семью и четырьмя лопатками, рассчитанными по традиционным методикам, практически совпали, но существенно отличаются от расчетных характеристик.

2. Опытные данные показывают отсутствие повреждений и разрушений на входных участках лопаток рабочих колес и изменение геометрии и специфичный эрозионный износ выходных участков лопаток.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2015*

A.V. Beznosov, P.A. Bokov, A.D. Zudin, A.V. Lvov, T.A. Bokova, N.D. Trushkov

HYDRODYNAMICS AND PERFORMANCE OF MODEL THE MAIN CIRCULATION PUMP BREST-OD-300 LEAD COOLANT ON BENCH FT-4 NNSTU

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The purpose of the investigation tests on the FT-4A bench was to preliminarily measure performance of the flow part of the axial pump having a bearing unit. The NNSTU has carried out investigation tests and developments of the main circulation pump flow part of the BREST-OD-300 reactor plant with axial impellers on benches FT-4A NNSTU and FT-4 NNSTU.

Design/methodology/approach: At the NNSTU n.a. R.E. Alekseyev, the NNSTU FT-4 bench has been designed and manufactured, which allows conducting comprehensive studies of the characteristics of model flow parts of axial type having different designs at the following basic parameters: coolant – lead having a temperature up to 550°C; pump model flow rate – up to 2,000 t/h; pump head – up to 1.5 m.3)

Findings: The conducted investigations proved the possibility in principle of creating an axial pump including a hydrostatic bearing. Further research of cavitation performance of axial pump flow parts designed by the NNSTU and the Central Mechanical Engineering Design Bureau was carried out on the FT-4 NNSTU bench.

Research limitations/implications: The tests carried out in 2013 with regard to the flow part designed by the Central Mechanical Engineering Design Bureau included the following stages:

- cavitation tests;
- determination of head-and-rate and energy characteristics with the upper part and flow turning device installed;
- determination of head-and-rate and energy characteristics with the constant head pipe upper part and flow turning device removed;
- endurance tests.

The cavitation tests made it possible to determine conditions of incipient cavitation (gaseous) and their characteristics. The head-and-rate and energy tests of models designed according to the conventional techniques showed, as could be expected, a material inconsistency in characteristics of tests on lead with the design calculations. After the tests at Stages 3 and 4, there was detected a change in geometry (bend) of the trailing edges of all vanes and appearance of erosive wear on them.

Originality/value:

1. The initial-stage testing of the impeller model of the BREST-OD-300 reactor plant running on a lead coolant has confirmed inapplicability of the conventional design procedures for the flow part of axial pumps pumping heavy liquid-metal coolants. The experimentally obtained characteristics of the flow part with impellers having seven and four vanes designed according to the conventional techniques have virtually coincided, but they greatly differ from the design characteristics.

2. The experimental findings show no damage or destruction at the inlet areas of the impeller vanes and changes in geometry and specific erosive wear of the impeller vane trailing areas.

Key words: the main circulating pump, pressure, flow, axial wheel, a lead carrier, model.

УДК 621.039

А.В. Безносков, П.А. Боков, О.О. Новожилова, Т.А. Бокова, А.О.Соловьев**ПРОБЛЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РАСПЛАВА СВИНЦА
НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ ФТ-4 НГТУ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предлагается использовать для отвода тепла от контуров и систем с ТЖМТ эффективный теплообменник (ПГ) с водо-воздушной смесью, работающей при давлении, близком к атмосферному.

Ключевые слова: теплоотвод, охладитель, свинцовый теплоноситель, модель, парогенератор.

Одной из проблем, возникающих при создании исследовательских и промышленных стендов с ТЖМТ, является отвод тепла от теплоносителя. Такая же проблема возникает при разработке стационарных режимов ЯЭУ с этим теплоносителем.

При создании охладителей расплавов свинца и его сплавов всегда необходимо разрешать противоречие, заключающееся в следующем. С одной стороны, следует обеспечивать отвод от высокотемпературного расплава жидкого металла задаваемое варьируемое количество тепла, поддерживая необходимую температуру расплава на выходе из охладителя. С другой стороны, требуется исключить возможность замерзания расплава жидкого свинца (температура плавления свинца – 326 °С, эвтектики свинец-висмут – 125 °С) при всех изменениях температуры и расхода жидкометаллического теплоносителя на входе в охладитель.

Применение в охладителях расплава жидкометаллического теплоносителя традиционной теплоотводящей среды – воды – возможно только при ее давлении существенно выше атмосферного; для охлаждения воды и для исключения застывания расплава свинца давление воды должно быть более 200 кгс/см², что существенно усложняет конструкцию охладителя и контура его циркуляции. Применение в охладителе другой традиционной теплоотводящей среды – воздуха, учитывая его теплофизические свойства, требует значительных поверхностей теплообмена, что существенно увеличивает массогабаритные характеристики охладителя и его стоимость, сложнее решается проблема первоначального разогрева охладителя до температуры выше температуры плавления жидкометаллического теплоносителя перед вводом охладителя в работу. Поддержание постоянной температуры жидкого металла при варьируемых расходе и температуре теплоносителя на входе в охладитель возможно только за счет широкого диапазона расходов воздуха и соответственно изменения аэродинамического сопротивления охладителя, что значительно усложняет его конструкцию и контур циркуляции.

Нами предлагается использовать для отвода тепла от контуров и систем с ТЖМТ эффективный теплообменник (ПГ) с водо-воздушной смесью, работающей при давлении, близком к атмосферному.

Решаемая задача – создание конструкции охладителя расплава жидкометаллического теплоносителя для исследовательских, испытательных стендов и установок и режимов их эксплуатации, эффективности регулирования теплообмена и исключения замерзания тяжелого жидкометаллического теплоносителя при всех возможных режимах работы охладителя.

Технический результат – повышение эффективности регулирования теплообмена, поддержание заданной температуры жидкометаллического теплоносителя при всех возможных изменениях его расхода и температуры на входе в охладитель, исключение замерзания тяжелого жидкометаллического теплоносителя при всех возможных режимах его работы.

Технический результат достигается тем, что в охладителе расплава жидкометаллического теплоносителя для исследовательских, испытательных стендов и установок, содержа-

щем корпус с патрубками подвода и отвода жидкометаллического теплоносителя, трубную теплообменную систему с патрубками подвода воды и отвода воздушно-паровой смеси, перед патрубком подвода охлаждающей воды, установлен регулятор её расхода, а перед ним – датчик температуры, вход которого соединен с выходом термопреобразователя, установленного на патрубке отвода жидкометаллического теплоносителя; на входном участке труб теплообменной системы установлено устройство ввода капель воды в поток воздуха.

Охладитель расплава жидкометаллического теплоносителя содержит теплообменный модуль, состоящий из корпуса 1 с крышкой, патрубка 2 подвода и патрубка 3 отвода тяжелого жидкометаллического теплоносителя, содержащего трубную теплообменную систему 4 в виде трубок Фильда; выходные патрубки 5 линии отвода воздушно-паровой смеси, сообщенные с атмосферой, устройство 6 ввода капель воды в поток воздуха, компрессор и подводящие патрубки, линию 7 подвода охлаждающей жидкости, на которой установлен регулятор 8 расхода воды, управляемый от датчика 9 температуры и сигнала термопреобразователя 10, установленного в выходном потоке жидкометаллического теплоносителя в патрубке 3 отвода теплоносителя. Вход датчика 9 температуры соединен с выходом термопреобразователя 10.

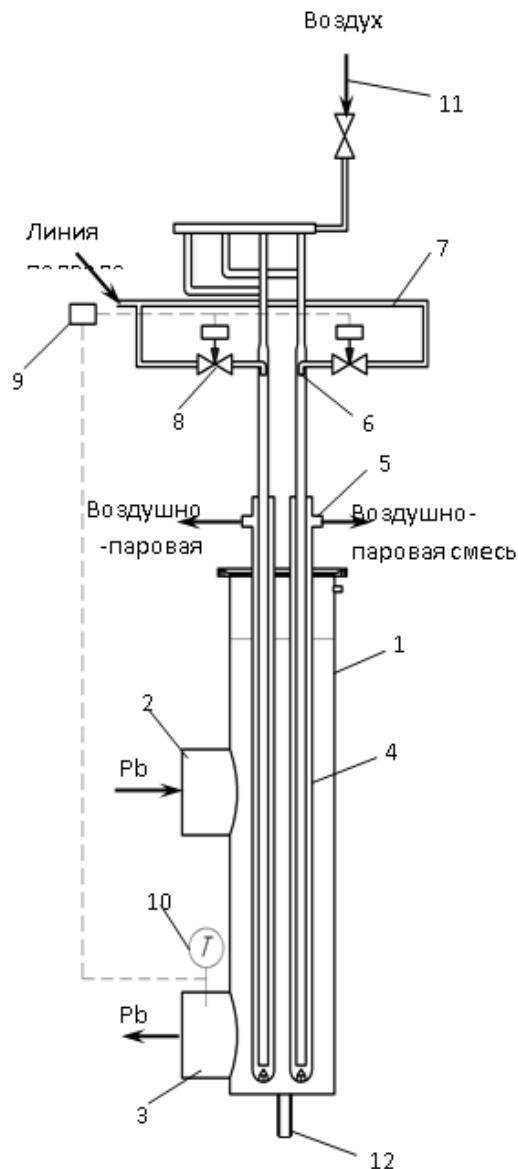


Рис. 1. Охладитель расплава жидкометаллического теплоносителя

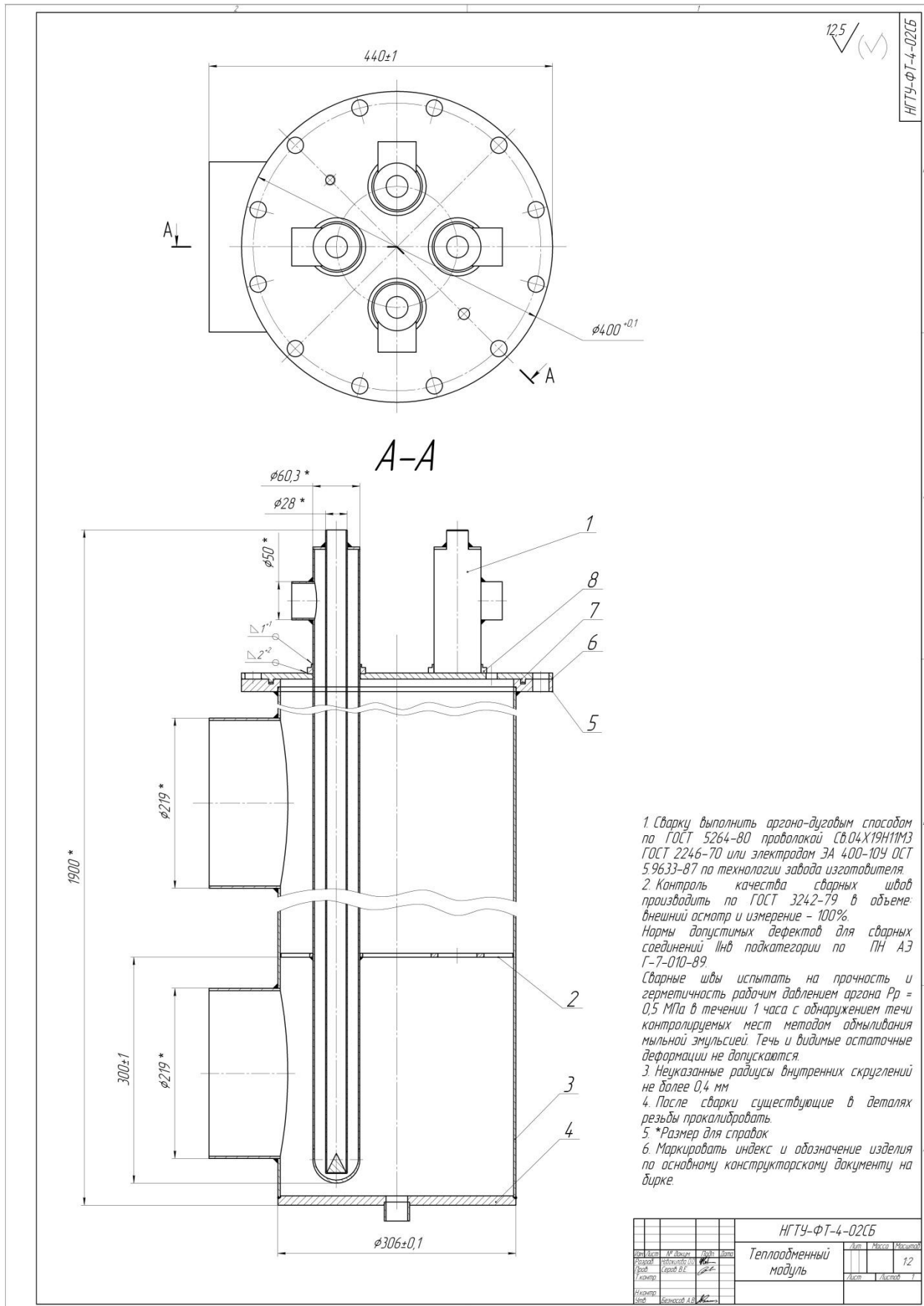


Рис. 2. Теплообменный модуль (общий вид)

Работа системы теплообмена в технологическом режиме осуществляется следующим образом: Начинается подача воды из линии 7 подвода воды в устройство 6 ввода капель воды в поток воздуха, куда одновременно начинается подача воздуха из компрессора в линию 11 подачи воздуха. В устройстве 6 ввода капель воды образуется водо-воздушный поток с мелкодисперсной водной средой, взвешенной в потоке, который поступает в теплообменную систему 4 в виде трубок Фильда и, пройдя цикл нагревания, паровая смесь через патрубки 5 отвода воздушно-паровой смеси отводится в атмосферу. При изменении расхода жидкометаллического теплоносителя или при изменении температуры теплоносителя на выходе из охладителя происходит регулирование подачи воды с помощью регулятора 8 расхода воды, управляемого от задатчика 9 температуры и сигнала термопреобразователя 10, установленного в выходном потоке жидкометаллического теплоносителя. При выводе охладителя из действия прекращают подачу воды, затем отключают линию 11 подачи воздуха от компрессора. Остатки жидкометаллического теплоносителя дренируют через патрубок 12.

Основные технические характеристики

1. Расход свинцового теплоносителя через теплообменный модуль – до 1500 – 2000 т/ч;
2. Температура свинца на входе в теплообменный модуль: до 550 °С;
3. Тепловая мощность теплообменного модуля, максимальная до ~ 50 кВт;
4. Число теплообменных трубок Фильда в модуле – 4 шт.;
5. Расход воды, подаваемой в трубки Фильда теплообменного модуля, $4 \cdot 10 = 40 \text{ дм}^3/\text{ч}$;
6. Расход воздуха подаваемого в трубки Фильда теплообменного модуля, $4 \cdot 30 = 120 \text{ м}^3/\text{ч}$;
7. Гидравлическое сопротивление трубки Фильда по воздушнопаровой среде – 8 кгс/см². Давление в воздушнопаровой полости трубки Фильда (не более): 1,5 – 2,0 кгс/см² (ати).

Опыт создания таких теплообменников с жидкометаллическими теплоносителями отсутствует. Введение в проект стенда подобного теплообменника обусловлено следующим. При использовании «чисто» воздушного теплообменника его поверхность должна быть очень сильно развита с соответствующим увеличением габаритов и массы свинца в стенде; регулировать величину отводимого тепла затруднительно; сложно решаются вопросы разогрева и поддержания температуры теплообменника во всех случаях (разогрев, заполнение, стоянка без циркуляции и др.) без циркуляции «горячего» теплоносителя через теплообменник.

При использовании «чисто» водяного теплообменника необходимо поддерживать давление в его водяных полостях, исключая кипение воды при температурах, больших температур плавления свинца (более 200 кгс/см²), что потенциально опасно в эксплуатации и сложно.

Предлагаемая для использования в составе экспериментального стенда конструкция теплообменника обеспечивает давление в полости охлаждающей среды, близкое к атмосферному, и исключает возможность его существенного повышения на величину, большую гидравлического сопротивления отводящей трассы.

Регулирование количества тепла, отводимого теплообменником, обеспечивается достаточно просто изменением расхода воды, поступающей из расходной ёмкости через регулирующие вентили низкого давления в камеру смешения и диспергирования струйки воды с расходом несколько дм³/ч в воздушно-капельную эмульсию.

При реализации такой конструкции возможно накопление отложений солей в районе отбойника – разбрызгивателя на выходе из внутренней трубы и на внутренних стенках нижней части внешней трубки. Эти отложения солей предполагается удалять водяной промывкой внутренних полостей трубок в «холодном» состоянии при сдренированном теплоносителе.

Охладитель (ПГ) предлагаемой конструкции позволяет повысить безопасность эксплуатации и эффективность регулирования теплоотвода от тяжелого жидкометаллического теплоносителя за счет испарения мелкодисперсной фазы воды в системе теплообмена в виде трубки Фильда, а также исключить замерзание высокотемпературного теплоносителя при операциях ввода и вывода охладителя из действия. Применение данной системы позволит уменьшить массогабаритные характеристики охладителя по сравнению с известными воздушными теплообменниками за счет

уменьшения теплообменных поверхностей, необходимых для обеспечения охлаждения жидкометаллического теплоносителя, обеспечит удобство и простоту эксплуатации.

Эффективность работы рассматриваемой конструкции была проверена в процессе испытаний модели проточной части главного циркуляционного насоса БРЕСТ-ОД-300 на стенде ФТ-4 НГТУ летом 2014 г. До ввода в работу рассматриваемого теплообменника температура свинца в циркуляционном контуре стенда массой 10 т поднялась до 550°C за счет работы электронасоса $N=45$ кВт при $n \sim 2000$ об./мин. После ввода в работу устройства с водовоздушной средой температура свинца в контуре снижалась со скоростью 50°C за 10 мин до температуры 480°C , после чего подача воды в поток воздуха уменьшилась и обеспечивалось поддержание температуры $\sim 480^{\circ}\text{C}$ при работе электронасоса стенда в том же режиме.

Вывод

Устройство охладителя (ПГ) может быть рекомендовано для стендов и ЯЭУ для регулируемого отвода тепла при давлении охлаждающей среды, близком к атмосферному.

Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Характеристики теплообмена моделей поверхностей активной зоны и парогенератора при регулировании содержания примесей в контуре со свинцовым теплоносителем / А.В. Безносков [и др.] // – Атомная энергия. 2008. Т. 104. Вып.2. С. 74–80.
2. **Безносков, А. В.** Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Н.Новгород: НГТУ. 2011. – 176 с.
3. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт, 2007. – 434 с.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2015*

A.V. Beznosov, P.A. Bokov, O.O. Novozhilova, T.A. Bokova, A.O. Soloviev

PROBLEMS OF REGULATION MELT TEMPERATURE OF LEAD ON THE EXPERIMENTAL STAND FT-4 NSTU

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: In this article we propose to use to remove heat from the circuits and systems with HLMC efficient heat exchanger with a water-air mixture, operating at a pressure close to atmospheric.

Design/methodology/approach: In cooler molten liquid metal coolant for research, test benches and plants comprising a housing having inlet and outlet pipes of liquid metal coolant pipe heat exchanger system with pipes of water supply and discharge of air-vapor mixture, before the nozzle cooling water flow regulator is installed it, and before it - temperature adjuster having an input connected to the output of thermocouple mounted on the nozzle outlet the liquid metal coolant at the inlet portion of the heat exchange tubes of the input device set water droplets in the air stream.

Findings: Suggested for use in experimental stand the heat exchanger design provides the pressure in the cavity of the cooling medium, close to the atmospheric and eliminates the possibility of a significant increase in an amount greater than the hydraulic resistance of the escaping route.

Adjusting the amount of heat removed exchanger provided simply changing the flow of water coming from the tank through the flow control valves in a low-pressure mixing chamber, and dispersing the water streams at a rate of several dm^3 of air per hour in an emulsion droplet.

When implementing such a structure may buildup of salts in the impingement area - the sprinkler outlet of the inner tube and the inner walls of the lower portion of the outer tube. These salt deposits is supposed to remove the water purge the inside of the tubes in the "cold" state when drained coolant.

Research limitations/implications: The efficiency of the considered design has been verified in the process of testing a model of the flow of the main circulation pump BREST-OD-300 on the bench FT-4 NGTU this summer.

Originality/value: Cooler device can be recommended for stands and nuclear power systems for the controlled removal of heat at the pressure of the cooling medium, close to atmospheric.

Key words: heat sink, cooler, lead coolant, model, steam generator.

УДК 621

А.А. Баринов, В.Е. Бородина, С.М. Дмитриев, Е.Д. Игнатов,
А.А. Табекин, А.Е. Хробостов

ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ В ИССЛЕДОВАНИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОБОРУДОВАНИИ ЯЭУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлено описание метода матричной кондуктометрии, разработан и введен в эксплуатацию экспериментальный стенд по изучению гидродинамических процессов с помощью сетчатого датчика, выявлены параметры функционирования измерительной системы, представлена методология исследования, приведен перечень планируемых экспериментов.

Ключевые слова: ядерный реактор, гидродинамика, тепломассообмен, кондуктометрия, сетчатый датчик.

Введение

Одной из основных задач атомного машиностроения является обеспечение надежности и безопасности ЯЭУ. Решение данной проблемы реализуется применением комплекса мер, направленных на обоснование теплотехнической надежности оборудования АЭС, а также на тщательное исследование всех процессов и явлений, происходящих в нем. С другой стороны, конструкция элементов реакторной установки, отвечающих за отвод тепла, должна быть выбрана с учетом специфики гидродинамических процессов при течении теплоносителя. Эти процессы определяют такие характеристики, как критический тепловой поток, коэффициенты теплоотдачи и другие, от значения которых зависит нормальное функционирование оборудования энергетической установки в различных эксплуатационных условиях. Поэтому обеспечение безопасности и надежности АЭС требует более детального изучения гидродинамических процессов в условиях реакторной геометрии.

Обоснование тех или иных конструктивных изменений в оборудовании ЯЭУ во многом базируется на теплогидравлическом расчете. Надежный теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора требует проведения значительного комплекса экспериментальных исследований и развития новых методов расчета локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в пучках стержней [1]. Всё это обуславливает применение в экспериментах современных и достоверных методов детектирования. К их числу относится кондуктометрический метод с использованием сетчатого датчика. В зарубежных исследованиях измерительные системы с сетчатыми датчиками находят широкое применение в исследовании процессов массообмена, благодаря высокой точности, наглядности и информативности полученных результатов. Необходимость более детального изучения процессов гидродинамики в условиях реакторной геометрии и ранее проведенные исследования свидетельствуют об актуальности использования матричного кондуктометрического метода измерения при изучении тепломассопереноса. В связи с этим в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева был разработан и введен в эксплуатацию научно-исследовательский стенд, целью которого является разработка и апробация методики проведения исследований с помощью сетчатого датчика.

Теоретические основы кондуктометрического метода исследования

В общем случае процессы тепломассообмена характеризуются изменением совокупности значений температуры или концентрации во всех точках изучаемого пространства в данный момент времени. Такое распределение принято называть полем. Аналитически темпера-

турное поле и поле концентрации можно представить в виде функции зависимости от координат точек пространства и времени.

$$T = T(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

$$C = C(x, y, z, \tau). \quad (2)$$

В движущейся жидкости поле температуры, как и поле концентрации, зависит от поля скорости, которое описывается уравнениями гидродинамики. Поэтому решение задач конвективного массообмена сводится к решению системы дифференциальных уравнений: уравнения неразрывности, уравнения движения, уравнения диффузии.

При эмпирическом исследовании данных процессов удобно использовать двухкомпонентные среды, в которых изменение некоторого характерного параметра, вызванное конвективным и диффузионным обменами вещества, будет определять тепломассообмен. Такими характерными показателями могут выступать: температура, концентрация, электропроводимость.

Кондуктометрический метод с использованием сетчатого датчика основан на отслеживании динамики переноса и распространения электрически контрастного трассера. Он позволяет измерять поля концентраций электролитических сред в плоских областях различной геометрической конфигурации. Сетчатый зонд позволяет регистрировать пространственное распределение электрических параметров среды. В общем случае электропроводимость является комплексной величиной, состоящей из активной (вещественной) компоненты R^{-1} и емкостной (мнимой) компоненты $X = \omega C$, т.е. [2]

$$Y = R^{-1} + j\omega C. \quad (3)$$

Исходный сигнал поступает от генератора на датчик. Параметры и форма сигнала определяются выбранным режимом работы сетчатого зонда. При использовании датчика для измерения проводимости, где влияние емкостной составляющей пренебрежимо мало, предполагается использовать меандрический сигнал с частотой до 100 кГц. При исследовании двухфазных течений (типа вода-воздух), где влияние резистивной составляющей незначительно, схема должна измерять емкостную часть комплексной проводимости. В этом случае частота исходного синусоидального сигнала должна быть порядка единиц МГц.

Структурно сетчатый датчик состоит из двух групп электродов (рис. 1), которые находятся в параллельных плоскостях, разнесенных в пространстве и развернутых друг относительно друга на 90 град. Электроды совмещают две функции: измерение пространственного распределения электрических характеристик изучаемого потока жидкости и ввод получаемой информации в систему сбора данных [3]. Основными характеристиками датчика являются боковой шаг электродов и расстояние между слоями. Первая группа электродов – возбуждители (генераторы опорных сигналов), а вторая – приемники. Пространственное пересечение двух групп электродов образует измерительную область, состоящую из набора узлов, каждый из которых образован парой электродов генератор-приемник. Измерение параметров происходит в области зазора между двумя электродами, один из которых используется как источник напряжения, второй – приемник тока. То есть измерение проводимости жидкости между каждым пересечением двух электродов происходит независимо. На основе измеренного тока определяется электрический импеданс среды в пространстве между электродами. Определяемым параметром при использовании данного метода является удельная проводимость жидкости. Для получения картограммы перемешивания среды необходимо обеспечить разницу в электрической проводимости в объеме исследуемой жидкости. Это достигается добавлением трассера, электрические свойства которого отличаются от свойств основного потока.

Чтобы выполнить исследование процессов массопереноса с помощью сетчатого дат-

чика в условиях, близких к естественным условиям эксплуатации оборудования ЯЭУ, необходимо использовать в качестве трассера вещество, характеристики (кинематическая вязкость, плотность) которого слабо зависят от солесодержания в широком диапазоне температур [4]. Таким веществом является водный раствор соли NaCl.

Для снижения эффекта вынужденного электролиза на электродах сеточного зонда необходимо, чтобы уровень постоянного сигнала на электродах возбуждения не превышал значение электрохимического потенциала разложения электролита. Для раствора NaCl при выполнении этого условия ограничивает напряжение на электродах величиной 2,19 В [5]. При измерении принимаемый сигнал искажается из-за наличия емкости у проводов. Чтобы минимизировать этот эффект, измерения производятся тогда, когда завершится переходный процесс приема сигнала. По предварительным расчетам это время составляет около 0,06 мс.

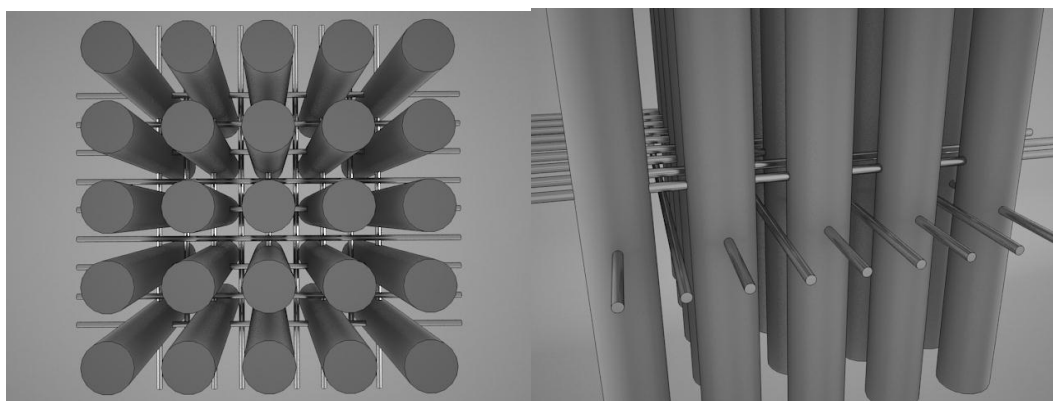


Рис. 1. Расположение сетчатого датчика в стержневом пучке

Ввиду наличия близкорасположенных электрически связанных электродов появляются «перекрестные» помехи. То есть электрическое поле от соседнего электрода оказывает влияние на результаты измерения у другого электрода. Это помехи приводят к размыванию сигнала. Чтобы это предотвратить, сетчатый датчик выполнен таким образом, что провода имеют значительно более низкий импеданс, чем жидкость между ними. В таком случае отсутствует высокая разность потенциалов между проводами, и «перекрестные» помехи эффективно компенсируются.

Автоматизированная система сбора и обработки сигналов замеряет уровень напряжения каждого узла датчика. Частота опроса выбирается с точки зрения нивелирования нежелательных физико-химических процессов, возникающих на поверхности струн датчика (образование газа), и оптимальности работы электрических компонентов. Также благодаря выбранной частоте достигается высокая плотность результатов, позволяющая наиболее точно описывать исследуемый процесс.

Полученные результаты уровня напряжения ячеек пересчитываются по соответствующим зависимостям в проводимость среды. Далее строится картограмма распределения концентрации соли в поперечном сечении потока. Её анализ позволяет сделать вывод о количественной и качественной интенсивности процессов массообмена в исследуемом стержневом пучке.

Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд (рис. 2) для исследований процессов тепломассопереноса представляет собой два смежных разомкнутых гидравлических контура, через которые прокачивается специально-подготовленная вода. В состав экспериментального стенда входят: экспериментальная модель; сетчатый датчик; насосы; генератор измерительного сигнала; измерительный комплекс; блок управления.

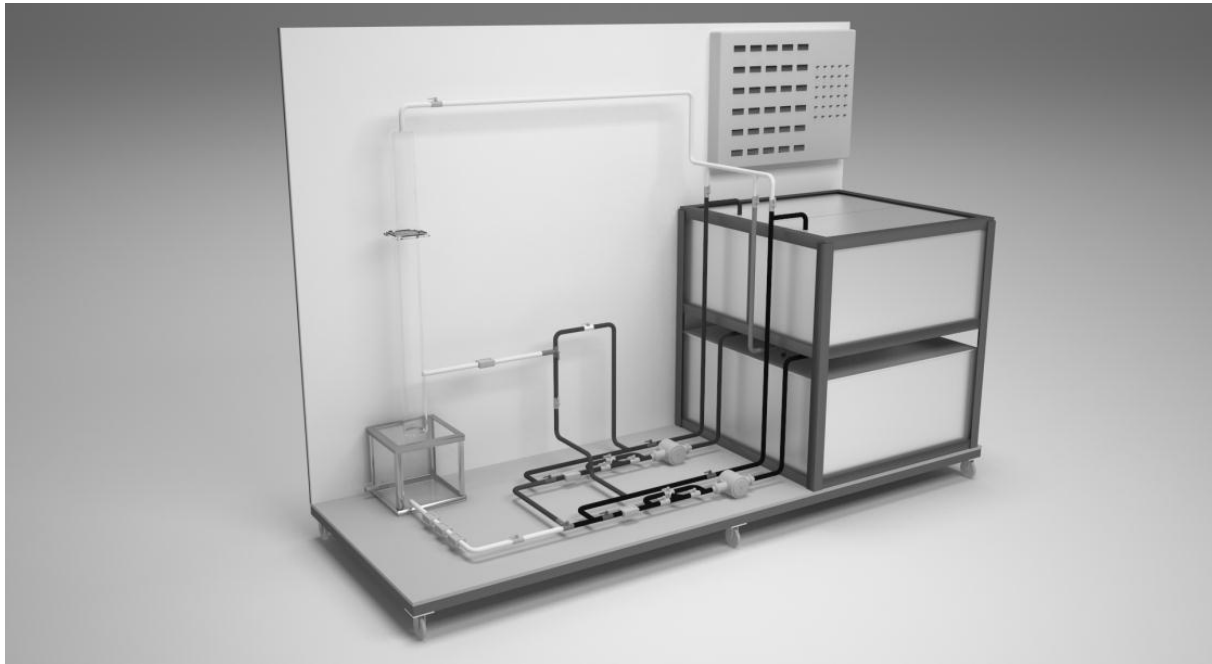


Рис. 2. Общий вид стенда

Схема стенда приведена на рис. 3. Экспериментальная модель представляет собой канал определенных геометрических параметров, которые выбраны с учетом выполнения условия геометрического подобия с реальными тепловыделяющими сборками ядерного реактора.

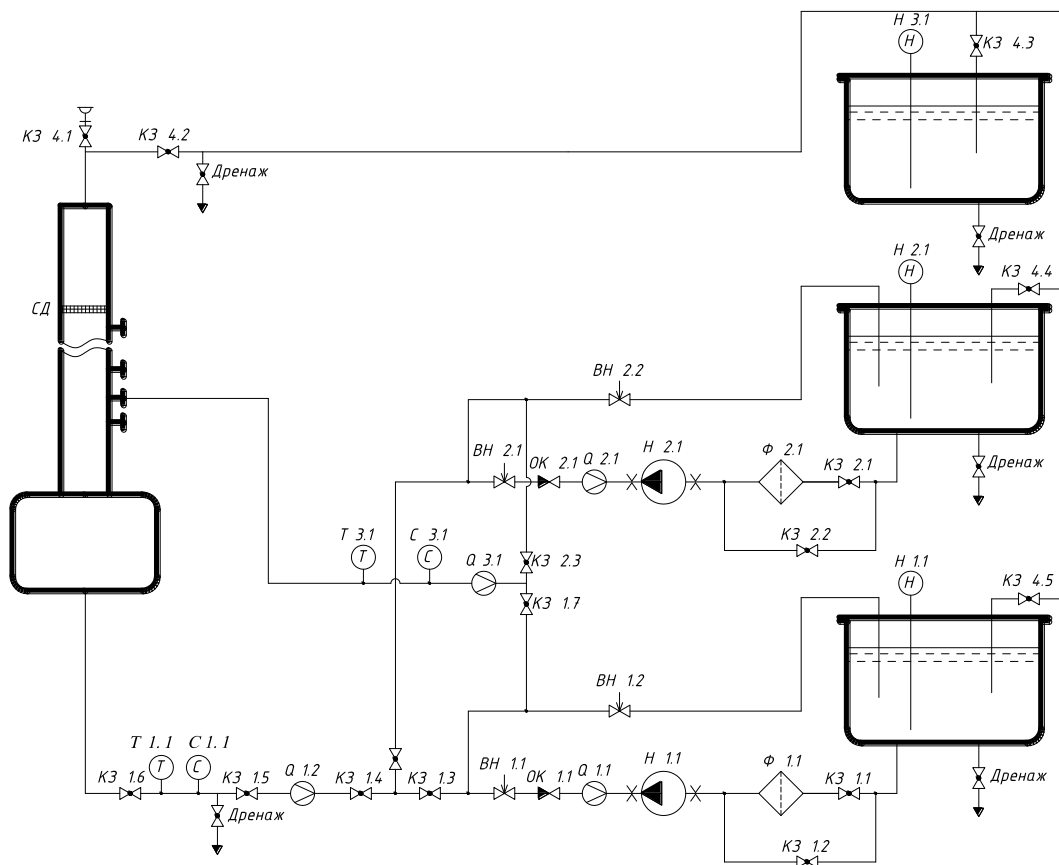


Рис. 3. Общая схема стенда

Модели имеют универсальные присоединительные фланцы, объединенные с трубными досками, в которых закрепляются стержни. Их конструкция позволяет вносить изменения в расположение и компоновку стержневого пучка. К настоящему моменту были созданы модели круглого и квадратного поперечного сечения (рис. 4).

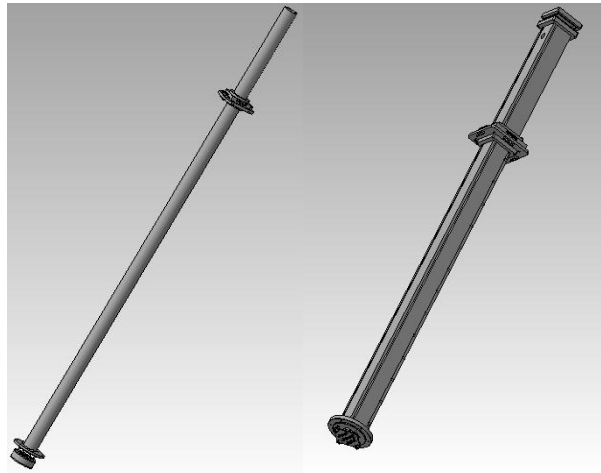


Рис. 4. Общий вид экспериментальных моделей

Конструкция датчика (рис. 5) позволяет изменять взаимное расстояние между слоями групп электродов. На нижнем фланце СД помещена система клемм для возможности оперативного подключения измерительной схемы к блоку обработки сигнала. Струны СД изготовлены из NiCr сплава, диаметр струн 0,5 мм, такой размер не вносит серьезных возмущений в поведение крупных структур в турбулентном потоке. В корпусе датчика предусмотрена система натяжения электродов, так как набегающий поток среды приводит к деформации струн, что искажает результаты.

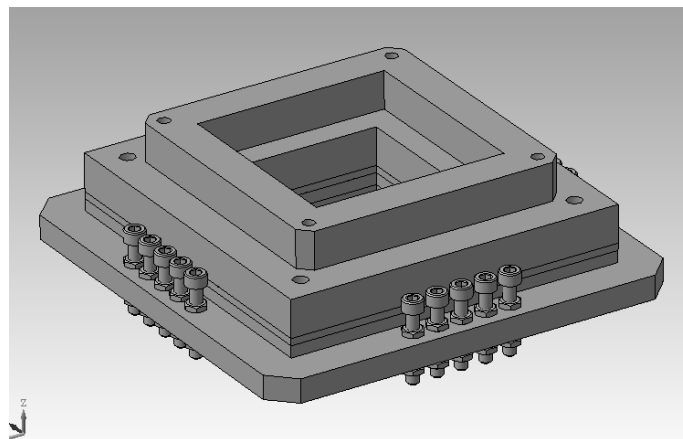


Рис. 5. Конструкция датчика

Циркуляция среды в контурах обеспечивается насосами, которые имеют ступенчатую регулировку частоты вращения ротора. В совокупности с регулировкой гидравлического сопротивления контура существует возможность изменять режим течения среды в модели в широких диапазонах чисел Рейнольдса. На циркуляционном трубопроводе закреплены технологические датчики, контролирующие параметры среды.

Генератор измерительного сигнала предназначен для подачи на ячейки датчика переменного напряжения заданной частоты и амплитуды. Схема генератора разработана с учетом необходимости усиления по току и стабильности амплитуды колебаний при различной мощ-

ности нагрузки (датчика). Возможности генератора позволяют изменять параметры подаваемого сигнала по амплитуде и частоте.

Для проведения экспериментальных исследований с использованием матричного зонда необходима электронная автоматизированная многоканальная система сбора и обработки сигналов.

Методики планируемых экспериментов

Процесс теплоотвода от ТВЭЛов активной зоны ядерного реактора определяется многими факторами [6]. В первую очередь к ним относятся локальные гидродинамические характеристики потока. Применение метода сетчатой диагностики, основанного на регистрации пространственного распределения комплексной проводимости жидкости, позволяет выполнить детальное исследование этих параметров.

В настоящий момент разработаны методики для исследования локальных характеристик потока. Перечислим планируемые эксперименты.

1. Исследование по изучению перемешивания потока в экспериментальной модели (ЭМ) на различных режимах течения среды.

После выбора режима течения среды согласно матрице испытаний, солевой трассер через впускной зонд, расположенный по направлению движения потока, подается в начальный участок ЭМ до сетчатого датчика. Далее производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках. По полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от числа Рейнольдса.

2. Исследование по изучению перемешивания потока ЭМ при различных положениях впускного зонда.

Устанавливается положение впускного зонда по высоте ЭМ и режим течения среды согласно матрице испытаний. Солевой трассер через впускной зонд, расположенный по направлению движения потока, подается в ЭМ. Далее с помощью сетчатого датчика производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках. Устанавливается следующее положение впускного зонда по высоте ЭМ, и производятся соответствующие замеры для всей матрицы испытаний. По полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от координаты впускного зонда.

3. Исследование по изучению осевого профиля скорости потока в ЭМ.

Устанавливается режим течения среды согласно матрице испытаний. Солевой трассер через впускной зонд равномерно подается в сечение ЭМ, расположенное на определенном расстоянии от сетчатого датчика. Далее с помощью сетчатого датчика производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках последовательно в течение определенного интервала времени. После этого прекращается подача солевого трассера. Устанавливается следующий режим течения среды, и производятся соответствующие замеры для всей матрицы испытаний. По полученным данным строится осевой профиль скорости потока.

Разработан комплекс мер, направленных на апробацию и представительность результатов, также оценена погрешность экспериментальных данных.

Заключение

Гидродинамические процессы, характеризующие движение теплоносителя, оказывают существенное влияние на функционирование оборудования ЯЭУ. Их детальное исследование с применением современных методов детектирования будет способствовать более корректной оценке работоспособности как отдельных элементов и систем, так и самого ядерного реактора в целом.

В настоящее время создан лабораторный стенд для отработки и апробации методик по использованию метода сетчатой кондуктометрии в исследовании процессов реакторной гидродинамики. Определены условия работы датчика, производится анализ физико-химических явлений, оказывающих влияние на работу измерительной системы в целом. Полученные ре-

зультаты будут являться базисом, на основе которого обеспечивается дальнейшее развитие данного метода исследований применительно к реальным условиям течения теплоносителя.

Использование матричного сетчатого датчика обеспечит высокую точность и наглядность экспериментальных данных, стенд планируется использовать в учебных целях для подготовки будущих специалистов в области атомной энергетики.

Библиографический список

1. Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВБЭР-300 с целью обоснования их эффективности / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. №3. С. 197–206.
2. **Графов, Б.М.** Электрохимические цепи переменного тока / Б.М. Графов, А.М. Укше. – М.: Наука, 1973. – 128 с.
3. **Prasser, H.-M.** Novel experimental measuring techniques required to provide data for CFD validation // Nuclear Engineering and Design. 2008. № 238. P.744-770.
4. **Kwak, G.** The effects of salt type and salinity on formation water viscosity and NMR response / H. Kwak, G. Zhang, S. Chen // International Symposium of the Society of Core Analyst. – Toronto, Canada, 2005.
5. Электрохимия / Ф. Миомандр [и др.]. – М.: Техносфера, 2008. – 360 с.
6. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2. С. 98–108.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2015*

**A.A. Barinov, V.E. Borodina, S.M. Dmitriev, E.D. Ignatov, A.A. Tabekin,
A.E. Khrobostov**

IMPLEMENTATION THE METHOD OF MATRIX CONDUCTOMETRY IN STUDY HYDRODYNAMIC PROCESSES OF COOLANT FLOW IN EQUIPMENT NPS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Development of a method for research of hydrodynamic processes using a wire-mesh sensor.

Methodology/approach: Wire-mesh sensor enables to measure the concentration field of the salt solution in the flow, due to the difference of electric conductivity. The analysis of these distributions enables to make a conclusion about the intensity of heat exchange processes.

Originality/value: The technique enables to estimate more correctly the operability of the equipment of a nuclear reactor.

Key words: nuclear reactor, hydrodynamics, heat and mass transfer, conductometry, wire-mesh sensor.

УДК. 621.376.53

В.В. Бирюков, С.Ю. Захаров, В.А. Малахов, А.С. Раевский**УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ ФЕРРИТОВЫМ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕМ
РАДИОПРИЕМНОГО ТРАКТА КРИОГЕННОГО РАДИОМЕТРА**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрены устройство и принцип работы драйвера ферритовых переключателей, входящих в состав двухчастотного криогенного радиометра для радиотелескопа РАТАН-600. Приведены: принципиальная схема устройства управления ферритовыми переключателями, способы соединения катушек, создающих магнитное поле в феррите, результаты измерений характеристик ферритовых переключателей.

Ключевые слова: ферритовый переключатель, драйвер ферритового переключателя, радиоприемный тракт, устройство управления, криогенного радиометр.

Введение

Радиоастрономия является одним из важных направлений исследования космического пространства. Инструментом, позволяющим принимать радиоизлучение, приходящее от объектов, расположенных в просторах Вселенной, являются радиотелескопы. Изучение космического пространства с помощью радиотелескопов началось с середины 30-х годов прошлого века. В настоящее время исследования излучений в радиоокне прозрачности (1 см – 10 м) [1] развиваются быстрыми темпами как за рубежом, так и в России. Одним из центров астрономических исследований является Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (САО РАН), в которой в качестве инструмента открытого коллективного пользования по изучению космического пространства в радиочастотном диапазоне используется радиотелескоп РАТАН-600 (Радиотелескоп Академии Наук) с кольцевой многоэлементной антенной диаметром 600 м. Рабочий диапазон частот радиотелескопа РАТАН-600 – 610–30000 МГц [2]. В настоящее время в лаборатории микроволновой электродинамики (ЛМЭ) кафедры «Физика и техника оптической связи» (ФТОС) ИЯЭ и ТФ НГТУ совместно с Институтом прикладной физики Российской Академии наук ведутся работы по созданию для радиотелескопа РАТАН-600 высокочувствительного широкополосного радиометрического устройства на два частотных диапазона 18,5–21,5 ГГц (центральная частота 20,0 ГГц) и 27,5–32,5 ГГц (центральная частота 30,0 ГГц). В разрабатываемом двухчастотном криогенном радиометре используется модуляционная схема с волноводными ферритовыми переключателями, один вход которых подключен к входному тракту, а другой – к охлаждаемой согласованной нагрузке. Используемые ферритовые переключатели должны работать при криогенных температурах, обеспечивать частоту переключения 32–128 Гц, развязку по каналам 20 дБ, иметь малую мощность рассеивания и широкую полосу частот. Однако необходимой полосой частот обладают лишь так называемые переключатели резервирования, предназначенные для однократных переключений. Их малое быстродействие обусловлено высокой индуктивностью катушек управления. Данная статья посвящена исследованию возможностей использования данных переключателей в криостатированном радиометрическом приемнике.

Принцип работы устройства управления ферритовым переключателем

Радиометрический приёмник предназначен для проведения астрофизических исследований в миллиметровом диапазоне длин волн на радиотелескопе РАТАН-600 Специальной астрофизической обсерватории РАН. Радиометр состоит из четырёх каналов, обеспечивающих приём излучений двух взаимно перпендикулярных поляризаций в двух частотных диапазонах. Каждый канал построен по модуляционной схеме (рис. 1) с волноводным переключателем.

чателем 1 с прямоугольной петлёй гистерезиса (ППГ), охлаждаемой согласованной нагрузкой 2, охлаждаемым маломощным усилителем 3.

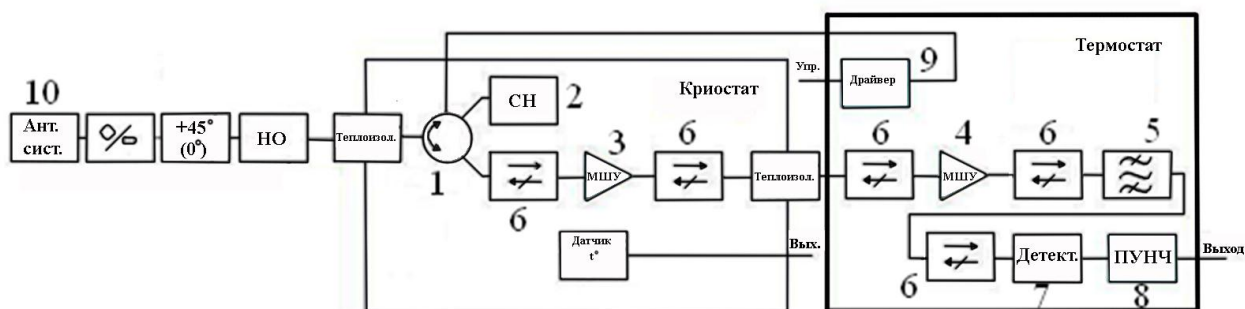


Рис. 1

Выходная часть выполнена в виде общего для четырёх каналов термостатируемого блока с выходными маломощными усилителями 4, полосно-пропускающими фильтрами 5, согласующими ферритовыми изделиями 6, квадратичными детекторами 7, предварительными усилителями низкой частоты 8 и драйверами управления волноводными переключателями 9. Термостатирование выходных блоков выполнено на уровне 37°C с точностью не хуже $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. В криостате предусмотрен независимый от криогенной системы датчик физической температуры усилителей.

Охлаждаемая часть приёмника выполнена в виде объединенного двухчастотного маломощного криоблока, т.е. в одном криоблоке размещены четыре радиометрических тракта. Первичные скалярные облучатели 10 располагаются в одну линию, вплотную друг к другу, с расположением в центре трактов более высокой частоты.

Основные технические характеристики:

- диапазон частот 18,5 – 21,5 ГГц (центральная частота 20 ГГц) и 27,5 – 32,5 ГГц (центральная частота 30 ГГц);
- возможность приема двух взаимно перпендикулярных поляризаций электромагнитного излучения;
- уровень криостатирования 80 К;
- схема построения – модуляционная с волноводным ферритовым переключателем и охлаждаемой согласованной нагрузкой;
- флюктуационная чувствительность не хуже 5 мК в расчете на 1 с постоянной времени выходного фильтра.

На рис. 2, а изображен волноводный ферритовый переключатель для канала 20 ГГц, на рис. 2, б – для канала 30 ГГц.

Для уменьшения рассеиваемой тепловой мощности управление ферритовыми переключателями предлагается осуществлять при помощи коротких импульсов длительностью 50 – 250 мкс. Полярность управляющих импульсов, их амплитуда и длительность определяют схемотехническую реализацию драйвера и схему подключения катушек, создающих магнитный поток в ферритовых переключателях. Необходимо также учитывать ограниченную мощность криостата, что накладывает ограничение на величину средней мощности управляющего сигнала, и требуемую величину развязки 20 дБ между полюсами переключателя.

Катушки, создающие магнитный поток в феррите, являются одним из ключевых элементов волноводного переключателя. Величина напряженности внешнего магнитного поля зависит от сердечника катушки, взаимного расположения катушки с ферритом и числа ее витков. От схемы подключения катушек управления зависит схематическое решение драйвера ферритового переключателя, в частности, выходные транзисторные каскады, подключенные к катушкам.



Рис. 2

На рис. 3 приведены три предлагаемые схемы подключения катушек, создающих магнитное поле в феррите.

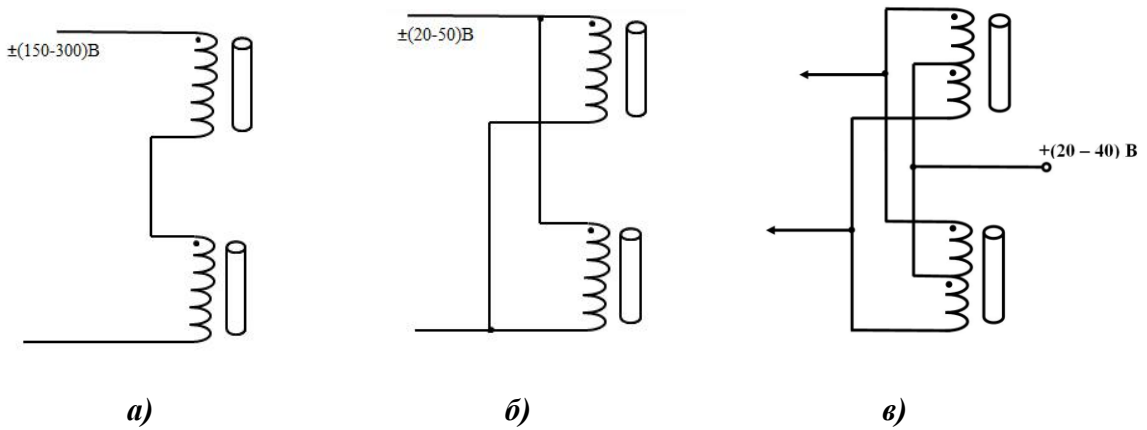


Рис. 3

Первый способ соединения катушек (рис. 3, а) требует последовательности импульсов разной полярности и больших управляющих напряжений для получения требуемого тока переключения, что сопряжено с усложнением схемы генерации импульсов и выходных каскадов драйверов переключателей. Схема соединения катушек на рис. 3, б позволяет уменьшить управляющие напряжения, но управляющие импульсы остаются разнополярными. Создание таких импульсов усложняет схемотехническое решение и не всегда удается подобрать разнополярные транзисторы с одинаковыми характеристиками.

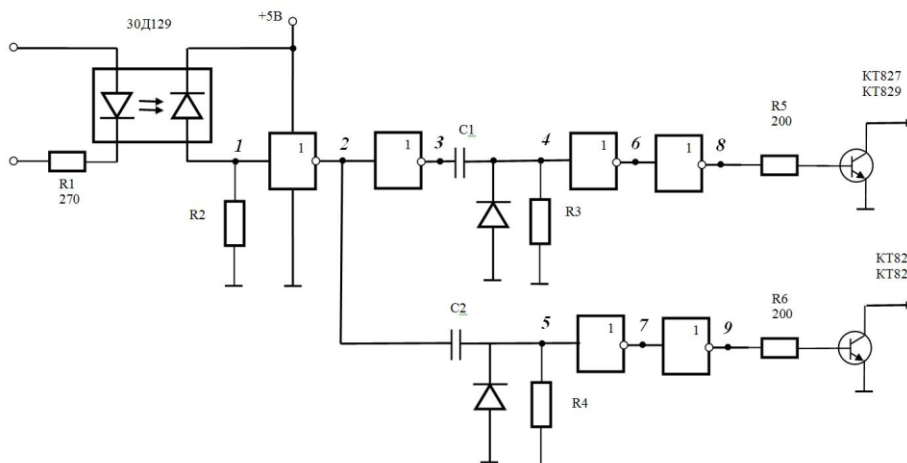


Рис. 4

Наиболее предпочтительным является соединение катушек, приведенное на рис. 3, в. В данном случае на каждый сердечник наматываются две катушки, создающие магнитное поле в противоположных направлениях. Такое соединение позволяет не только понизить управляющее напряжение, но и использовать в качестве управляющих однополярные импульсы, что значительно упрощает принципиальную схему драйвера волноводного ферритового переключателя. На рис. 4 приведена принципиальная схема устройства управления переключателем, а на рис. 5 эпюры напряжения в контрольных точках принципиальной схемы.

На рис. 5 номера графиков напряжений соответствуют номерам контрольных точек обозначенных на рис. 4.

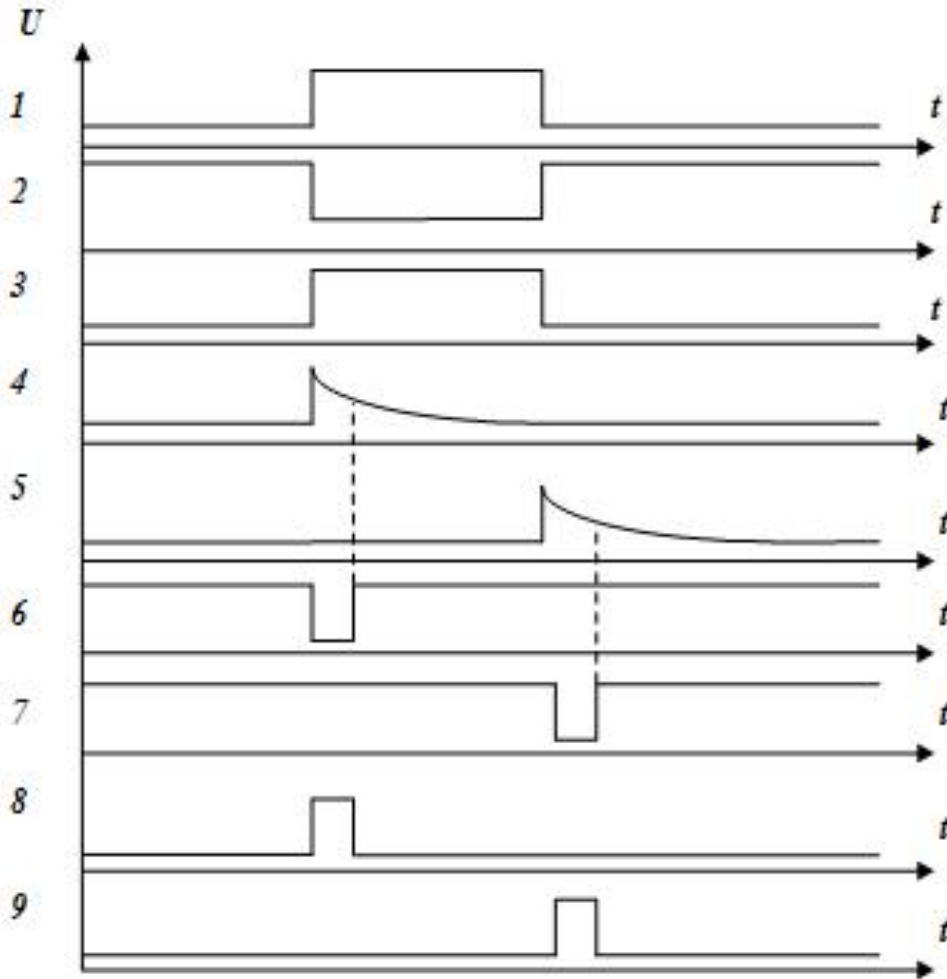


Рис. 5

На вход драйвера через диодную оптопару (предназначенную для развязки) подаются импульсы (рис. 5 эпюра 1) с требуемой частотой переключения волноводного ферритового переключателя (32–128 Гц). Поступая на вход элемента цифровой интегральной схемы КР1533ЛН1 транзисторной логики с диодами Шоттки серии ТТЛ (шесть логических элементов НЕ) [3], импульсы инвертируются (рис. 5 эпюра 2) и разделяются на два идентичных канала, которые формируют короткие управляющие импульсы. Проходя через дифференцирующую цепь и элементы НЕ микросхемы, длительность импульсов уменьшается (рис. 5 эпюры 6, 7). После инвертирования сигнала, управляющие импульсы поступают на базу выходных транзисторов (рис. 5 эпюры 8, 9). Коллекторы выходных транзисторов подключены к катушкам управления (рис. 3, в), а через них к источнику высокого напряжения. Управляющие импульсы создают токи в катушках индуцирующие магнитное поле противоположных направлений. Величина тока в катушке и длительность импульсов определяют остаточную намагниченность сердечников катушки, а следовательно, и величину развязки каналов.

Экспериментальные исследования драйвера ферритового переключателя

Для проверки работоспособности устройства управления волноводным ферритовым переключателем была собрана схема испытаний, показанная на рис. 6.

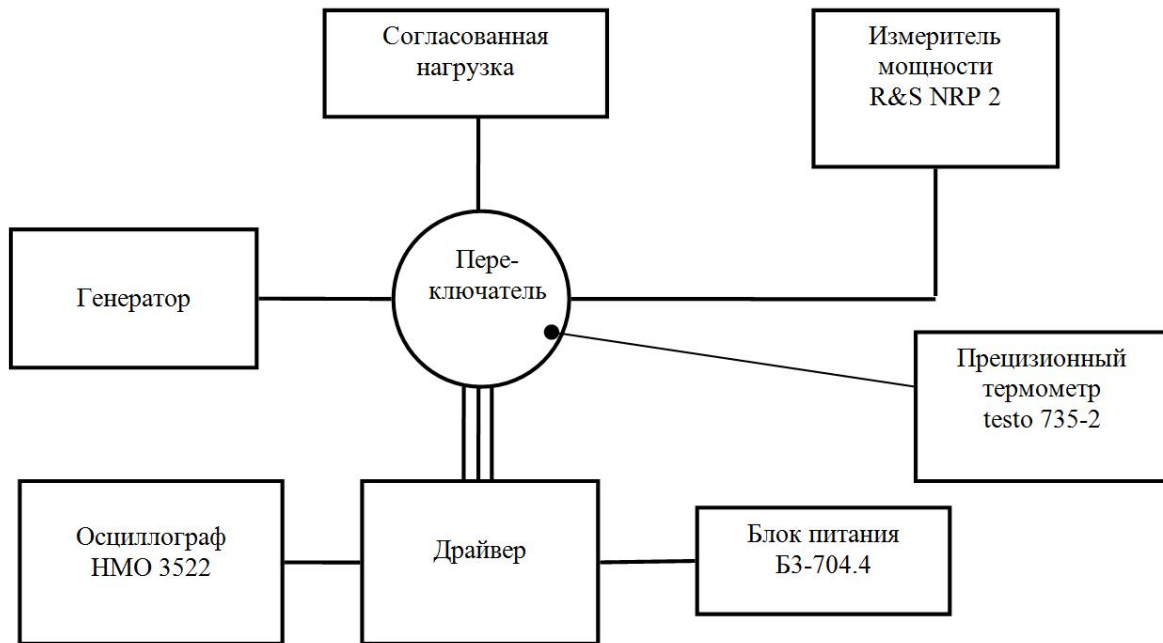


Рис. 6

Высокочастотный сигнал, генерируемый СВЧ генераторами Г4-207(20 ГГц) или Г4-208 (30 ГГц), поступает на ферритовый переключатель, один полюс которого нагружен на согласованную нагрузку, а другой подключен к измерителю мощности R&S NRP2. Управляющие импульсы контролируются осциллографом НМО 3522. С помощью прецизионного термометра testo 735-2 и зонда с платиновым датчиком температуры pt100 осуществляется контроль температуры на переключателе.

Исследование характеристик волноводного ферритового переключателя осуществлялись при разной частоте переключения, длительности управляющего импульса и его амплитуде. На рис. 7 представлено изменение мощности на выходе переключателя, полученное с помощью измерителя мощности R&S NRP2. Длительность управляющего импульса 150 мкс, амплитуда управляющего импульса 25 В, частота переключения 64 Гц.

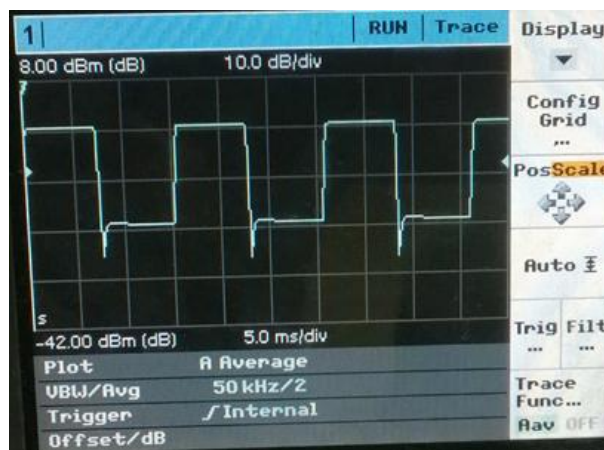


Рис. 7

Из рис. 7 видно, что требуемая развязка 20 дБ (рис. 710 дБ/дел) при небольших управляющих напряжениях (25 В) и требуемой частоте переключения (64 Гц) была достигнута. Потребляемая переключателем мощность при частоте приключения 64 Гц составляла 8 Вт, при частоте 32 Гц – 0,8 Вт. Таким образом, понижение частоты переключения обеспечивает возможность использования данных переключателей в криоблоках охлаждаемых криорефрижераторами на замкнутом газовом цикле.

Выводы

Предложенное схемотехническое решение устройства управления позволяет получить требуемые характеристики переключения, предъявляемые к волноводным ферритовым переключателям, которые используются в радиоприемном тракте (рис. 1) радиотелескопа РА-ТАН-600 для двух частотных каналов.

Увеличение частоты переключения приводит к увеличению выделяемой тепловой мощности, что создает проблемы для использования переключателей в криостате.

Уменьшение длительности импульсов управления требует повышения их амплитуды для достижения необходимой развязки 20 дБ.

Библиографический список

1. Краус, Дж. Д. Радиоастрономия / Дж.Д. Краус. – М.: Сов. радио, 1973. – 456 с.
2. Бирюков, С.А. Применение цифровых микросхем серии ТТЛ и КМОП / С. А. Бирюков. – М.: Изд-во ДМК, 2000. – 240 с.

*Дата поступления
в редакцию 13.02.2015*

V.V. Biryukov, S.Y. Zakharov, V. A. Malakhov, A.S. Raevskii

THE CONTROL UNIT FOR A FERRITE SWITCH OF THE RADIO-RECEIVING CHANNEL FOR A CRYOGENIC RADIOMETER

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The development of the control unit for a ferrite switch of the radio-receiving channel for a cryogenic radiometer.

Design/methodology/approach: Circuit solution for the control unit for a ferrite switch using unipolar pulses.

Findings: The proposed circuit solution of the control unit allows you to get the desired switching characteristics applicable to the ferrite waveguide switches that are used in the receiving path.

Research limitations/implications: These results provide a starting point for the development of search techniques of the unipolar control of ferrite switches.

Originality/value: Circuit solution for the control unit for a ferrite switch.

Key words: ferrite switch, the driver of the ferrite switch for a receiving path, the control unit, a cryogenic radiometer.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

П.С. Мошков, Р.А. Мусарский, И.А. Суворов, Е.И. Торопов

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ РАСХОДА ТОПЛИВА ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Излагается методика проведения испытаний по оценке расхода топлива лёгкого коммерческого автомобиля, относящегося к транспортным средствам категории N1. Затрагивается вопрос экспериментального исследования и оценки расхода топлива автомобиля применительно к конкретному маршруту движения, его особенностям, определенным климатическим условиям и стилю работы водителя.

Ключевые слова: расход топлива, легкий коммерческий автомобиль, топливная экономичность.

Из параметров, характеризующих мощностные показатели автомобиля, в центре внимания длительное время оставались максимальная скорость и время разгона. Ощутимый рост цен на топливо привел к тому, что особое внимание стали уделять расходу топлива. Очевидно, что тягово-скоростные свойства и свойства топливной экономичности связаны обратной зависимостью. Это означает, что улучшение показателей одних из свойств, приводит к снижению других [1-4]. При разработке нового автомобиля одной из важнейших целей является получение минимального расхода топлива при сохранении необходимой динамики движения, т.е. оптимальное сочетание указанных свойств [5].

Проведение испытаний по оценке расхода топлива предполагает выполнение следующих этапов:

1. На первом этапе исследований необходимо выбрать маршрут движения, соответствующий цели испытаний, предназначению автомобиля и т.д. Маршрут включает в себя один участок с определенной категорией эксплуатации, а также несколько участков с характерными особенностями движения, что позволит провести сравнительный анализ для различных условий и выявить взаимосвязь влияющих факторов и режимов работы. Увеличение количества заездов и длины маршрута усредняет и уточняет результаты анализа.

2. Подготовительные мероприятия перед испытаниями включают установку измерительной аппаратуры и подготовку непосредственно автомобиля. Измерительная аппаратура не должна влиять на работу узлов автомобиля, должна обеспечивать запись параметров на электронные носители в режиме реального времени без задержек, с минимально-возможным периодом фиксации и максимальной точностью.

3. Главная задача этапа сбора экспериментальных данных – зафиксировать с минимальной периодичностью по времени необходимые параметры, а также з границы характерных участков на маршруте, для чего может быть использован видеорегистратор с установленным временем. Уменьшение периодичности фиксации данных приводит к уточнению результатов, несколько увеличивая время обработки и анализа. Для приведения к единому времени и исключению ошибок несоответствия данных необходимо точное определение моментов времени фиксации каждого параметра.

4. Этап обработки данных включает компиляцию информации, полученной в ходе за-

езда, и известных технических данных автомобиля и его агрегатов, затем анализ скоростных и нагрузочных режимов. Формирование данных о цикле движения подразумевает статистическую обработку данных о скорости движения автомобиля, а также построение макропрофиля маршрута по GPS/ГЛОНАСС данным о высоте над уровнем моря. Эти параметры можно считать основными независимыми характеристиками маршрута, принимая, что выбор скорости движения обусловлен преимущественно внешними факторами (скоростью транспортного потока, дорожной обстановкой, разрешенной максимальной скоростью движения).

5. Выводы по результатам испытаний содержат характеристику режима движения на маршруте как принятого независимого фактора, выявленные особенности режимов работы трансмиссии и обнаружение взаимосвязей между условиями движения и РРТ.

Для проведения заездов, в ходе которых должны быть получены экспериментальные данные, необходимые для дальнейшей обработки и анализа, был выбран маршрут, показанный на рис. 1. В целом он соответствует III категории условий эксплуатации автомобиля, а именно: условия движения характерны для больших городов с населением свыше 100 тыс. чел.; рельеф местности равнинный (P_1 до 200 м над уровнем моря) или, с учетом количества затяжных подъемов и спусков, слабохолмистый (P_2 до 300 м над уровнем моря); группы дорог D_2 (из битумоминеральных смесей (асфальт), в том числе со щебнем и гравием, из холодного асфальтобетона). Маршрут круговой, т.е. точки начала и конца маршрута совпадают; проходит как в нижней, так и в верхней частях города, имеет протяженность 43,6 км.

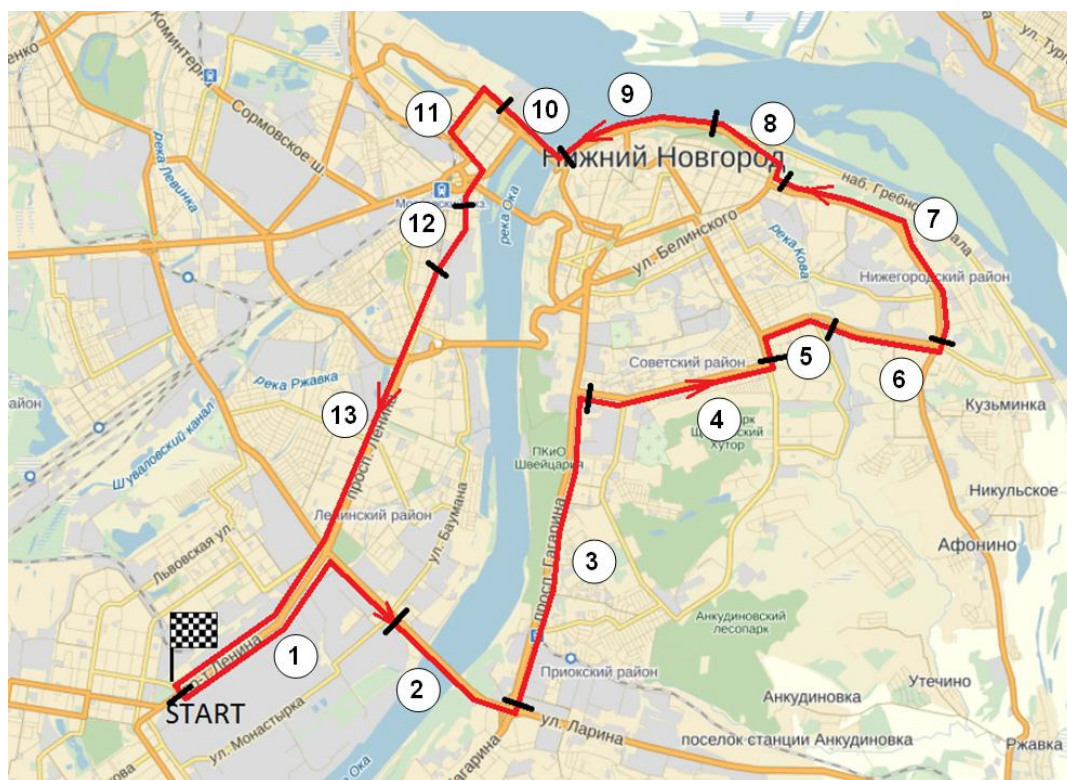


Рис. 1. Маршрут движения автомобиля

Маршрут условно разбит на 13 участков. Участки 3 – 9 проходят по нагорной части города, участки 1, 11 – 13 – в заречной части, участки 2 и 10 соответствуют движению по мостам через р. Оку. Основная часть маршрута пролегает по магистральным дорогам регулируемого движения, магистральным улицам общегородского значения регулируемого движения. На участках маршрута 1, 11, 12, 13, 9 (суммарная протяженность 20,3 км) отсутствуют уклоны, колебания высот лежат в пределах 10 м. Остальная часть маршрута (участки 2 – 8, 10; 23,3 км) имеют значительные перепады высот (более 100 м), затяжные (до 2500 м) подъемы и спуски.

Таким образом, маршрут соответствует одному из наиболее часто встречающихся условий движения легких коммерческих автомобилей в крупных городах. В зависимости от необходимости исследования тех или иных условий движения маршрут может быть скорректирован в соответствии с характерными особенностями района эксплуатации. Также может быть выбран комплексный маршрут, включающий несколько характерных участков, имеющих различные условия движения. При обработке данных эксперимента на таком маршруте следует провести как общий анализ, так и отдельно для каждого из участков. Это позволит выявить влияние тех или иных факторов на исследуемые режимы работы трансмиссии и двигателя.

Для организации записи данных в ходе движения по маршруту было использовано оборудование Центра коллективного пользования «Транспортные системы» НГТУ [6].

Был произведен пробный заезд по выбранному маршруту на автомобиле ГАЗель «Next». При проведении испытаний при помощи специального оборудования в автоматическом режиме формировалась таблица данных. Фиксация параметров проводилась с периодичностью в одну секунду на протяжении всего маршрута. В результате был сформирован xls-файл, имеющий вид таблицы, в которой каждая строка содержит значения записываемых параметров в каждую секунду нахождения автомобиля на маршруте. Движение по испытательному маршруту занимает достаточно большой промежуток времени, поэтому в табл. 1 приведен фрагмент данных.

Таблица 1

Результаты дорожных испытаний

N (с)	Скорость транспортного средства, км/ч	Частота вращения коленчатого вала ДВС, мин ⁻¹	Процент действия педали акселератора, %	Процент загрузки ДВС, %	Рабочее состояние системы управления двигателем	Управляемый расход топлива, л/ч	Положение педали тормоза, нажат (Н)/отпущен (О)	Положение педали сцепления, нажат (Н)/отпущен (О)
1	0	750	0	7	Состояние регулятора низких оборотов	3,69	Н	О
...
1878	33	1460	37	29	Автомобильный регулятор	8,13	О	О
1879	33	1462	43	34	Автомобильный регулятор	13,62	О	О
1880	33	1430	44	38	Автомобильный регулятор	9,39	О	О
1881	34	1460	44	37	Автомобильный регулятор	10,03	О	О
...
6097	0	752	0	4	Состояние регулятора низких оборотов	4,01	О	Н

Основываясь на исходных данных о скорости автомобиля, была составлена диаграмма, показывающая скоростной режим движения на маршруте (рис. 2). Также была получена доля времени движения автомобиля на различных передачах.

Характерным показателем движения на маршруте может быть среднее ускорение и замедление, которое определяется как накопленное число роста и падения скорости на маршруте к общему времени движения. Чем больше данная величина, тем более динамич-

ными являются условия движения, то есть такими условиями, которые требуют частых ускорений и замедлений автомобиля. На представленном маршруте данная величина составила $0,185 \text{ м/с}^2$. Если же в расчет ускорений включать только промежутки времени изменения скорости автомобиля, то среднее ускорение составит $0,606 \text{ м/с}^2$, а замедление – $0,649 \text{ м/с}^2$, соответственно доля времени движения с ускорением – 30,1%, с замедлением – 28,6%. Распределение времени эксплуатации ТС на маршруте представлено на рис. 3.

Таким образом, проведенный анализ позволяет получить представление о скоростных режимах работы двигателя и трансмиссии в данных условиях движения.

Запрашиваемая водителем с ДВС мощность (именно мощность, так как она, в отличие от крутящего момента, передается на колеса автомобиля независимо (если не принимать во внимание незначительное изменение КПД трансмиссии) от передаточных чисел) обоснована дорожной обстановкой и получением необходимой отдачи от автомобиля (ускорение, движение с постоянной скоростью, преодоление уклонов). Все дальнейшие действия сохраняют этот параметр неизменным для сохранения динамичности автомобиля и удовлетворения водителя. То есть решается задача минимизации расхода топлива при полном сохранении динамики движения. Два параметра (V , N) считаем исходными и определяемыми конкретной дорогой, обстановкой на ней и желанием водителя. Минимизируемая величина – расход топлива.

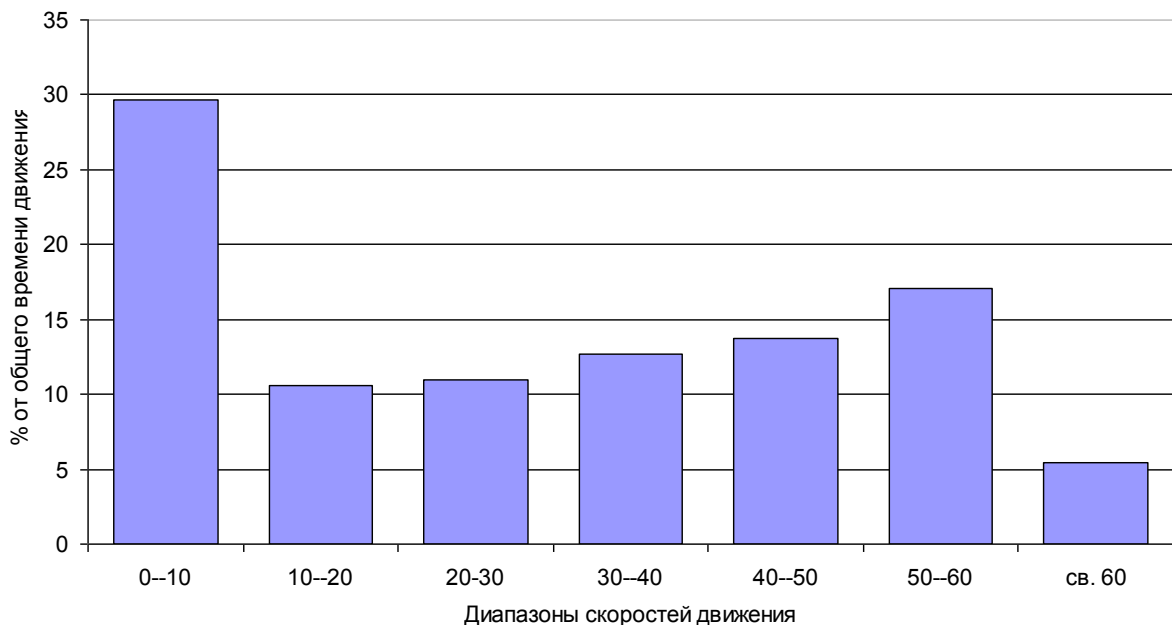


Рис. 2. Доля времени движения автомобиля в разных диапазонах скоростей

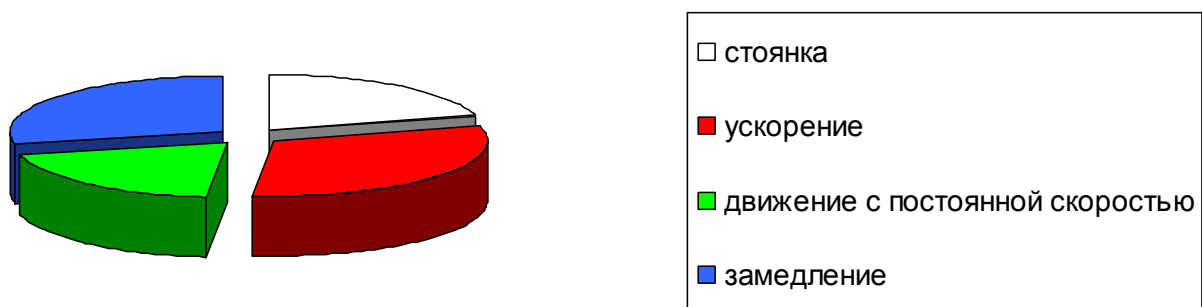


Рис. 3. Распределение времени на маршруте

Дальнейшие действия можно представить следующим: произвести поиск передачи (из имеющихся), которая обеспечила бы меньший расход топлива при сохранении мощности ДВС (то есть динамики авто):

- по скорости авто определяем ЧВКВ ДВС на каждой передаче;
- определяем загрузку ДВС (%) для реализации им той же мощности (если реализация той же мощности на какой-то передаче (то есть ЧВКВ) невозможна, то исключаем этот режим);
- зная загрузку ДВС и ЧВКВ, по таблице методом билинейной интерполяции определяем удельный расход топлива для каждой передачи;
- выбираем передачу, на которой возможно реализовать ту же мощность, но с меньшим удельным расходом.

Решение данных пунктов будет являться целью дальнейших расчетно-экспериментальных исследований.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0006 от 12.02.2013 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).

Библиографический список

1. Литвинов А.С. Теория эксплуатационных свойств автомобиля / А. С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение. 1989. – 237 с.
2. Кравец, В.Н. Теория автомобиля / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт+», 2011. – 884 с.
3. Кравец В.Н. Влияние макропрофиля дороги на показатели тягово-скоростных свойств автомобиля / В.Н. Кравец, Р.А. Мусарский // Вестник ИжГТУ. 2014. №3. С. 42–53.
4. Мусарский, Р.А. Структурный и фрактальный анализ макропрофилей дорог // Автомобильная промышленность. 2014. №2. С. 21–23.
5. Огороднов, С.М. Исследование расхода топлива легкового коммерческого автомобиля «Газель Next» экспериментальным методом / С.М. Огороднов, А.Н. Тихомиров, Д.В. Шаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №2 (104). С. 131–139.
6. ЦКП «Транспортные системы» [электронный ресурс] URL: <http://www.its.nntu.ru/sciense/ckp-ts>

*Дата поступления
в редакцию 29.01.2015*

P.S. Moshkov, R.A. Musarsky, I.A. Suvorov, E.I. Toropov

THE METHODOLOGY OF TESTING OF LIGHT COMMERCIAL VEHICLE FOR FUEL CONSUMPTION ESTIMATION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The development of testing methodology for estimation of light commercial vehicles fuel consumption.

Design/methodology/approach: The study based on experimental data that were received in a real city traffic condition.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of light commercial vehicles fuel economy characteristics on the basis of real road test results.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of estimation of vehicles fuel economy.

Originality/value: The main peculiarity of the study is original approach of real road tests of light commercial vehicles that could have a good practical application for further optimisation.

Key words: fuel consumption, light commercial vehicle, fuel economy.

УДК 629.113

А.А. Васильев, Е.В. Степанов, С.Ю. Костин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОСЕЙ ПОЛУПРИЦЕПА НА СВОЙСТВА УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ АВТОПОЕЗДА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ MSC.ADAMS/CAR

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследований свойств управляемости и устойчивости автопоезда в составе тягача категории N_3 и полуприцепа категории O_4 массой 40,5 т. Компьютерное моделирование выполнено в программном комплексе MSC.ADAMS/CAR лицензионного пакета University MD FEA Bundle, переданного в НГТУ компанией MSC.Software GmbH в рамках соглашения о стратегическом сотрудничестве.

Ключевые слова: автопоезд, моделирование, управляемость, устойчивость, отрыв колеса.

Повышение активной безопасности транспортных средств является актуальной и значимой проблемой в автомобилестроении, при этом особое внимание традиционно уделяется повышению свойств управляемости и устойчивости [1]. Все большее значение при выполнении работ, направленных на повышение активной безопасности автотранспортных средств, приобретает имитационное моделирование [2, 3]. Моделирование представляет процесс конструирования на ЭВМ модели сложной реальной системы, функционирующей во времени, и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы [4].

В данной работе представлены результаты моделирования сертификационного испытания «переставка», предусмотренного ГОСТ Р 52302-2004 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания» [6].

В качестве программного комплекса для проведения исследований был выбран программный комплекс MSC.ADAMS/CAR лицензионного пакета University MD FEA Bundle, обладающий значительным функционалом и имеющий широкий спектр возможностей:

- моделирование транспортного средства с учетом ключевых конструктивных параметров, оказывающих влияние на динамику движения;
- моделирование автомобильных шин с использованием специального модуля ADAMS/tire, обеспечивающего учет жесткостных и демпфирующих свойств покрышки;
- возможность задания типовых управляющих воздействий на органы управления;
- обеспечение высококачественной текстурированной трехмерной визуализации;
- вывод графиков измеряемых величин (в частности, скорости, нормальных реакций на колесах, углов увода и пр.).

Объектом исследования являлся автопоезд в составе тягача категории N_3 и полуприцепа категории O_4 массой 40,5 т. В качестве аналога был выбран полуприцеп, разработанный специалистами голландской фирмы Welgro [7], имеющий три оси. Полуприцеп Welgro представлен в двух исполнениях: без поворотной оси и с задней поворотной осью (рис 1 и рис 2). Во втором исполнении полуприцеп имеет заднюю управляемую ось, т.е. обеспечивающую поворот колес оси при повороте на определенный угол, в зависимости от кривизны траектории (рис. 3). В качестве тягача автопоезда выбран автомобиль DAF, информация о конструктивных особенностях которого получена с официального сайта компании DAF [8]. Остальные параметры автопоезда приняты по результатам аналитических расчетов, проведенных специалистами НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

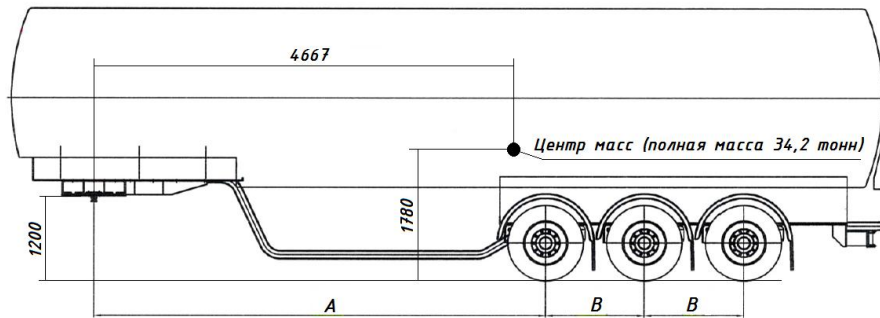


Рис. 1. Схема полуприцепа Welgro без управляемой оси

Таблица 1

Диапазоны размеров полуприцепа без управляемой оси

Размер	Минимум	Максимум
A, мм	4500	6800
B, мм	1360	2000

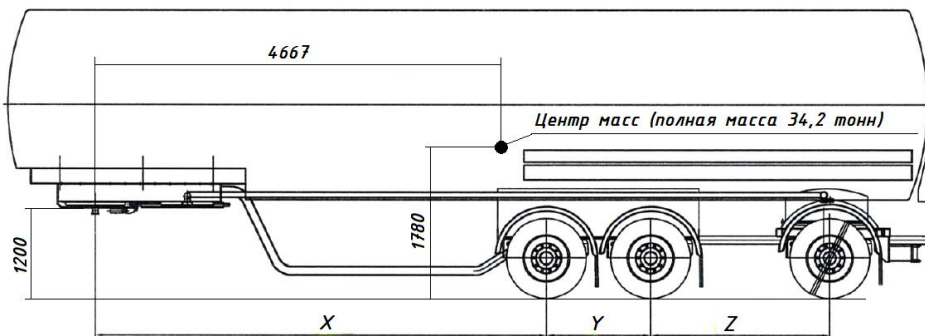


Рис. 2. Схема полуприцепа Welgro с задней управляемой осью

Таблица 2

Диапазоны размеров полуприцепа с управляемой осью

Размер	Минимум	Максимум
X, мм	4500	6800
Y, мм	1360	1810
Z, мм	1500	3000

Полуприцеп Welgro без управляемой оси имеет варьируемые размеры: A – расстояние между соединительным шкворнем и первой осью полуприцепа, B – расстояние между осями полуприцепа. Диапазон изменения размеров A и B представлен в табл. 1.

Полуприцеп Welgro с управляемой осью также имеет варьируемые размеры: X – расстояние между соединительным шкворнем и первой осью полуприцепа, Y – расстояние между первой и второй осью, Z – расстояние между второй и третьей (управляемой) осью полуприцепа. Диапазон изменения размеров X, Y, Z представлен в табл. 2.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 52302-2004 наиболее значимыми являются результаты динамических испытаний (определение критической скорости совершения маневров: вход в поворот и смена полосы движения).

На рис. 4 показана схема созданного виртуального полигона, представляющего собой набор определенных участков, необходимых для имитации условий сертификационных испытаний (смена полосы движения) в соответствии с ГОСТ Р 52302-2004.

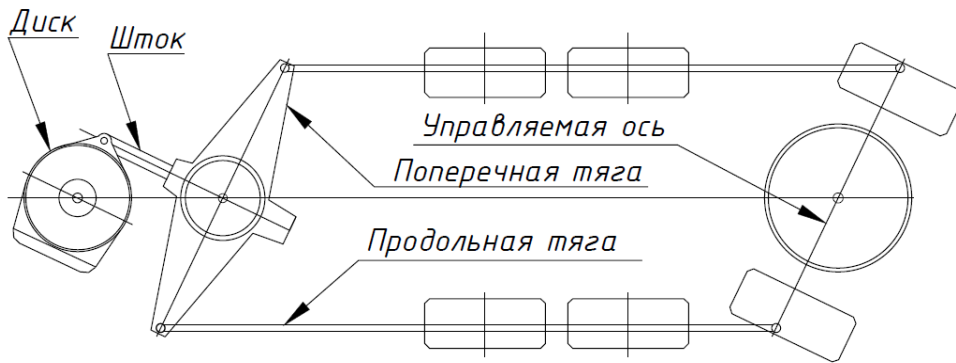


Рис. 3. Схема поворотного устройства полуприцепа Welgro

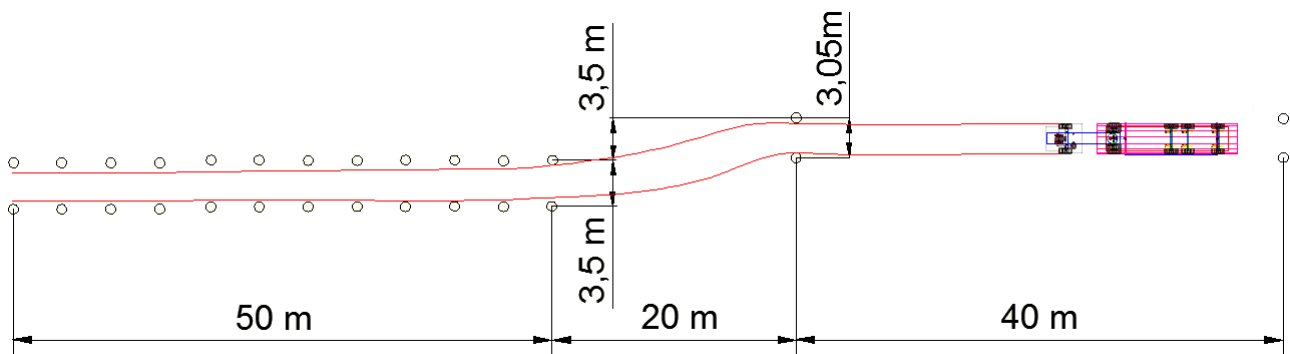


Рис. 4. Схема виртуального полигона для имитации испытания «смена полосы движения»

На рис. 5 показана модель автопоезда, учитывающая основные конструктивные параметры: развесовку, расположение высот центров тяжести тягача и полуприцепа, кинематику и упруго-демпфирующие свойства подвесок и пр.

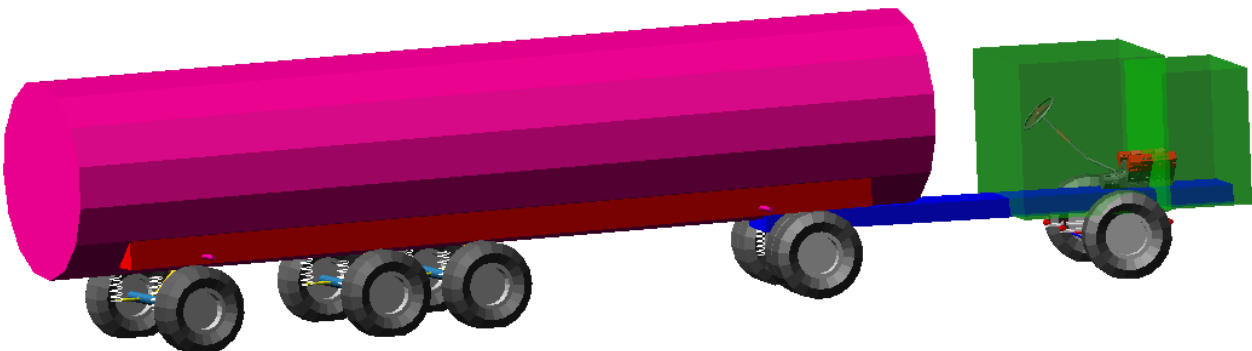


Рис. 5. Схема модели автопоезда (тягач DAF, полуприцеп Welgro) в ADAMS/Car

Моделирование сертификационного испытания смены полосы движения осуществлялось на скорости 52 км/ч, регламентированной для седельных автопоездов [6].

Целью исследования является нахождение наиболее рациональных сочетаний размеров, представленных в табл. 1 и 2, а также изучение влияние наличия поворотной оси на свойства управляемости и устойчивости седельного автопоезда. Другими словами, определялось какие размеры необходимо применить (сочетание размеров A и B для полуприцепа без управляемой оси; сочетание размеров X, Y, Z для полуприцепа с управляемой осью) для того, чтобы автопоезд удовлетворял требованиям ГОСТ Р 52302-2004 при прохождении маневра «переставка», а именно: автопоезд должен пройти маневр на скорости не менее 52 км/ч

при этом ни одна из частей автопоезда не должна выходить за пределы габаритного коридора движения (см. рис. 4) и ни одно из колес транспортного средства не должно отрываться от опорной поверхности дорожного полотна.



Рис. 6. Автопоезд в составе тягача DAF и полуприцепа Welgro

Для полуприцепа без управляемой оси:

Имеем размеры A и B . Размер A принимает следующие значения: (4500, 4900, 5300, 5500, 5700, 6000, 6400, 6800 мм). Размер B принимает значения: (1360, 1500, 1750, 2000 мм). Зафиксируем размер $B = 1360$ мм. При фиксированном размере B размер A последовательно принимает значения (4500, 4900, 5300, 5500, 5700, 6000, 6400, 6800 мм). Получаем массив возможных конфигураций полуприцепа, представленных в табл. 3.

Таблица 3

Массив конфигураций полуприцепа без управляемой оси при $B=1360$ мм

$A \backslash B$	4500	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1360	конф.1.1	конф.1.2	конф.1.3	конф.1.4	конф.1.5	конф.1.6	конф.1.7	конф.1.8

Далее алгоритм повторяется для других значений размера B (1500, 1750, 2000 мм).

Таким образом, получаем двумерный массив из возможных конфигураций полуприцепа без управляемой оси. Каждая ячейка табл. 4 отвечает за определенную конфигурацию полуприцепа Welgro.

Таблица 4

Массив конфигураций полуприцепа без управляемой оси

$A \backslash B$	4500	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1360	конф.1.1	конф.1.2	конф.1.3	конф.1.4	конф.1.5	конф.1.6	конф.1.7	конф.1.8
1500	конф.2.1	конф.2.2	конф.2.3	конф.2.4	конф.2.5	конф.2.6	конф.2.7	конф.2.8
1750	конф.3.1	конф.3.2	конф.3.3	конф.3.4	конф.3.5	конф.3.6	конф.3.7	конф.3.8
2000	конф.4.1	конф.4.2	конф.4.3	конф.4.4	конф.4.5	конф.4.6	конф.4.7	конф.4.8

На рис. 7 изображены некоторые конфигурации полуприцепа без управляемой оси с указанием размеров A и B . Наглядно показано, что каждой ячейке табл. 4 соответствует конфигурация полуприцепа с конкретными размерами.

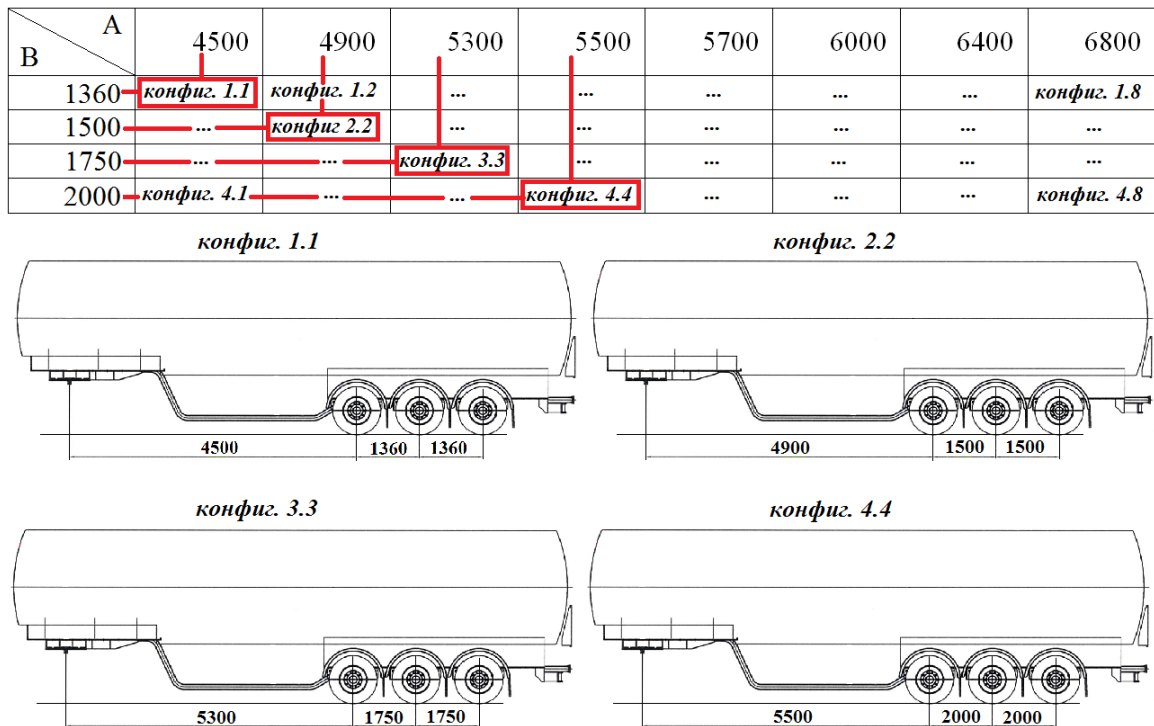


Рис. 7. Графическая интерпретация различных конфигураций полуприцепа Welgro без управляемой оси

Для полуприцепа с управляемой осью:

Имеем размеры X , Y и Z . Размер Y принимает следующие значения: (1360, 1500, 1810 мм). Размер X принимает значения: (4500, 4900, 5300, 5500, 5700, 6000, 6400, 6800 мм). Размер Z принимает значения: (1500, 2000, 2500, 3000 мм). Зафиксируем размер $Y=1360$ мм. При этом размер X принимает значения: (4500, 4900, 5300, 5500, 5700, 6000, 6400, 6800 мм). А размер Z принимает значения: (1500, 2000, 2500, 3000 мм).

При фиксированном размере $Y=1360$ мм. Повторяем описанный ранее алгоритм. В итоге получаем двумерный массив из возможных конфигураций полуприцепа с управляемой осью. Далее фиксируем размер Y на значениях 1500 мм и 1810 мм.

Окончательно получаем три двумерных массива из возможных конфигураций полуприцепа с управляемой осью.

Таблица 5

Массив конфигураций полуприцепа с управляемой осью при $Y=1360$ мм (аналогично для $Y=1500$ мм и $Y=1810$ мм)

$X \backslash Z$	4500	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1500	конф.1.1	конф.1.2	конф.1.3	конф.1.4	конф.1.5	конф.1.6	конф.1.7	конф.1.8
2000	конф.2.1	конф.2.2	конф.2.3	конф.2.4	конф.2.5	конф.2.6	конф.2.7	конф.2.8
2500	конф.3.1	конф.3.2	конф.3.3	конф.3.4	конф.3.5	конф.3.6	конф.3.7	конф.3.8
3000	конф.4.1	конф.4.2	конф.4.3	конф.4.4	конф.4.5	конф.4.6	конф.4.7	конф.4.8

На рис. 8 изображены некоторые конфигурации полуприцепа с управляемой осью с указанием размеров X и Z . Наглядно показано, что каждой ячейке табл. 5 соответствует конфигурация полуприцепа с конкретными размерами.

В реальных условиях эксплуатации углы увода могут достигать $7...8^\circ$, а в некоторых случаях даже $10...12^\circ$. Такие углы увода соизмеримы с углами поворота управляемых колес, по-

этому они оказывают значительное влияние на кинематику поворота и определяют поведение автомобиля при криволинейном движении. Значение угла увода автомобильного колеса зависит от величины, приложенной к нему боковой силы и боковой эластичности шины.

X \ Z	4500	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1500	конфиг. 1.1	конфиг. 1.2	...	...	...	...	...	конфиг. 1.8
2000	...	конфиг. 2.2	...	...	...	...	...	...
2500	...	...	конфиг. 3.3	...	...	...	...	...
3000	конфиг. 4.1	...	...	конфиг. 4.4	...	...	...	конфиг. 4.8



Рис. 8. Графическая интерпретация различных конфигураций полуприцепа Welgro с управляемой осью

Многочисленными экспериментами установлена характерная зависимость угла увода от боковой силы, показанная на рис. 9. На приведенной кривой можно выделить три характерных участка. На участке $0-1$ угол увода линейно зависит от боковой силы. Здесь увод колеса происходит только за счет упругой деформации элементов шины. Линейная зависимость сохраняется при углах увода δ_0 , не превышающих в среднем $1,4...2^\circ$. На участке $1-2$ явление увода сопровождается проскальзыванием элементов шины, расположенных в задней части контакта и наиболее нагруженных в боковом направлении. Чем больше боковая сила, тем значительней длина линии контакта, скользящей по опорной поверхности. Это приводит к нарушению линейной зависимости между боковой силой и углом увода. В точке 2 боковая сила F_y достигает максимального значения. Условно боковое перемещение колеса под действием силы F_y на участке $0-2$ называют *боковым уводом*, а на участке $2-3$ – *боковым скольжением*. Величина угла, при котором начинается боковое скольжение, на сухой твердой опорной поверхности составляет $12...20^\circ$ [5, с. 382].

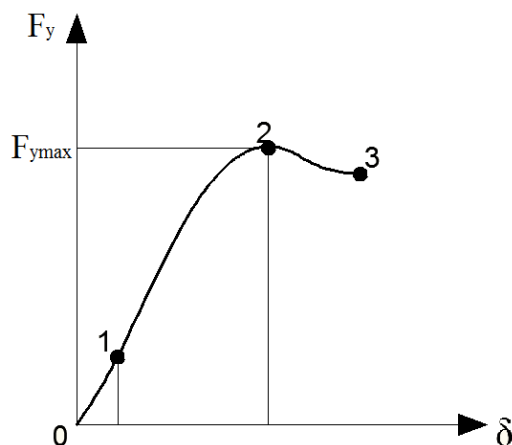


Рис. 9. Зависимость боковой силы от угла увода

Оценка максимальной величины угла бокового увода шин полуприцепа при прохождении испытания «переставка $S_n = 20$ м»

Диапазон углов увода	
	Более 15 [град]
	11-15 [град]
	7-11 [град]

Для полуприцепа с управляемой осью:

Таблица 6
Оценка углов бокового увода шин полуприцепа при $Y = 1360$ [град]

Z \ X	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1500	24	14	13	12	10	9	8,5
2000	18	13	12	11	9,5	8,5	8
2500	15	12	10,5	10	9	8	7,5
3000	13	11	10	9,5	9	7,5	7

Таблица 7
Оценка углов бокового увода шин полуприцепа при $Y = 1500$ [град]

Z \ X	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1500	22	13,5	12,5	8,5	10	9	7,5
2000	16	12,5	11,5	9	9,5	8,5	7
2500	13,5	11,5	10,5	8,5	9	8	7
3000	11,5	11	10	8	8,5	7,5	7

Таблица 8
Оценка углов бокового увода шин полуприцепа при $Y = 1810$ [град]

Z \ X	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1500	15,5	12	11	10,5	9,5	9	9
2000	13	11	10,5	9,5	9	8,5	8,5
2500	11,5	10,5	10,5	9,5	8,5	8	8
3000	10	10	9,5	9	8	7,5	7,5

Для полуприцепа без управляемой оси:

Таблица 9
Оценка углов бокового увода шин полуприцепа без управляемой оси [град]

B \ A	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1360	14,5	12,5	11	10	8,5	7,5
1500	12,5	11,5	10,5	10	9,5	9
1750	11,5	11,5	10,5	10	9,5	9
2000	11,5	11	10,5	10	9,5	9

*Оценка свойств управляемости и устойчивости полуприцепа
при прохождении испытания «переставка $S_n=20$ м»*

Система оценок:

	Испытание не пройдено: Произошел отрыв хотя бы одного из колес автопоезда и/или выход за габаритный коридор какой-либо точки автопоезда
	Близко к прохождению: 1. Отсутствие отрыва хотя бы одного из колес автопоезда 2. Незначительный выход за габаритный коридор какой-либо точки автопоезда
	Испытание пройдено: 1. Отсутствие отрыва колес автопоезда 2. Отсутствие выхода за габаритный коридор любой из точек автопоезда

Для полуприцепа с управляемой осью:

Таблица 10

Оценка свойств управляемости и устойчивости полуприцепа при $Y = 1360$

$Z \backslash X$	4500	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1500								
2000								
2500								
3000								

Таблица 11

Оценка свойств управляемости и устойчивости полуприцепа при $Y = 1500$

$Z \backslash X$	4500	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1500								
2000								
2500								
3000								

Таблица 12

Оценка свойств управляемости и устойчивости полуприцепа при $Y = 1810$

$Z \backslash X$	4500	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1500								
2000								
2500								
3000								

Для полуприцепа без управляемой оси:

Таблица 13

Оценка свойств управляемости и устойчивости полуприцепа без управляемой оси

$B \backslash A$	4500	4900	5300	5500	5700	6000	6400	6800
1360								
1500								
1750								
2000								

Примечание: моделирование испытания для сравнения показателей управляемости и устойчивости было произведено при скорости транспортного средства 52 км/ч. Полная масса тягача с полуприцепом – 40,5 т.

2000

Библиографический список

1. **Бахмутов, С.В.** Совершенствование метода интегральных силовых диаграмм для оценки управляемости и устойчивости автомобиля / С.В. Бахмутов, А.А. Ахмедов, А.Б. Орлов // Известия МГТУ «МАМИ». 2011. № 1 (11). С. 22–26.
2. **Дыгало, В.Г.** Применение виртуально-физической технологии моделирования для проектирования систем активной безопасности / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Безопасность транспортных средств в эксплуатации: сб. материалов 79-й Международной научно-технической конференции «Ассоциации автомобильных инженеров» /НП «ИНСАТ». Н.Новгород, 2012. С. 55–63.
3. **Грошев, А.М.** Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / А.М. Грошев, В.Г. Дыгало, А.В. Тумасов [и др.] // Журнал ААИ. 2011. №2. С. 34–37.
4. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 415 с.
5. **Кравец В. Н.** Теория автомобиля: учебник для вузов / В.Н. Кравец, В.В. Селифанов. – М.: ООО «Гринлайт+», 2011. – 884 с.
6. **ГОСТ Р 52302-2004.** Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытания. – М., 2004.
7. <http://www.welgro.nl> (дата обращения 01.10.2013)
8. <http://www.daf.com> (дата обращения 05.10.2013)

*Дата поступления
в редакцию 29.01.2015*

A.A. Vasiliev, E.V. Stepanov, S.Y. Kostin

RESEARCH OF INFLUENCE OF AXLE ON SEMITRAILER ON THE PROPERTIES OF CONTROL AND STABILITY OF TANK TRAIN IN MSC.ADAMS/CAR SOFTWARE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Estimating of tank train behavior in lane changing conditions that are regulated by GOST R 52302-2004 on the basis of computer simulation results.

Design/methodology/approach: The simulation study based on dynamic analysis method with using of MSC.ADAMS/CAR software that allows taking into account main vehicle parameters, road conditions and driver behavior.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of tank train active safety characteristics on the basis of simulation results.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of tank train safety and estimation of effectiveness of active safety systems components.

Originality/value: The main peculiarity of the study is original approach of computer simulation of tank train behavior that could have a good practical application.

Key words: tank train, simulation, steer ability, stability, cornering breakaway.

УДК 629.113

Д.А. Бутин, В.В. Беляков, К.О. Гончаров

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СПОРТИВНОГО АВТОМОБИЛЯ КЛАССА
“FORMULA STUDENT” ПО ТРАЕКТОРИИ ПОСТОЯННОЙ КРИВИЗНЫ
С КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТЬЮ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ
MSC.ADAMS/CAR**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований свойств активной безопасности спортивного автомобиля класса “formula student”. Компьютерное моделирование выполнено в программном комплексе MSC.ADAMS/CAR лицензионного пакета University MD FEA Bundle, переданного в НГТУ компанией MSC.Software GmbH в рамках соглашения о стратегическом сотрудничестве.

Ключевые слова: спортивный автомобиль, моделирование, управляемость, активная безопасность.

Особенностью спортивного автомобиля является оптимизация всех систем и агрегатов под конкретную трассу, с целью получения автомобиля, способного преодолевать контрольный участок за минимальное время. Наибольшее влияние на характеристики автомобиля оказывают параметры подвески. Оптимизация параметров подвески занимает значительную часть времени от всех настроек. Для сокращения времени, затрачиваемого на настройку, все больше применяют имитационное моделирование. Моделирование представляет процесс конструирования на ЭВМ модели сложной реальной системы, функционирующей во времени, и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы [4].

В данной работе представлены результаты моделирования криволинейного движения автомобиля, имитирующего испытание “Skid-Pad”, проводимое в рамках соревнований “Formula Student”.

В качестве программного комплекса для проведения исследований был выбран программный комплекс MSC.ADAMS/CAR лицензионного пакета University MD FEA Bundle, обладающий значительным функционалом и имеющий широкий спектр возможностей:

- моделирование транспортного средства с учетом ключевых конструктивных параметров, оказывающих влияние на динамику криволинейного движения;
- моделирование автомобильных шин с использованием специального модуля ADAMS/tire, обеспечивающего учет жесткостных и демпфирующих свойств покрышки;
- возможность задания типовых управляющих воздействий на органы управления;
- обеспечение высококачественной текстурированной трехмерной визуализации;
- вывод графиков измеряемых величин (в частности, скорости, нормальных реакций на колесах, углов увода и пр.).

Объектом исследования являлся автомобиль категории M1 массой до 500 кг. В качестве аналога был выбран автомобиль, созданный студенческим конструкторским бюро “Amigo”, схема автомобиля приведена на рис. 1.

Моделирование движения транспортного средства в программном комплексе MSC.ADAMS/CAR можно разделить на основные этапы:

1. Создание виртуального полигона

- моделирование дорожного полотна;
- «разметка» участков виртуального испытания в соответствии с требованиями нормативных документов.

2. Создание модели автомобиля
 - создание подсистем и агрегатов транспортного средства;
 - сборка модели транспортного средства из подсистем;
 - задание управляющего воздействия (формирование алгоритма управления транспортным средством).
3. Моделирование криволинейного движения.
4. Анализ и обработка результатов моделирования.

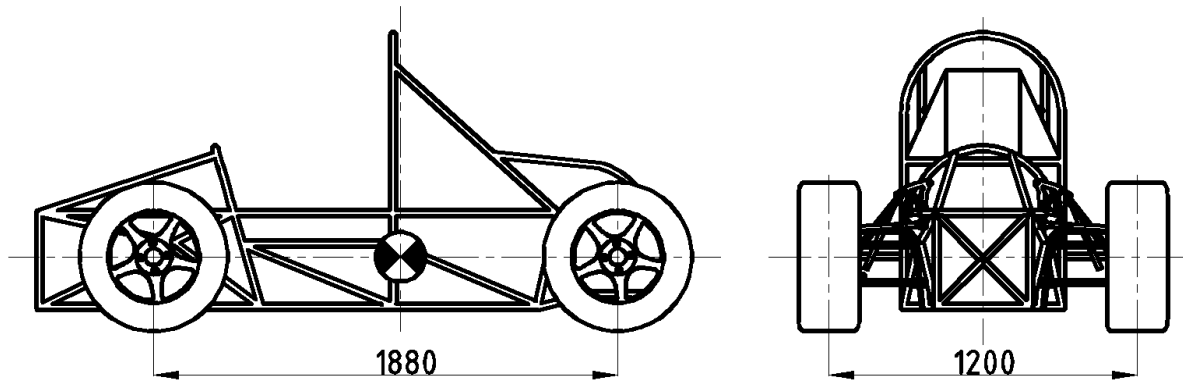


Рис. 1. Схема спортивного автомобиля класса “Formula Student”

В соответствии с требованием регламента наиболее значимыми являются результаты динамического испытания (определение критической скорости движения по траектории постоянной кривизны)

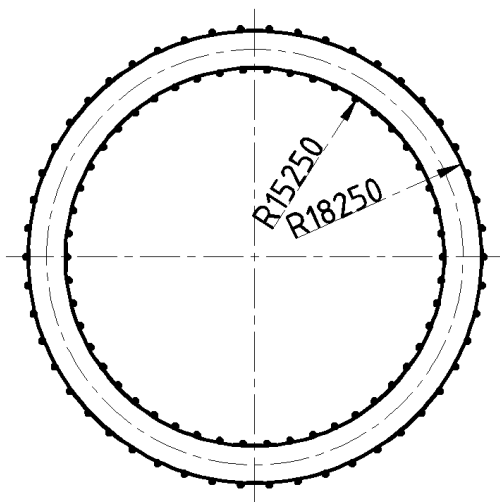


Рис. 2. Схема виртуального полигона для имитации испытания «статическая чувствительность к управлению»

На рис. 2 представлена схема созданного виртуального полигона, необходимого для имитации испытания (движение по траектории постоянной кривизны) в соответствии с регламентом соревнований “Formula Student”.

На рис. 3 представлена модель автомобиля, учитывающая основные конструктивные параметры: расположение центра тяжести, кинематику и упруго-демпфирующие свойства подвесок и пр.

На первом этапе моделирования с целью проверки работоспособности и предварительной оценки адекватности поведения имитационной модели были выполнены тестовые испытания. По результатам данного испытания, можно судить о адекватности реакций автомобиля.

На рис. 4 показано компьютерное моделирование, при котором модель автомобиля движется по испытательному полигону.

На рис. 5 показан фрагмент натуральных испытаний, выполненных на территории авто спортивного комплекса “Нижегородское кольцо”. Сравнительный анализ результатов испытаний с данными имитационного моделирования представлен в табл. 1. Из данных таблицы видно, что расхождение значений критической скорости движения и радиуса траектории составляет менее 1%, что является вполне приемлемым и свидетельствует об адекватном поведении модели и корректном выборе параметров.



Рис. 3. Схема модели спортивного автомобиля класса «Formula Student»

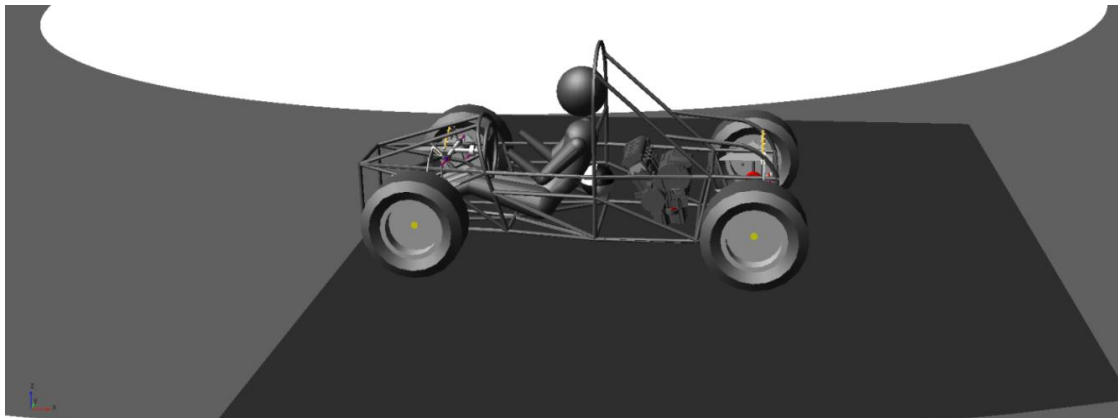


Рис. 4. Имитация испытания «движение по траектории постоянной кривизны»



Рис. 5. Натурное испытание «движение по траектории постоянной кривизны»

Таблица 1

Сравнение результатов натуральных и виртуальных испытаний

Параметр	Натурные испытания	Виртуальное испытание	Расхождение, %
Время прохождения круга, с	6,716	6,571	2,159
Средняя скорость движения, м/с	8,25	8,199	0,61
Среднее боковое ускорение, м/с ²	7,722	7,84	1,52
Средний радиус движения, м	9,117	9,115	0,02

Следующим этапом работы была модернизация подвески и рулевого управления автомобиля на основании теории автомобиля и результатов анализа автомобиля со стандартными узлами.

Основные изменения в конструкции:

- колесная база;
- кинематика направляющего механизма подвески;
- зависимость поворота управляемых колес.

Для оценки влияния изменений на свойства автомобиля, были проведены виртуальные испытания модели с модернизированной подвеской и рулевым управлением.

На рис. 6, 7, 8 изображены графики основных параметров измеряемых при движении моделей автомобиля по испытательному полигону.

Результаты виртуальных испытаний автомобиля со стандартной и модернизированной подвеской и рулевым управлением представлены в табл. 2.

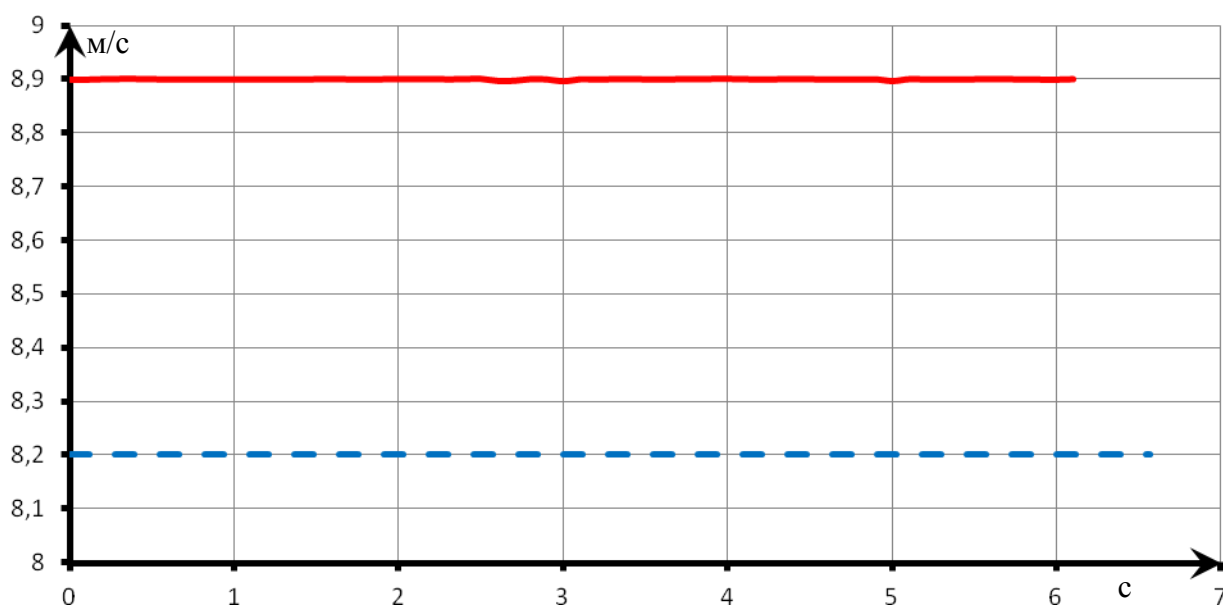


Рис. 6. Скорость продольная АТС:

- АТС с модернизированной подвеской и рулевым управлением;
- АТС со стандартной подвеской и рулевым управлением

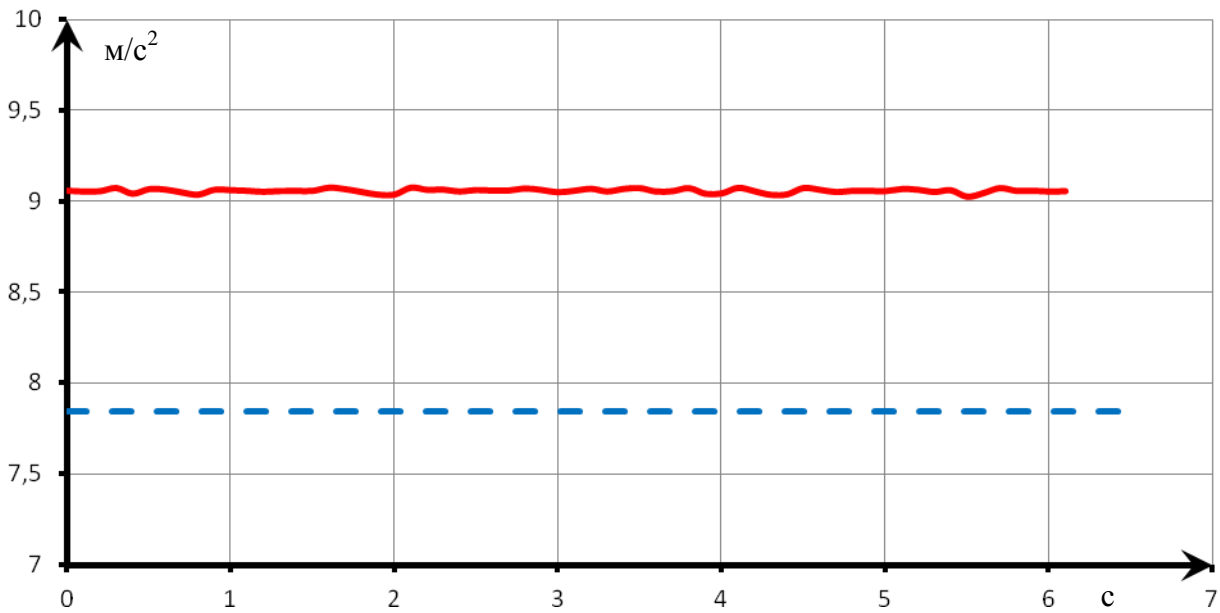


Рис. 7. Графики поперечных ускорений:

- АТС с модернизированной подвеской и рулевым управлением;
- АТС со стандартной подвеской и рулевым управлением

Из табл. 2 видно, что время прохождения контрольного участка уменьшилось почти на пол-секунды, что означает повышение конкурентной способности спортивного автомобиля с модернизированной подвеской и рулевым управлением при участии в соревнованиях класса “Formula Student”. Увеличившееся среднее значение бокового ускорения свидетельствует, о расширении области управляемого движения и о повышении активной безопасности АТС.

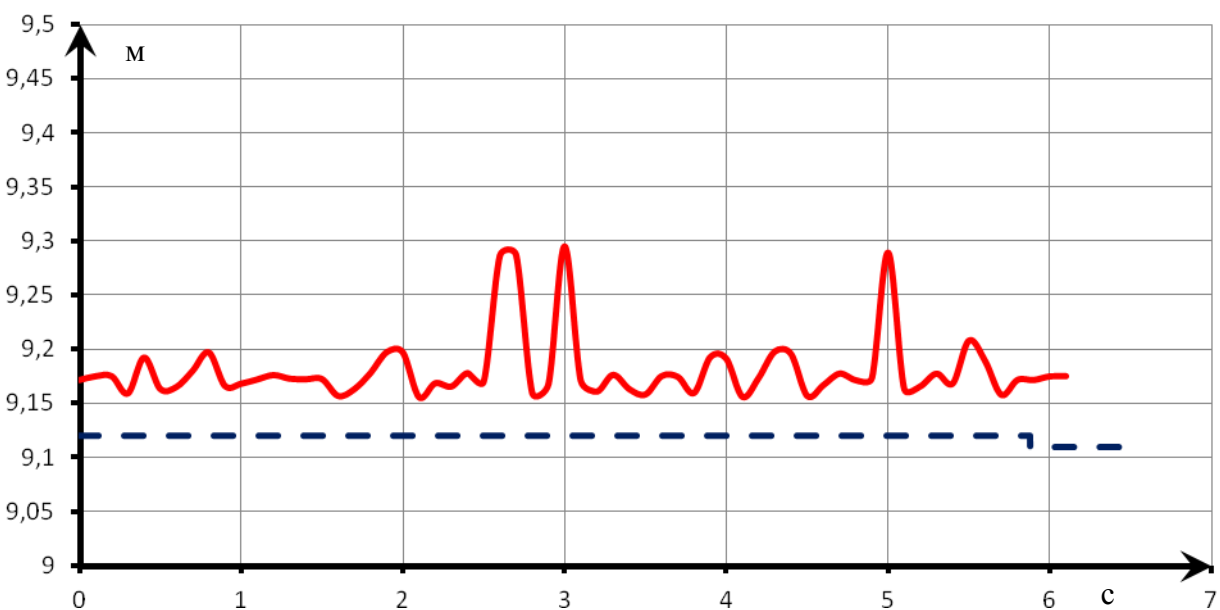


Рис. 8. Графики радиусов кривизны траектории движения ЦМ:

- АТС с модернизированной подвеской и рулевым управлением;
- АТС со стандартной подвеской и рулевым управлением

Таблица 2

Сравнение результатов испытаний

Параметр	АТС со стандартной подвеской	АТС с модернизированной подвеской	Расхождение, %
Время прохождения круга, сек	6,571	6,1	-7,167
Средняя скорость движения, м/с	8,199	8,9	8,549
Среднее боковое ускорение, м/с ²	7,84	9,05	15,433
Средний радиус движения, м	9,115	9,18	-0,713

Библиографический список

1. Проектировочный расчет рулевого управления с маятниковыми рычагами для болида класса Formula Student / Д.А. Бутин, А.В. Гумасов // Будущее технической науки: сб. материалов XII Международной молодежной научно-техн. конференции; НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. С. 142.
2. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз [и др.]; под ред. В.И. Кнороза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.
3. Шасси автомобиля: [сокр. пер. с нем. В.П. Агапова]; под ред. И.Н. Зверева. – М.: Машиностроение, 1983. – 356 с.
4. Шасси автомобиля: Элементы подвески [пер. с нем. А.Л. Карпухина]; под ред. Г.Г. Гридасова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
5. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учеб. пособие / В.Н. Кравец; НГТУ. – Нижний Новгород, 2007. – 362 с.
6. Formula Student Combustion Rules 2014 [электронный ресурс] URL: http://www.formulastudent.de/uploads/media/FSC_Rules_2014_v1.1.0.pdf (дата обращения 30.07.2014)

Дата поступления
в редакцию 29.01.2015

D.A. Butin, V.V. Belyakov, K.O. Goncharov

**SIMULATION MOUTION SPORT CAR CLASS OF “FORMULA STUDENT”
ON CIRCULAR TRACK WITH A DEFINED RADIUS A CRITICAL SPEED IN
MSC.ADAMS/CAR SOFTWARE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose Research of sport car behavior in a "Skid-Pad" motion of the competition "Formula Student" on the basis of computer simulation results and its comparison with experimental data.

Design/methodology/approach The simulation study based on dynamic analysis method with using of MSC.ADAMS/CAR software that allows taking into account main vehicle parameters, road conditions and driver behavior.

Findings It is possible to apply the research results for estimation of sport car active safety characteristics on the basis of simulation results that shows high convergence with experimental data.

Research limitations/implications The present study provides a starting-point for further research in the field of sport car safety and estimation of effectiveness of active safety systems components.

Originality/value The main peculiarity of the study is original approach of computer simulation of sport car behavior that could have a good practical application.

Key words: sport car, simulation, skid-pad, stability, active safety.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.124: 532

П. В. Гуров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ УПРАВЛЯЕМОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДВИЖЕНИЯ БУКСИРУЕМОГО ОБЪЕКТА ЗА БУКСИРОВЩИКОМ НА КРУГОВОЙ ТРАЕКТОРИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Цель: Исследование движения буксируемого объекта по круговой траектории.**Метод:** Использовано математическое моделирование, для анализа движения буксируемого объекта под управляющим воздействием буксирного троса.**Результаты:** Определено влияние гидродинамических характеристик корпуса буксируемого объекта на размер «петли неустойчивости» на диаграмме управляемости. Установлен параметр, уменьшающий границы петли и увеличивающий диапазон устойчивого движения. Отмечена возможность определения необходимой длины буксирной связи, обеспечивающей движение объектов буксирного порядка по одной траектории.**Выводы:** Использование диаграммы управляемости позволяет обозначить границы устойчивого режима движения буксируемого объекта по круговой траектории за буксировщиком.*Ключевые слова:* математическое моделирование, буксируемый объект, диаграмма управляемости, устойчивость движения, траектория.

Рассмотрим установившееся движение буксируемого объекта по круговой траектории на тихой воде, как это показано на рис. 1.

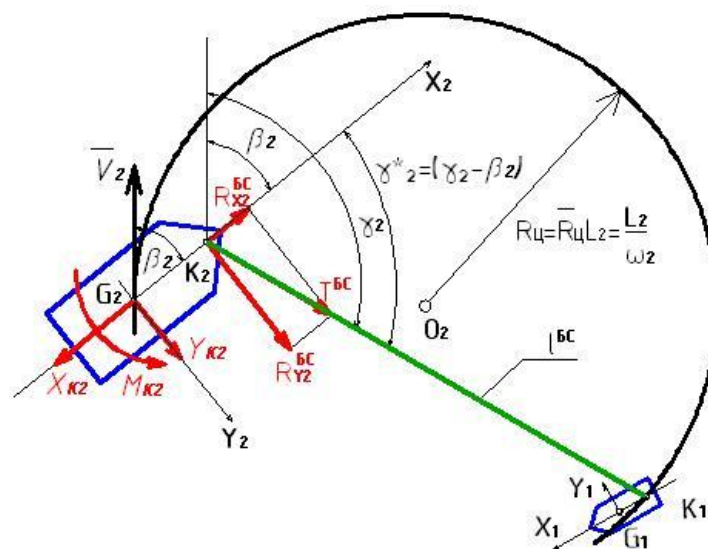


Рис. 1. Круговая циркуляция

Для обозначения величин, характеризующих движение буксируемого объекта, используем индекс 2, для буксировщика – индекс 1. Данное движение будем рассматривать как режим установившейся циркуляции с радиусом $R_{ц}$. Точка K_1 (клюз буксировщика) движет-

ся по круговой траектории так, что угол управления буксирной связью постоянен, т.е. $\gamma_2 = \text{const}$.

Запишем уравнения движения буксируемого объекта в горизонтальной плоскости:

$$\begin{aligned}(m_2 + \lambda_{11}) \frac{dV_{X2}}{dt} &= N_{X2} + (m_2 + \lambda_{22}) V_{Y2} \omega_2 + \lambda_{26} \omega_2^2; \\ (m_2 + \lambda_{22}) \frac{dV_{Y2}}{dt} &= N_{Y2} - (m_2 + \lambda_{11}) V_{X2} \omega_2; \\ (I_{2Z2} + \lambda_{66}) \frac{d\omega_2}{dt} &= M_{Z2} + (\lambda_{22} - \lambda_{11}) V_{X2} V_{Y2} - \lambda_{26} V_{X2} \omega_2.\end{aligned}\quad (1)$$

В поточной системе координат при малых значениях угловой скорости ω_2 и угла дрейфа β_2 можно допустить, что

$$V_{X2} = V_2 \cos \beta_2 \approx V_2; V_{Y2} = -V_2 \sin \beta_2 \approx V_2 \beta_2. \quad (2)$$

Проекции главного вектора и главного момента внешних сил будут равны:

$$\begin{aligned}N_{X2} &= X_{K2} + R_{X2}^{BC}; \\ N_{Y2} &= Y_{K2} + R_{Y2}^{BC}; \\ M_{Z2} &= M_{K2} + M_{Z2}^{BC},\end{aligned}\quad (3)$$

где X_{K2}, Y_{K2}, M_{K2} - проекции гидродинамических сил и момента на корпусе буксируемого объекта.

Составляющие силы воздействия буксирной связи на корпус и момент можно выразить как:

$$\begin{aligned}R_{X2}^{BC} &= T^{BC} \cos(\gamma_2 - \beta_2); \\ R_{Y2}^{BC} &= T^{BC} \sin(\gamma_2 - \beta_2); \\ M_{Z2}^{BC} &= R_{Y2}^{BC} \cdot L_{K2}.\end{aligned}\quad (4)$$

Исследование движения буксируемого объекта с помощью уравнений (1) можно производить несколькими способами:

1. Преобразованием их в систему алгебраических уравнений при допущениях о малости ω_2 и β_2 (линейная теория);

2. Представлением буксируемого объекта свободным, а буксирной связи – средством управления движением. Тогда система дифференциальных уравнений, с их решением численными методами, описывает переходный процесс буксируемого объекта из некоторого начального состояния в установившееся циркуляционное движение при постоянном управлении (по типу самоходного свободного судна с управлением рулями). В этом случае не требуется допущений линейной теории управляемости.

Первый способ исследования удобен при анализе движения состава на прямом курсе, т.е. в условиях буксировочного дрейфа. Для криволинейного движения буксируемого объекта более важно знать параметры маневра при изменении направления движения, прохождения криволинейных участков пути и т. д. Поэтому сосредоточим внимание на *втором способе* исследования.

В этом способе буксирную связь будем рассматривать как средство управления, воз-

действие которого определяется выражениями (4). Если клюз буксира K_1 движется по окружности, концентричной с окружностью буксируемого объекта, то воздействие буксирной связи на буксируемый объект (T^{BC}, γ_2) не будет изменяться во времени, т.е. будет постоянным. Примем это допущение.

Угол γ_2 можно представить задаваемым параметром по типу угла перекладки рулей судна. Угол β_2 представляет собой потерянный угол управления, зависящий для данного буксируемого объекта от кинематических параметров движения. Буксировочное усилие T^{BC} , также представляется задаваемым параметром движения буксируемого объекта, напоминающим упор гребного винта судна.

Тогда движение буксируемого объекта можно охарактеризовать как движение свободного судна под действием средств управления с задаваемыми параметрами T^{BC} и γ_2 . Такое упрощенное представление движения буксируемого объекта позволяет провести более глубокое изучение его свойств.

Заметим, что в качестве задаваемого параметра управления удобнее использовать угол γ_2^* (рис. 1). Это угол отклонения буксирной связи от диаметральной плоскости буксируемого объекта, он является эффективным углом управления, его можно наблюдать, измерять, контролировать.

Тогда угол γ_2 будет равен:

$$\gamma_2 = \gamma_2^* + \beta_2, \tag{5}$$

а составляющие воздействия буксирной связи примут вид:

$$\begin{aligned} R_{X2}^{BC} &= T^{BC} \cos \gamma_2^*; \\ R_{Y2}^{BC} &= T^{BC} \sin \gamma_2^*. \end{aligned} \tag{6}$$

Итак, приняв в качестве задаваемых параметров углы ориентации буксирной связи γ_2 или γ_2^* , можно с помощью уравнений (1) рассчитать соответствующие разным углам циркуляции буксируемого объекта и построить графические зависимости: $\bar{\omega}_2(\gamma_2)$, $\bar{\beta}_2(\gamma_2)$, $\gamma_2^*(\gamma_2)$. Эти зависимости по аналогии с обычным судном можно назвать *диаграммой управляемости буксируемого объекта* (рис. 2, рис. 3).

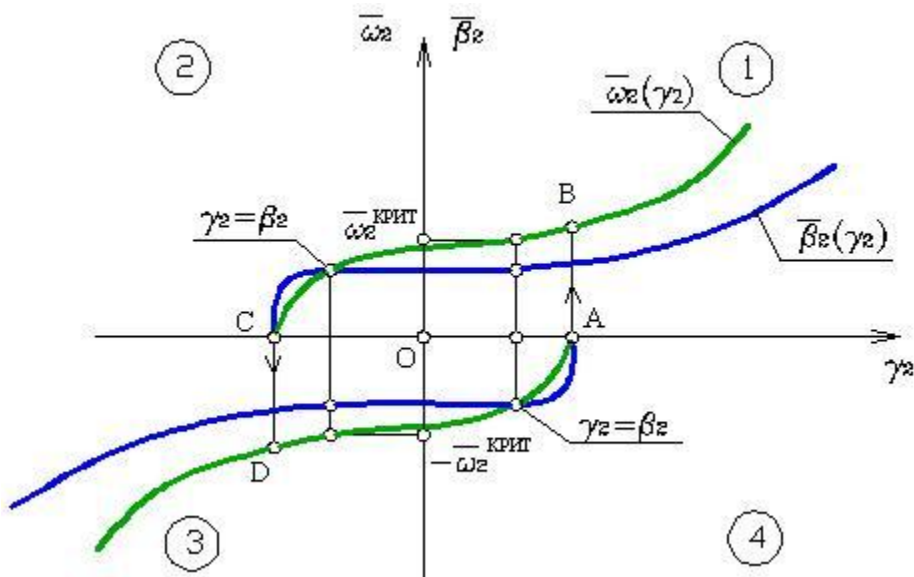


Рис. 2. Первая диаграмма управляемости буксируемого объекта

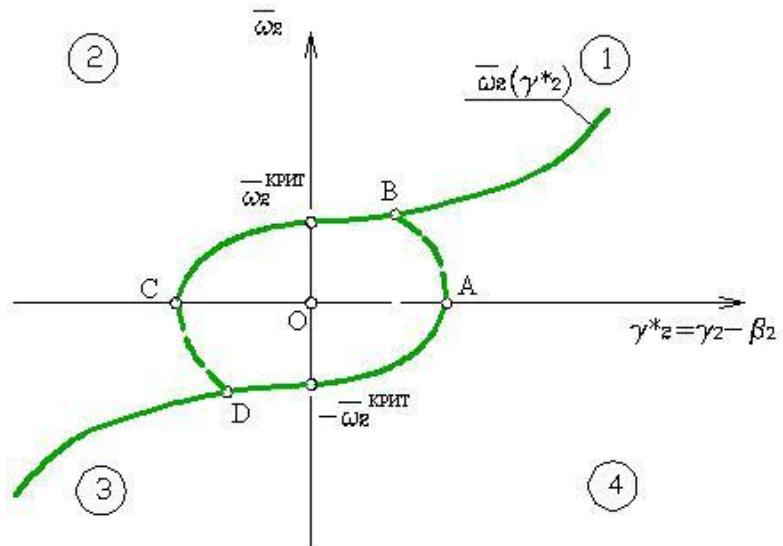


Рис. 3. Вторая диаграмма управляемости буксируемого объекта

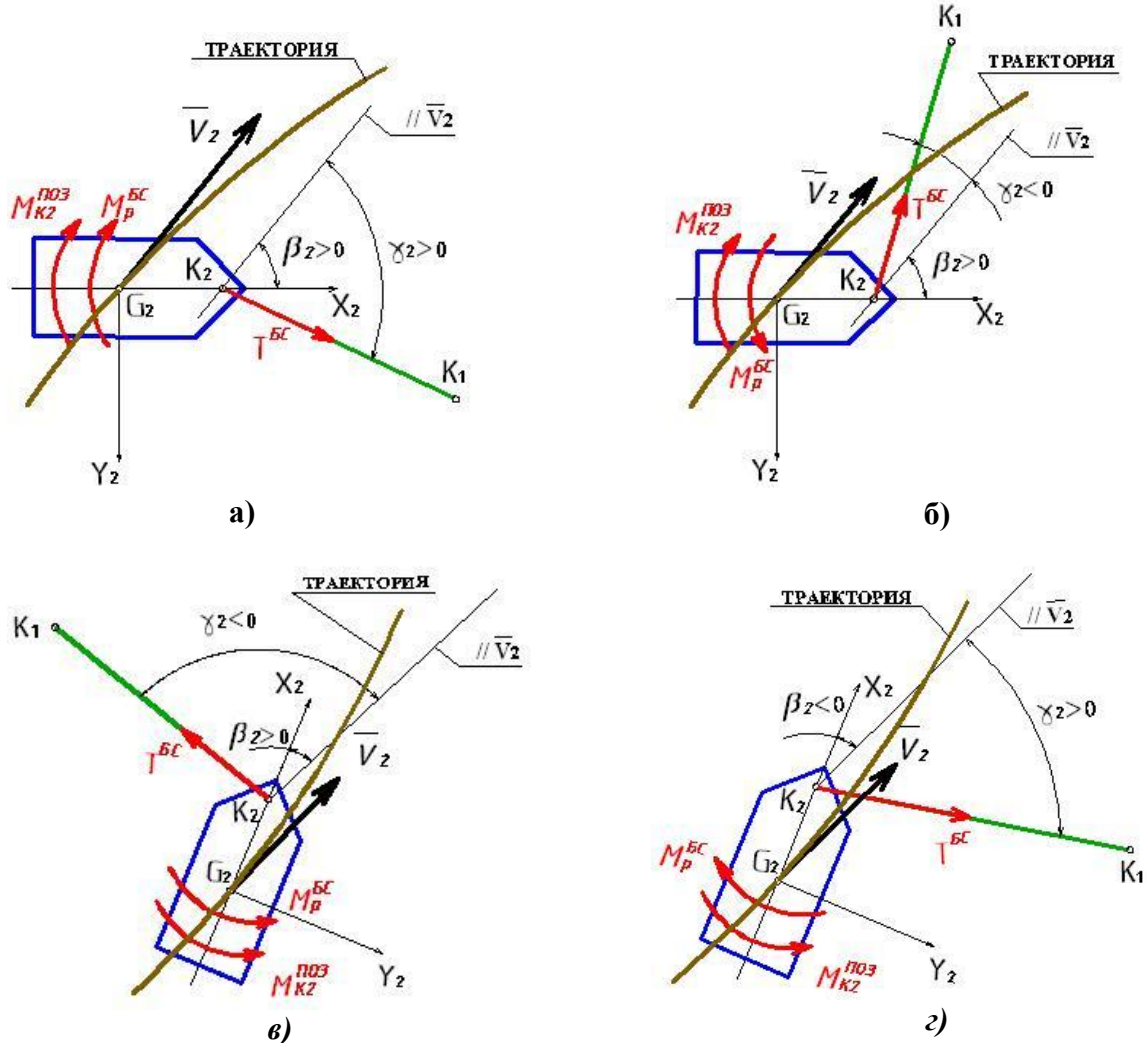


Рис. 4. Положение буксируемого объекта:

- а - квадрант 1 ($\bar{\omega}_2 > 0$ и $\gamma_2 > 0$); б - квадрант 2 ($\bar{\omega}_2 > 0$ и $\gamma_2 < 0$);
- в - квадрант 3 ($\bar{\omega}_2 < 0$ и $\gamma_2 < 0$); з - квадрант 4 ($\bar{\omega}_2 < 0$ и $\gamma_2 > 0$)

На диаграммах линии $\bar{\omega}_2(\gamma_2)$ и $\bar{\omega}_2(\gamma_2^*)$ - это линии устойчивых режимов движения по

криволинейной траектории, линии (A – B) и (C – D) - это линии перехода от одного положения буксируемого объекта к другому при смене направления его вращения.

Рассмотрим подробнее отдельные области диаграмм, квадранты 1, 2, 3, 4 (рис. 2 и рис. 3) и определим положение буксируемого объекта по отношению к его траектории (рис. 4, а, б, в, г).

В центре диаграммы образуется «петля неустойчивости», точки A – B – C – D (рис. 2 и рис. 3), внутри которой имеется два относительно устойчивых режима движения буксируемого объекта, но с противоположными направлениями вращения. Можно предположить, что ширина «петли неустойчивости» и амплитуды автоколебательного режима движения, при буксировке прямым курсом, будут взаимосвязаны. Интенсивность колебаний, очевидно, будет также зависеть от степени демпфирования вращения корпуса буксируемого объекта, характеристик буксирной связи и закона движения буксировщика.

Заметим, что зная углы ориентации буксирной связи γ_2 или γ_2^* , по диаграммам управляемости (рис. 2 и 3), можно найти значения относительной угловой скорости $\bar{\omega}_2 = \frac{1}{R_{II}}$. За-

тем, через построение траектории движения буксирного состава, определить необходимую длину буксирного троса l^{BC} , соответствующую условию движения буксировщика по этой же траектории, что и буксируемый объект (рис. 1).

В качестве примера, проведены расчеты движения реального буксируемого объекта на круговой траектории. Исследовалось движение за идеальным буксировщиком грузового судна, по характеру обводов близкого к проекту 19610. Исходными данными для расчёта явились:

$$\begin{array}{llll} L=121,0\text{м}; & B=14,8\text{м}; & T=3,33\text{м}; & \delta=0,821 \\ V=4900\text{м}^3; & V_0=5,5\text{м/с}; & R(V_0)=112\text{кн}; & L_{K2}=60\text{м}; \\ k_{10}=-0,0307, & k_{31}=0,0583, & k_{21}=0,102, & k_{32}=-0,0341. \end{array}$$

Разработана математическая модель движения буксируемого объекта, в которой в качестве главного средства управления используется буксирная связь с управляющим воздействием $T^{BC} = 112\text{кн.}$, эквивалентным действию гребного винта обычного судна. В качестве параметра управления принят параметр γ_2 – угол отклонения буксирной связи от направления вектора скорости буксируемого объекта – \bar{V}_2 , совпадающего с направлением касательной к траектории центра тяжести G_2 (рис. 1).

Таблица 1

γ_2 , град	40	35	30	25	20	15	10	5	3	1	0	-5	-10	-15
\bar{V}_2 , м/с	2,86	3,05	3,16	3,30	3,42	3,52	3,63	3,71	3,83	3,81	3,78	3,85	3,63	3,53
$\bar{\omega}_2$, рад/с	0,552	0,481	0,422	0,367	0,318	0,272	0,229	0,187	-0,117	-0,136	0,144	0,097	-0,229	-0,272
β_2 , рад	0,259	0,249	0,237	0,227	0,216	0,205	0,193	0,180	-0,152	0,161	0,164	1,142	-0,193	-0,205
β_2 , град	14,8	14,3	13,6	13,0	12,4	11,7	11,1	10,3	-8,7	-9,2	9,4	8,1	-11,1	-11,7
γ_2^* , град	25,2	20,7	16,4	12	7,6	3,3	-1,1	-5,3	11,7	10,2	-9,4	13,1	1,1	-3,3

Начальным положением буксируемого объекта являлось прямолинейное движение со скоростью \bar{V}_0 . В начальный момент времени t_0 , происходило отклонение буксирной связи на заданный угол γ_2 . После завершения эволюционного периода, наступала установившаяся циркуляция буксируемого объекта, именно в этот момент параметры движения фиксировались.

В областях умеренных и малых значений γ_2 , исследование проводилось путём поша-

гового уменьшения угла в сторону отрицательных значений до тех пор, пока не изменялось направление вращения корпуса. Это соответствует методике, разработанной Регистром при определении первого критического угла перекадки рулей. Таким образом, удалось получить петлю неустойчивости. Результаты расчёта приведены в табл. 1, по ним построена диаграмма управляемости (рис. 5).

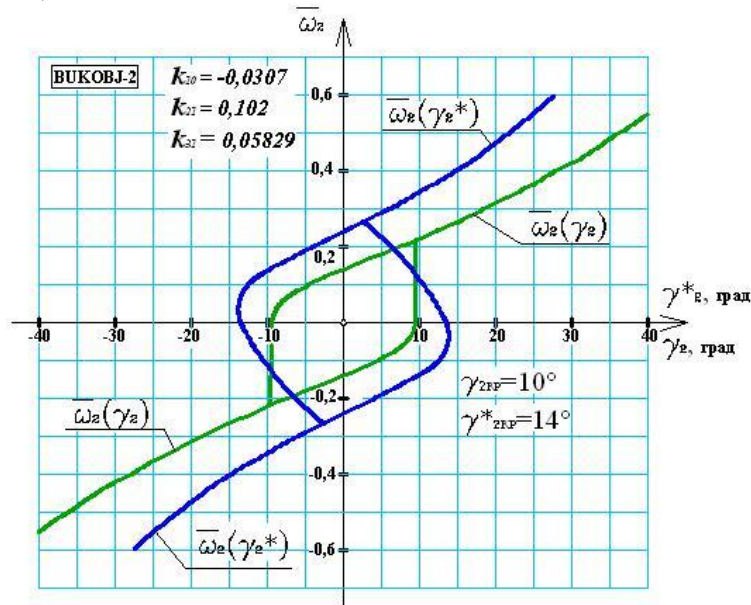


Рис. 5. Диаграмма управляемости буксируемого судна проекта 19610

Таблица 2

γ_2 , град	50	40	30	20	15	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-30
\bar{V} , м/с	2,65	2,95	3,27	3,55	3,69	3,79	3,89	3,97	3,90	3,80	3,70	3,60	3,33
$\bar{\omega}_2$, рад/с	0,729	0,554	0,411	0,296	0,244	0,194	0,142	0,080	-0,142	-0,194	-0,244	-0,294	-0,404
β_2 , рад	0,232	0,207	0,180	0,154	0,140	0,123	0,103	0,073	-0,103	-0,123	0,139	-0,154	-0,180
β_2 , град	13,3	11,7	10,3	8,8	8,0	7,05	5,90	4,2	-5,90	-7,05	-8,0	-8,8	-10,3
γ_2^* , град	36,7	28,3	19,7	11,2	7,0	2,95	0,9	-4,2	0,9	-2,95	-7,0	-11,2	-19,7

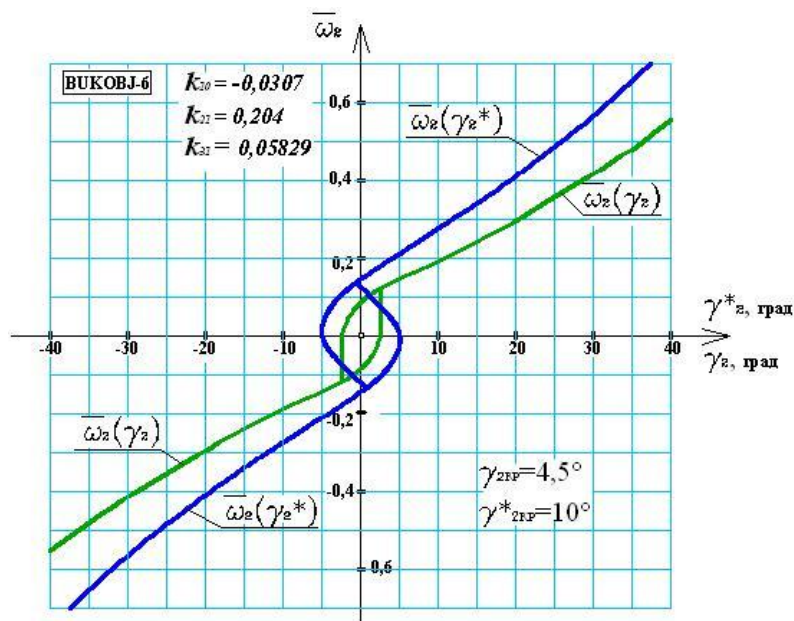


Рис. 6. Влияние гидродинамических характеристик корпуса

Можно утверждать, что при $\gamma_2 > \gamma_{2KP}$ существует однозначный устойчивый режим движения по криволинейной траектории. Внутри «петли неустойчивости» возможны переходные эволюционные движения. Направления вращения корпуса буксируемого объекта будут неоднозначные, они определяются внешними начальными условиями.

Проведено исследование влияния гидродинамических характеристик корпуса буксируемого объекта на размер «петли неустойчивости». Наиболее эффективно удалось уменьшить размеры «петли неустойчивости», увеличением коэффициента поперечной гидродинамической силы k_{21} . Результаты расчета приведены в табл. 2, в графической форме - на рис. 6.

Таким образом, использование диаграммы управляемости позволяет обозначить границы устойчивого движения буксируемого объекта по круговой траектории за буксировщиком, а также определить пути расширения этих границ. А предварительное построение траектории движения с использованием диаграммы, определяет необходимую длину буксирной связи, обеспечивающую движение объектов буксирного ордера по одной траектории.

Библиографический список

1. Ваганов, А.Б. Маневренность судна при знакопеременных переключках рулей / А.Б. Ваганов, П.В. Гуров, А.С. Костюнин // Вестник Иркутского государственного технического университета; Иркутск, 2011. №4(51). С. 66–71.
2. Ваганов, А.Б. Анализ ухудшения маневренности судна при знакопеременных переключках рулей / А.Б. Ваганов, П.В. Гуров, А.С. Костюнин, К.Е. Сазонов // Труды ЦНИИ им. академика А.Н.Крылова; Л., 2012. №1(66). С. 33–42.
3. Ваганов, А.Б. Моделирование движения сложного буксирного состава / А.Б. Ваганов, П.В. Гуров // Наука и технологии. Краткие сообщения XXVII Российской школы, посвященной 150-летию К.Э.Циолковского, 100-летию С.П.Королева и 60-летию Государственного ракетного центра «КБ им. академика В.П. Макеева». 2007. С. 84–86.
4. Маковский, А.Г. Особенности движения буксируемых судов на циркуляции / А.Г. Маковский, Е.Б. Юдин // Судостроение. 1979. №10. С. 11–12.

Дата поступления
в редакцию 22.01.2015

P.V. Gurov

USE OF CONTROL CHARTS FOR MOTION ESTIMATION TOWED OBJECT FOR AT TOWING CIRCULAR

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev

Objective: To study the motion of the towed object in a circular path.

Method: use mathematical modeling to analyze the motion of the towed object under control action towline.

Results: The effect of hydrodynamic characteristics of the hull of the towed object on the size of the "loop instability" in the chart control. Is set, reducing the loop border and increasing range of sustainable movement. The possibility of determining the required length of the towing connection, providing movement of objects towing warrants on the same trajectory.

Conclusion: The use of control charts allows you to identify the boundaries of sustainable modes of motion of the towed object on a circular path for towing.

Key words: mathematical modeling, towed object graph handling, road holding, the trajectory.

УДК 534.2; 629.561.5; 629.564.7; 550.34.06.013.3

К.А. Костылев¹, В.А. Зуев²

ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЕДОКОЛЬНОГО СУДНА

Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Цель: Разведка запасов полезных ископаемых на шельфе арктических морей представляет огромный интерес. Однако особые климатические условия обозначенного региона накладывают определенные ограничения на применения традиционных методов морской сейсморазведки. Представляет интерес разработка нового метода осуществления морской сейсмоакустической разведки и формулировка требований к аппаратуре для его осуществления.

Методология: Проведен анализ различных методов осуществления морской сейсморазведки в сложной ледовой обстановке шельфа морей арктического региона. Проанализированы возможности их применения в указанном регионе.

Результаты: Предложен новый метод осуществления сейсмоакустической разведки полезных ископаемых на шельфе морей арктического региона в условиях сложной ледовой обстановки. Сформулированы и проанализированы требования к аппаратуре для осуществления морской сейсмоакустической разведки в рамках названного метода.

Значение исследования: Анализ полученных требований позволил теоретически подтвердить возможность осуществления сейсмоакустических исследований на шельфе морей, покрытых льдом, с помощью научно-исследовательского судна ледокольного класса.

Новизна/ценность: Представлен новый метод осуществления сейсмоакустической разведки на шельфе арктических морей. На основе полученных результатов была проведена эскизная проработка комплекса для осуществления сейсмоакустической разведки с помощью судна ледокольного класса.

Ключевые слова: ледовые условия, шельф, арктический регион, сейсморазведка дна.

ФЦП «Развитие гражданской морской техники на 2009–2016 годы» содержит раздел, ориентированный на разработку технологий подводных инженерно-геологических работ на морском дне, который предусматривает развитие отечественного научно-технического и проектного потенциала, создание опережающего научного задела и технологий для разработки перспективной морской техники. Проведение НИОКР, строительство, реконструкция и техническое перевооружение научно-экспериментальной и стендовой базы для фундаментальных и прикладных исследований необходимы для создания конкурентоспособной техники и технологий сейсмоакустической разведки, в области которой сформировалось значительное отставание от мирового уровня. В настоящее время российские суда, выполняющие морские сейсморазведочные работы, оборудованы системами зарубежного производства. Всего используется порядка 10 устаревших судов, которые в состоянии выполнять сейсморазведочные работы, специально для этого не проектированных, при этом примерно половина из них арендована иностранными фирмами. Кроме того, названные суда оборудованы аппаратурой, предназначенной для осуществления морской сейсморазведки традиционными методами, апробированными западными компаниями, специализирующимися на геологоразведке морского дна. Отечественная промышленность для разведочных целей оборудования и специализированных судов не производит. Конечно, использование зарубежных технологий для освоения Арктики в краткосрочном, тактическом плане действительно выглядит очень заманчивым. Нельзя не согласиться с авторами статьи [1] - проверенные решения, ответственность за работоспособность которых лежит на плечах западных партнеров, не могут не привлекать российских управленцев среднего и высшего звена, особенно, если они отвечают за количественные показатели приращения минералогической базы своей компании или отрасли в целом. Разработка же альтернативных российских технологий потребует рискован-

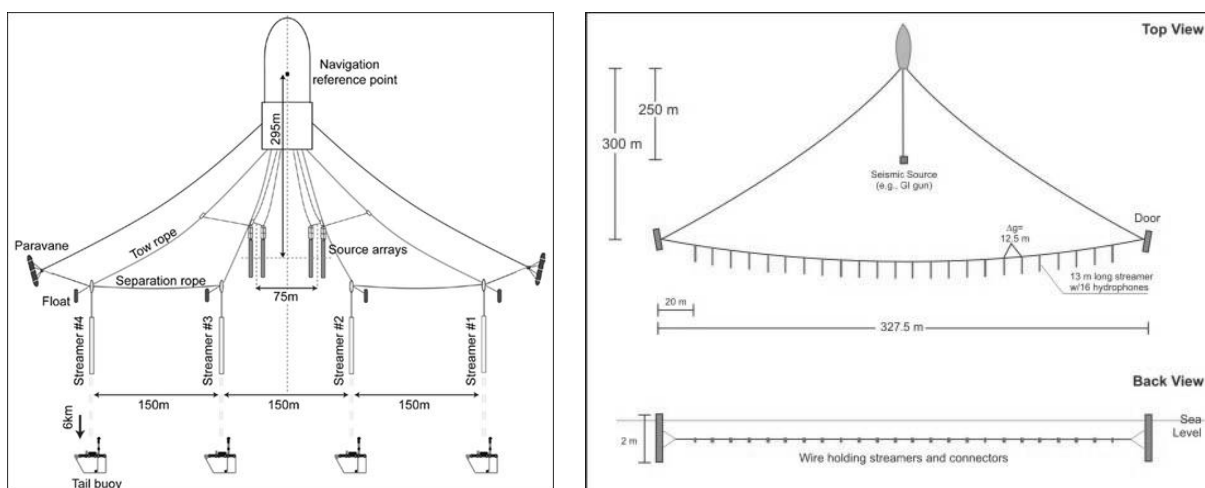
ных финансовых затрат, времени на все фазы технологической реализации, без стопроцентной гарантии конечного успеха.

Под влиянием этих рисков технологическая пропасть между Россией и передовыми западными странами с каждым годом расширяется все больше и больше, и пределом российской инженерно-технической мысли становится способность освоения и штатного использования зарубежного оборудования.

Также следует отметить, что Россия не имеет свободного доступа ко всем зарубежным технологиям. Некоторые системы попадают под действие эмбарго или требуют длительного периода лицензирования.

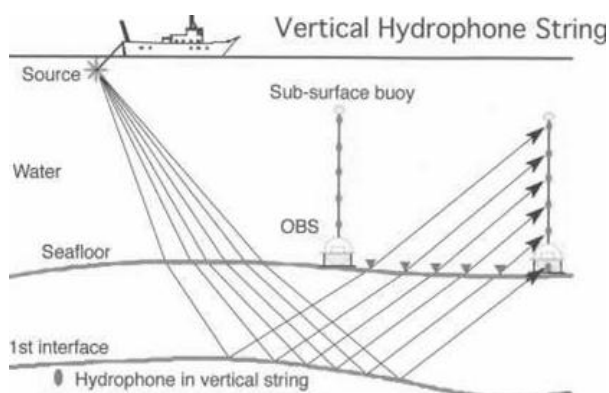
Однако технологии осуществления сейсморазведки шельфа в нашей стране имеют богатую историю - они начали бурно развиваться еще с середины 60-х годов прошлого века и определенно оказали значительное влияние на мировой уровень техники. На рис. 1 приведены основные схемы современной сейсмоакустической разведки шельфа.

Основной вариант, обеспечивающий двумерный разрез донных структур или 2D технология, заключается в буксировке длинной приемной косы и импульсного источника звука в виде пневмопушки, генерирующей ударную волну. Более современный вариант заключается в буксировке параллельной системы кос (3D технология), позволяющий получать трехмерную картину неоднородностей грунта. Известны реализации 4D технологии, которая отслеживает временные изменения структуры неоднородностей, возникающие при добыче.



а)

б)



в)

Рис. 1. Варианты схем профилирования:

а – буксировка системы кос (до 16-ти);
 б – буксировка коротких отрезков кос; в – вертикальные донные антенны

Также следует отметить метод, основанный на применении донных самовсплывающих станций [1] или технологию, основанную на применении подводных аппаратов [2].

Принципы сейсмондирования дна существенно отличаются от простой эхолокации. Строгого решения обратной задачи восстановления распределения скоростей и плотности грунта по глубине при сейсмолокации не существует. В любом случае используется та или иная модель дна, в которой подбирают параметры плотности и скорости грунта по результатам эксперимента. Модели дна используют одно-, двух- и наиболее реалистичные – трехмерные, отчего и используют термины *2-D* и *3-D* профилирования.

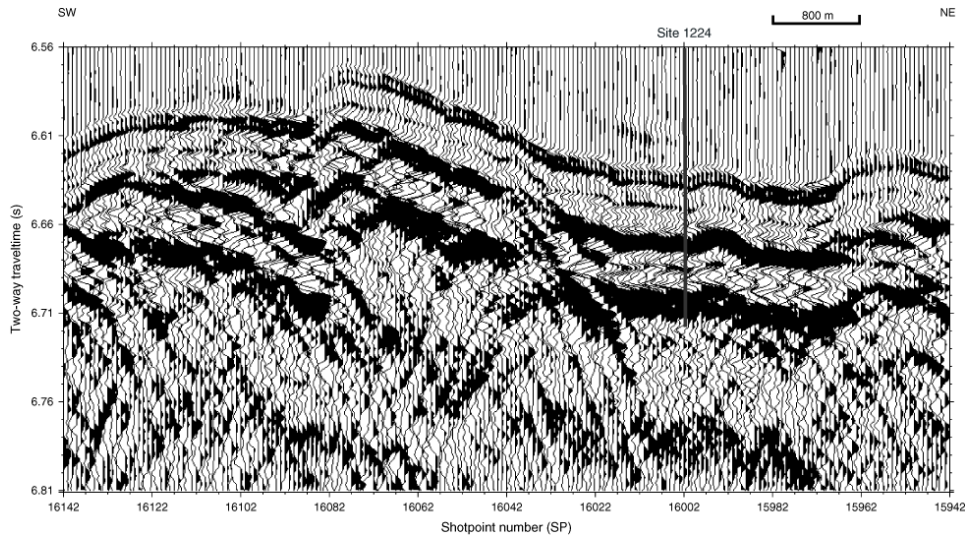


Рис. 2. Пример одноканальной сейсмограммы (1D), полученной при движении излучателя и одиночного приемника

На рис. 2 приведен пример данных морской сейсморазведки около берегов Гавайских островов. На этом рисунке изображен сигнал, принятый на один гидрофон при перемещении системы излучатель-приемник. Излучающая система – пневмопушка фирмы Seismic Systems, располагалась на глубине 8 м и производила выстрелы в процессе движения судна через каждые 40 м; приемник буксировался на глубине 20 м. Начало записи синхронизовано с моментом выстрела.

Для восстановления характеристик дна в двумерных и трехмерных моделях надо принимать и учитывать при расшифровке сейсмограмм – преломленные и рефрагированные в донных слоях волны. Для глубоких слоев выход таких волн из дна происходит на расстояниях от источника больших, чем интересующая глубина зондирования. Поэтому и необходимо использовать распределенные приемные системы в виде кос большой длины и чем больше интересующая глубина, тем длиннее должны быть косы. Общепринятыми методами в морской геологоразведке являются варианты *2D* и *3D* разведки при буксировке гибких протяженных сейсмодосок. При первичном исследовании района обычно достаточно восстановление его характеристик в *2-D* модели, т.е. достаточно буксировать одиночную косу, что уже в состоянии указать на потенциально интересные точки для бурения. В процессе бурения берутся пробы, которые дают информацию о скоростях и плотностях грунта на различных глубинах. После бурения разведывательных скважин более детальный анализ требует структуры трехмерной в *3-D* модели, которая позволяет получать контуры месторождения и оценивать запасы обнаруженного сырья. Для построения *3-D* модели дна необходима уже буксировка системы кос. Чем глубже акватория, тем устранение искажений требует систем с большим разнесением кос друг от друга. На настоящий момент наиболее мощные комплексы используют больше десятка кос с разнесением крайних на расстояние до километра.

Недопущение искажений в восстановленной *3D* картине в морской разведке требует строгой геометрии приемной системы или непрерывного контроля геометрического положе-

ния кос, акустическими методами или средствами глобального позиционирования - GPS. Ограничения точности данных систем является причиной невозможности совместной обработки нескольких параллельных проходов кос, в отличие от сухопутной 3D сейсморазведки, в которой можно «перекладывать» приемные системы.

Перечисленные особенности ставят конкретные требования к комплексу аппаратных средств для реализации той или иной схемы профилирования. Но в общем можно выделить некоторые схожие моменты. Во всех случаях должны присутствовать:

- судно-носитель исследовательского комплекса;
- подсистема возбуждения зондирующих импульсов;
- подсистема приема отраженных и преломленных волн;
- подсистема первичного анализа и последующей интерпретации полученных сейсмоданных.

Считается, что для глубинной сейсмолокации эффективно использовать частоты до 100 Гц. С этим связаны и проблемы излучения столь низких частот, и невозможность сформировать хорошо направленный лоцирующий сигнал и получить пространственное разрешение сравнимое с гидролокацией.

Отдельные подсистемы комплекса выдвигают ряд специфических требований к аппаратуре, безусловное разрешение которых необходимо для достижения поставленных перед комплексом задач и целей. К основным из этих требований можно отнести:

- необходимость большой протяженности буксируемых сейсмических кос;
- необходимость буксировки за судном носителем поплавок с источниками зондирующих импульсов;
- существенные ограничения на маневр судна-буксира;
- необходимость высокой точности стабилизации скорости судна-буксира;
- потребность в буксировке одновременно нескольких сейсмических кос;
- необходимость определения пространственного положения сейсмических источников и приемников.

Практически все перечисленные требования, так или иначе, трудно реализовать при сейсморазведке акваторий с ледовым покровом. В связи с этим в научной среде наблюдается некоторый пессимизм, основанный на сомнении в возможности полноценного сейсмоакустического исследования шельфа арктических морей. Безусловно, если смотреть на классические методы сейсмозондирования через призму возможности применения в условиях Арктики, то сразу "всплывает" ряд проблем. Перечислим основные из них.

Первое, на что падает взгляд - высокая степень опасности повреждения длинных кос во льдах, особенно при необходимости старт-стопного движения ледокола в паковых льдах, а также при малой скорости буксировки. При ледовом покрове, тем более когда судно движется за ледоколом сопровождения, невозможно буксировать несколько параллельных кос в полосе чистой воды. Если в случае буксировки приёмно-излучающей аппаратуры на чистой воде имеется возможность привязки координат через систему GPS/ГЛОНАСС, то при необходимости заглубления кос ниже нижней границы льда такая возможность отсутствует.

Из практики известны ограничения на *минимальную и максимальную скорости перемещения судна-носителя*. Конкретные величины зависят от конструктивных особенностей антенн. В среднем при скоростях меньше четырех узлов не удается выдерживать устойчивое горизонтальное расположение антенны даже при наличии растягивающего стример водяного парашюта. С другой стороны, при скорости больше восьми узлов гидродинамические силы приводят к неконтролируемому колебанию антенны в пространстве, нарушению прямолинейности, увеличению натяжения. Данные особенности необходимо учитывать при разработке варианта использования ледокольного судна в качестве носителя косы.

Дополнительной сложностью проведения морских работ в Арктике является *удаленность портов обслуживания*, в которых можно было бы выполнить ремонт оборудования.

Это означает необходимость полноценного обслуживающего пункта на судне и более высокие требования к надежности.

Принципиальной проблемой является *возникновение* при наличии ледового покрова особых *реверберационных условий для распространения звука*. Нижняя граница льдов, как правило, неровная, что осложняет стандартные процедуры фильтрации многократных отражений дно-поверхность. Скорость спадания подо льдом реверберации ниже, что также ухудшает качество сейсмических сигналов. Отсутствие открытой водной поверхности в условиях Арктики предполагает отсутствие шумов, связанных с ветровым волнением, однако существенен становится шум льда и помехи от колки льда судном.

Заметным фактором является и то, что заглубление пневмопушек на большую глубину (ниже края льдов) неизбежно приведет к *большому расходу воздуха высокого давления* и увеличению периода повторения импульсов. Также нарушится оптимальность размещения пушек по глубине с точки зрения подавления переотраженных от дна и поверхности сигналов.

Оборудование должно отвечать более *жестким климатическим требованиям*, что важно для сохранения хрупкой экологической системы арктического региона.

Все изложенное практически "сводит на нет" даже теоретическую возможность полноценного круглогодичного сейсмопрофилирования и сейсморазведки арктического шельфа. Проведенное патентное исследование лишь подтверждает этот тезис. Большинство рассмотренных изобретений - попытки адаптации традиционных методов сейсморазведки к суровым арктическим условиям, а остальные - либо слишком дороги, либо неосуществимы по иным (технологическим) причинам. Неудивительно, что они не дали ожидаемого технического и технологического эффекта.

Однако перечисленным требованиям может отвечать разработанный в ходе совместных работ ИПФ РАН и ОАО "Вымпел" комплекс для осуществления сейсмоакустической разведки шельфа морей, покрытых льдом или подверженных техногенному загрязнению.

Комплекс располагается на судне ледокольного класса (Проект 00902, проектант - ОАО КБ "Вымпел", главный конструктор - Пиликин Сергей Леонидович, см. рис. 6).

Принцип работы комплекса основан на разработанном в ИПФ РАН альтернативном подходе к построению систем сейсморазведки морского дна. Данный принцип подразумевает применение в качестве зондирующих импульсов когерентных сигналов. Типичные варианты таких сигналов — сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и фазоманипулированные псевдослучайные сигналы. Для генерации таких сигналов необходимы низкочастотные широкополосные излучатели, управляемые программно (рис. 3, а), рис. 3, б)). Успешный опыт разработки подобных источников в ИПФ РАН связан с решением различных задач зондирования водной толщи океана. После приема сложного сигнала могут быть реализованы фильтрация и сжатие путем свертки с опорным сигналом, длительное накопление сигнальных последовательностей, синтез протяженной апертуры одиночным приемником по накоплению сигналов при движении в пространственной координате (рис. 4). На приеме в полной мере могут быть использованы возможности диаграммы направленности косы по подавлению шумов и выделению полезных сигналов.



а)



б)

Рис. 3. Фото НЧ излучателя (а) и ВЧ излучателя (б)

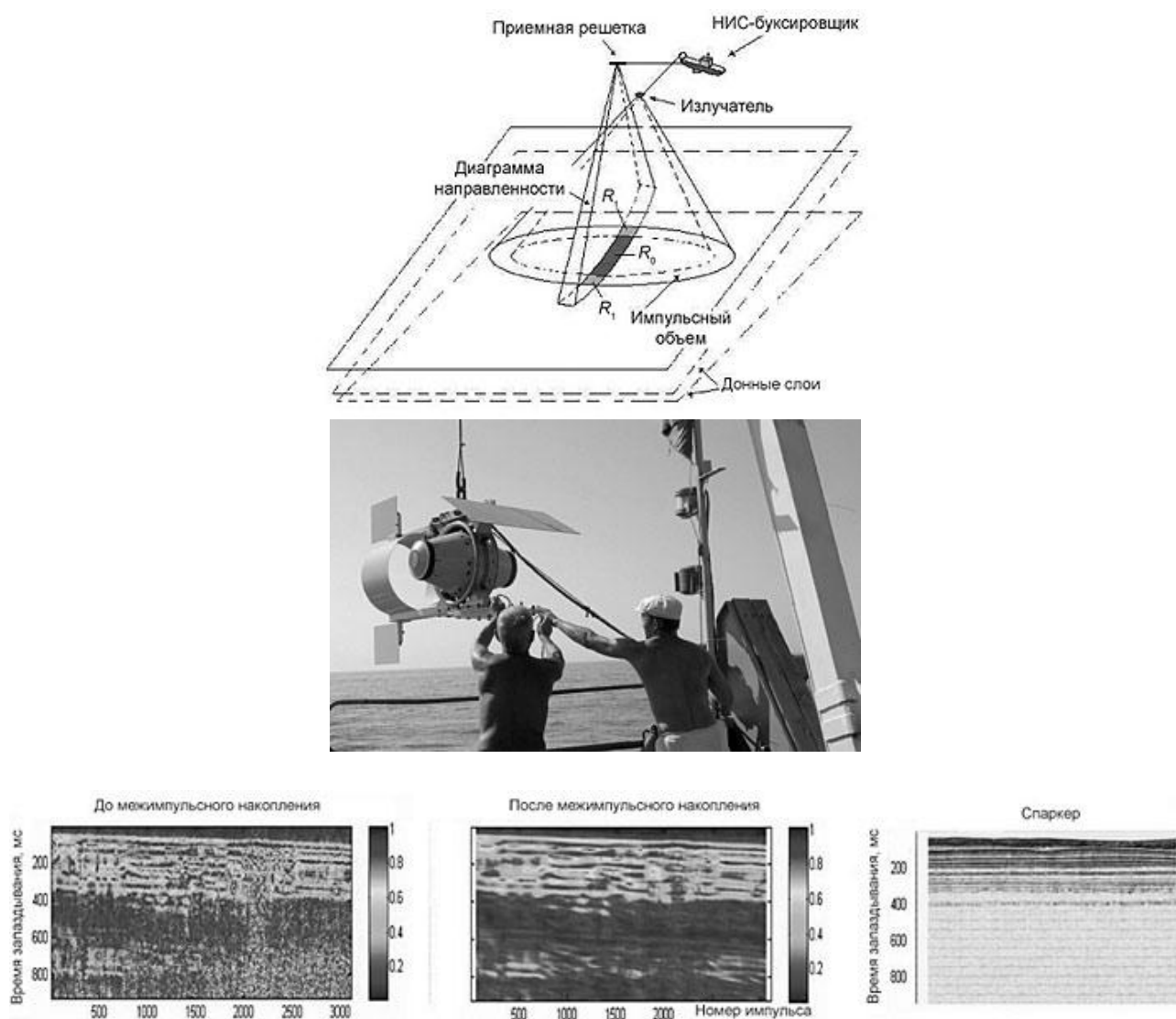


Рис. 4. Схема эксперимента, используемый гидроакустический излучатель, результаты профилирования. Результаты когерентного профилирования показаны в двух вариантах: до и после накопления по импульсам. Для сравнения приведен результат профилирования с использованием спаркера, полученный параллельно

На основе обозначенных разработок сформулирован и предлагается к осуществлению метод проведения морской сейсморазведки полезных ископаемых на шельфе арктических морей. На рис. 5 и рис. 6 приведены схемы осуществления данного метода.

Отметим основные черты предлагаемого метода:

- в качестве источников зондирующих импульсов предлагается использовать гидроакустические источники с контролируемыми характеристиками излучения;
- в качестве приемников отраженных волн предполагается использование сейсмоакустических кос (длиной до 500 м), выпускаемых из днища или кормовой части судна ниже нижней границы ледового покрытия;
- принятые сейсмоданные предполагается обрабатывать с привлечением корреляционных методов.

Работа ледокола на акваториях малой глубины в присутствии ледового покрова связана в первую очередь с ограничением выпуска заборных устройств. Если ледокольное судно в состоянии преодолевать ледовые поля, поддерживая равномерное движение, то буксировать за собой поле кос значительной ширины уже не в состоянии. Даже одна коса большой длины бу-

дет неизбежно повреждаться при закрытии образованного ледоколом прохода во льдах. Реальным путем решения проблемы будет использование коротких кос длиной до 500 м.

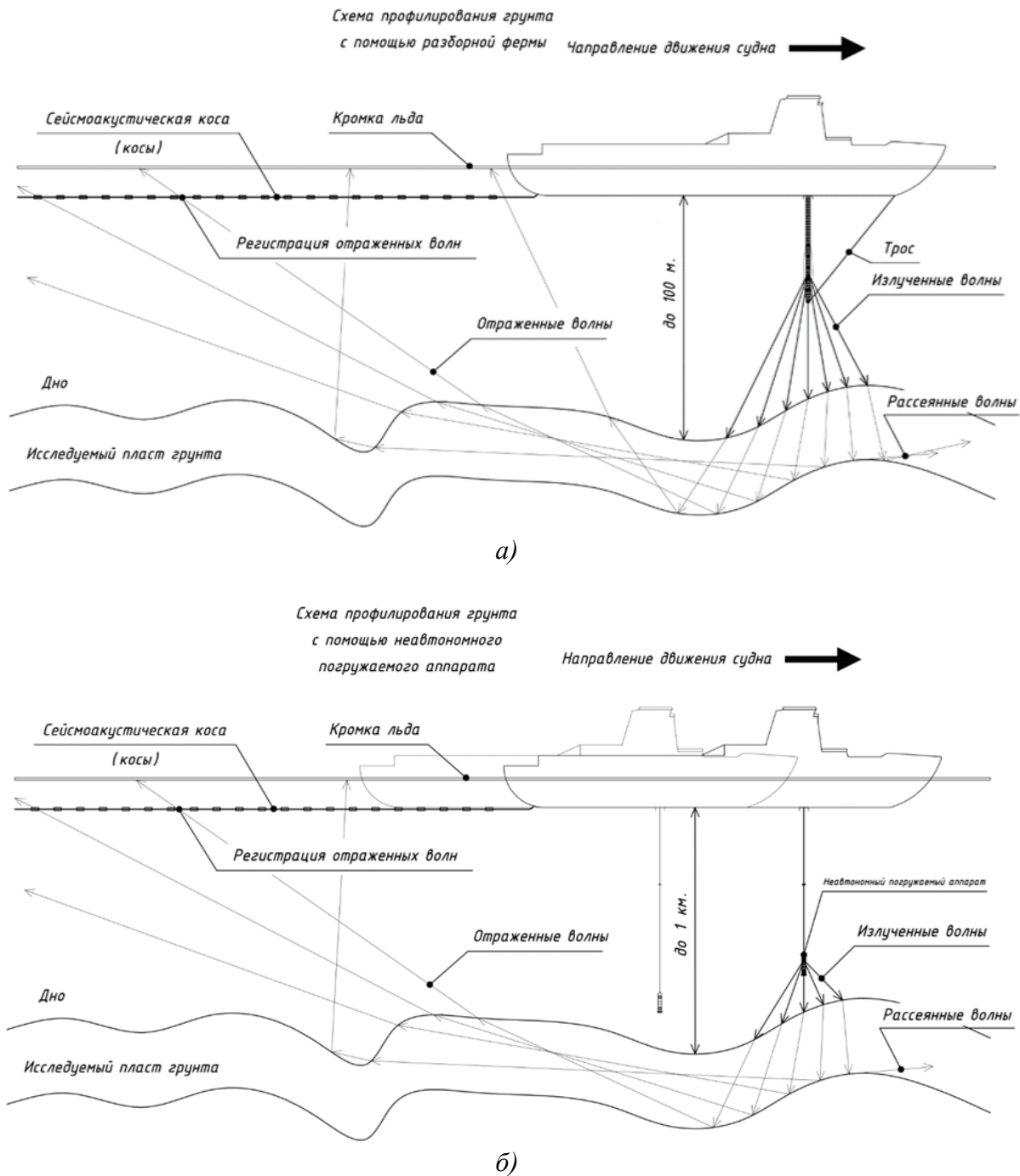


Рис. 5. Схема профилирования грунта с помощью:
а – разборной фермы; б – неавтономного погружаемого аппарата

Оценка характеристик приемной и излучающей подсистем может быть выполнена из их геометрических размеров. Ширина диаграммы направленности (или коэффициент усиления приемной системы) находится из соотношения приемной апертуры и длины волны. Сложность сигнала определит величину сжатия и соответственно пространственное разрешение. Потери в грунте весьма сильно зависят от его типа, поэтому для оценки реально использовать эмпирическую модель потерь. Абсолютные значения глубин, как и ранее, можно получить только качественно: реальные значения могут быть получены в результате экспериментальных работ.

На частоте 100 Гц длина волны звука в воде составляет 15 м. Для формирования диаграммы бегущей волны на вертикальной цепочке излучателей необходимо разместить их с разнесением на четверть длины волны, т.е. через 3,75 м. Восемь излучателей займут апертуру в 26,25 м.

Инженерные работы на малых глубинах могут выполняться на более высоких частотах (около 1 кГц), нежели глубинная разведка, и практически не будут иметь проблем, связанных с габаритами когерентной распределенной излучающей системы.

Универсальность технологии сейсмоакустической разведки на свободной воде и подо льдом обеспечивает унификация технических средств в приемной части оборудования.

Буксируемая коса (косы), выпускаемая из донной шахты в корпусе судна, может использоваться как на свободной воде, так и подо льдом. Для постановки вертикальной излучающей цепочки должна быть разработана специальная конструкция и выбор места для её размещения надо привязывать к архитектуре корабля. В частности, объемы для её размещения будут зависеть от выбранного конструктивного решения.

Для реализации 2D технологии приемная система буксируется за судном-носителем при выпуске через шахту (ниже нижней границы льда) со значительным нерабочим отрезком кабеля для удаления приемной части от судна-носителя. Основной помехой в рабочем диапазоне частот (до 100 Гц) для глубинного зондирования является гидродинамическое обтекание буксируемой косы, искажения геометрии косы и шумы движения судна-носителя через ледовое поле. Прямым сигналом от направленной излучающей системы пренебрежем, так как его можно уменьшать удалением рабочего участка буксируемой антенны. Уровень помехи в свободной воде определяется скоростью буксировки и практически не зависит от уровня собственного подводного шума носителя при достаточном удалении рабочего участка косы от корпуса. В предлагаемой технологии применяются гидроакустические излучатели с перестраиваемым по частоте сигналом, что снижает проблему помех за счет обработки сигналов.

Для тяжелых ледовых условий длинный нерабочий кусок приемной косы опасен с точки зрения повреждения или потери антенны, тем более на мелкой воде. Малое расстояние между косой и излучателем означает переход в режим сеймопрофилирования. Близость антенны к судну требует необходимость обеспечения в точках нахождения гидрофонов косы отношения сигнал/шум большего единицы (жесткое требование) или выигрыша обработки (мягкое требование) достаточного для выделения сигнала из шума.

Таким образом, основываясь на специфике новой технологии когерентного сеймозондирования, можно сформулировать основные требования к оборудованию судна-носителя ледового класса:

- Скорость буксировки приемной системы в виде заглубленной косы – от 4 до 8 узлов с обеспечением равномерности хода судна-носителя;
- Заглубление буксируемой косы ниже нижней границы ледового покрова с выпуском через шахту в дне судна-носителя;
- Требования к жесткости буксируемой косы – специальных требований не предъявляется;
- Требования к жесткости несущей конструкции излучающей подсистемы – конструкция с обеспечением взаимного положения излучающих элементов с возможностью регулирования расстояния между излучателями;
- Плавучесть сеймокосы – нулевая с возможностью подстройки под текущие параметры воды, влияющие на плотность (соленость, температура);
- Длина сеймокосы – не более 500 м;
- Уровень излучения системы возбуждения – суммарный уровень совокупности излучателей – не менее 250 дБ на одном метре относительно 1 мкПа;
- Звуковое давление одиночного излучателя (от прототипа) – не менее 15 кПа на одном метре (что обеспечит уровень давления больший, чем для наиболее мощной известной стандартной одиночной пневмопушки);

- Направленность системы излучателей – подавление звука в горизонтальной плоскости не менее 20 дБ (что означает использование в излучающей системе не менее 4-х фазированных излучателей);
- Подавление уровня звукового давления в помещениях судна-носителя не менее 100 дБ (относительно давления на одном метре от излучающей системы), абсолютное значение определяется санитарными нормами;
- Заглубление излучающей подсистемы – оптимизируется по подавлению реверберации и выбирается наиболее близким из возможных ко дну;
- Размещение излучателей – на жесткой конструкции, выпускаемой из шахты судна-носителя. Вертикальный размер определяется из требований разнесения фазированных излучателей на четверть длины волны звука в воде по вертикали.

Сделаем грубую оценку глубин для технических средства с указанными характеристиками. Уровень шума оценим, опираясь на данные [3] в области частот 100 Гц для редкого судоходства: $P_{noise} \sim 3 \text{ мПа} / \sqrt{\text{Гц}}$ или 70 дБ. Чувствительность гидрофонов, приведённая к входу, $\sim 0.2 \text{ мВ/Па}$. Уровень естественных шумов, приведённый к входу преобразователя, составляет 600 нВ/Гц^{1/2}. Эта величина на несколько порядков превышает уровень собственных электронных шумов гидрофонов, следовательно, предельная чувствительность приемной антенны полностью определяется шумами окружающей среды.

Предположим, что полоса излучения составляет 100 Гц при среднеквадратичной мощности 15 кПа на удалении одного метра от одиночного источника. В этой же полосе частот среднеквадратичный уровень шума составит 30 мПа. Сделаем грубую оценку дальности распространения без учёта ослабления, вызванного отражением (рассеянием) на границах слоёв. Учтём тем самым фактор геометрической расходимости и затухание звука в донных осадочных породах. При этом выберем заведомо завышенную величину коэффициента затухания, отвечающую верхним донным слоям, что позволит частично учесть эффекты отражения и рассеяния. Амплитуда звука, прошедшего расстояние R , отнесённая к амплитуде на расстоянии один метр, составит:

$$A_L = \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\pi f \eta_p R}{V_p}\right) \equiv \frac{1}{R} \exp(-\alpha R), \quad (1)$$

где f – центральная частота излучения; V_p – характерная (средняя по трассе) скорость волны и η_p – характерный коэффициент затухания. Ослаблению сигнала до уровня шума отвечает $A_L = 2 \cdot 10^{-6}$.

Усреднённые скорость и коэффициент затухания донных осадках зададим, опираясь на данные работы [4]: $V_p \approx 2500 \text{ м/с}$ и $\eta_p \approx 0,05$. Подставив эти величины в (1), для частоты $f = 100 \text{ Гц}$ получаем максимальную глубину зондирования $R \approx 1 \text{ км}$ без учета коэффициента усиления приемной антенны, который в зависимости от выбранного варианта составит от 20 до 40 дБ, т.е. реальная оценка предельной глубины зондирования составит порядка 10 км.

Исследованию затухания звука в морских осадках посвящена обзорная работа Гамильтона [5]. В ней приведены данные по затуханию звука в условиях северной Атлантики. Коэффициент затухания (α в формуле (1)) равен: 0,011 дБ/м для частоты 100 Гц. При распространении звука на 2 км и обратно затухание, обусловленное диссипацией, составит 44 дБ и величина $A_L = 1.6 \cdot 10^{-6}$, что близко к оценке ослабления до уровня шумов. Затухание сильно зависит от структуры донных пород [5], поэтому приведённые ранее оценки можно рассматривать как сугубо предварительные. Тем не менее, они указывают на возможность сейсмоакустической локации морского дна до глубин в несколько километров в диапазоне частот 100 Гц. При этом в качестве оценки потерь взята величина примерно в 10 раз большая, нежели в скальных грунтах.

Приведенная оценка не учитывает реверберационной помехи. Поскольку отношение

уровней полезного и реверберационного сигналов не зависит от мощности источника, его повышения можно добиться лишь за счет ограничения интенсивности волн, распространяющихся в направлении к поверхности. Для этого потребуются создание излучающих систем с узкими диаграммами направленности и низким уровнем боковых лепестков. Таким образом, борьба с реверберацией потребует разработки специальной излучающей аппаратуры. При реализации возникнут также вопросы, связанные с выбором оптимальных зондирующих сигналов и методов обработки, которые имеют глубокие проработки для гидролокации, т.е. не вызовут особых сложностей.

Предложенный метод планируется к применению в рамках судна пр. 00902 (см. рис. 6) и может позволить осуществлять сейсмоакустическую разведку полезных ископаемых на шельфе арктических морей практически в любое время года без нанесения ощутимого урона окружающей среде. Кроме того, данная разработка является полностью отечественной и может помочь снизить зависимость России от иностранных технологий.



Рис. 6. НИС-ледокол пр. 00902

Библиографический список

1. **Лаверов, Н.П.** Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации / Н.П. Лаверов, [и др.] // Арктика: экология и экономика № 4. 2011. С. 4–13.
2. Коротин, П. И. Технология сейсморазведки с подводного носителя / П. И. Коротин [и др.] // XXIV сессия Российского акустического общества, Сессия Научного совета по акустике РАН Гидроакустика. Сейсмическая акустика.
3. **Duckworth, G.** Low-frequency long-range propagation and reverberation in the central arctic: analysis of experimental results / G. Duckworth, K. LePage, T. Farrell // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 110. No. 2. P. 747–760.
4. **Leurera, K.C.** Compressional and shear-wave velocities and attenuation in deep-sea sediment during laboratory compaction / J. Acoust. Soc. Amer. 2004. 116. № 4. P. 2023–2030.
5. **Hamilton, E.L.** Sound attenuation as a function of depth in the sea floor // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1976. 59. № 3. P. 528–535.

6. Скучик, Е. Основы акустики / Е. Скучик. – М.: Из-во иностранной литературы, 1958.
7. Шерифф, Р. Сейсморазведка. История, теория и получение данных / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – М.: Мир, 1987. Т. 1.

*Дата поступления
в редакцию 22.01.2015*

К.А. Costylev¹, V.A. Zuev²

**SEISMIC EXPLORATION TECHNOLOGY
USING ICEBREAKING VESSEL**

The Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

Purpose: Exploration of mineral reserves on the Arctic seas' shelves is certainly a problem of huge interest. However, special climate conditions of the designated region impose certain restrictions on the applicability of traditional methods of seismic sea exploration. Novel methods to implement naval seismoacoustic reconnaissance and to formulate the requirements imposed on the equipment are of great interest.

Methodology: The analysis of various methods of seismic sea exploration is carried out for a difficult ice situation of the shelf of the Arctic region seas. Possibilities of their applications in specified regions are analysed.

Results: A novel method of seismoacoustic investigation of minerals on the shelves of the Arctic region seas in the conditions of a difficult ice situation is offered. Requirements to the equipment for implementation of naval seismoacoustic reconnaissance within the called method are formulated and analysed.

Value of research: The analysis of the obtained requirements allowed to confirm the theoretical possibility of implementation of seismoacoustic researches on the shelves of the seas covered with ice by means of research with a vessel of an icebreaking class.

Novelty/value: A novel method of seismoacoustic investigation on the shelves of the Arctic seas is presented. On the basis of the obtained results an outline study was carried out involving a complex for implementation of seismoacoustic investigation by means of a vessel of an icebreaking class.

Key words: difficult ice situations, sea shelf, Arctic region, seismic sea exploration.

УДК [629.5.081.4-187:629.5.023.4]:681.783.24

Нгуен Чунг Ань, В. Н. Лубенко

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ПО ВЫЧИСЛЕНИЮ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛОСКИХ СЕКЦИЙ СУДНА С ПОМОЩЬЮ ТАХЕОМЕТРА ЗТА5Р6

Астраханский государственный технический университет

Рассматриваются вопросы, связанные с практическим применением тахеометров в судостроении. В зависимости от процесса измерений тахеометром (метод определения базовой и объектной систем координат для плоских секций судна и принцип пересчета между ними) излагается решение задач по вычислению погрешности при контроле положения плоских секций судна в пространстве.

Ключевые слова: судостроение, измерение, тахеометр ЗТА5Р6, базовая система координат, промежуточная система координат, пересчет.

Точность изготовления и монтажа судовых корпусных конструкций приобрела особое значение в связи со следующими обстоятельствами: усложнением конструкций судов; переходом к модульным принципам проектирования и постройки судов, механизации, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов; сокращением объемов применения тяжелого ручного труда. Она является важной проблемой развития технологии судостроения и в значительной степени определяет объем пригоночных работ на всех стадиях постройки корпуса судна, на долю которых сегодня приходится до 40 % суммарной трудоемкости основных корпусных работ, выполняемых на построечном месте [1].

В настоящее время на большинстве судостроительных и судоремонтных заводов проверочные работы в цехе, на стапеле, на плаву и в доке выполняют при помощи простейших измерительных и контрольных инструментов – таких, как металлические рулетки и линейки, шланговые уровни (ватерпасы), шнуrowые отвесы и пр.

В условиях современного судостроения конструктор, как правило, разрабатывает большие объемные объекты, используя трехмерную графику. На экране его компьютера показывается трехмерный объект, в котором можно выделить конкретную сборочную единицу (секцию судна), которая в цехе монтируется на свое место. Если бы мы на этом экране могли увидеть реальное положение устанавливаемой секции, это позволило бы понять, какой конец секции, и в какую сторону необходимо подать. Такая оперативная и точная информация очень помогла бы нам в сборке.

В настоящее время тахеометры помогают решать такие задачи. Они позволяют производить не только угловые, но и линейные измерения, способствуют повышению точности измерений, обеспечивают первоначальную числовую обработку результатов на месте измерений благодаря наличию встроенного в тахеометре вычислительного устройства. Применение таких приборов не только позволяет устранить недостатки измерений, но и совместить несколько проверочных операций, например, одновременно производить проверку положения секции по высоте и крену, по длине и дифференту и т. п. [2].

Однако для того чтобы вывести реальное положение секции на экран с трехмерной моделью придется пройти цепочку переходов из одной системы координат в другую и связать реальные объекты с картинкой на экране проектанта (рис. 1).

При выполнении измерений тахеометром, уже разработаны методика построения систем координат и принцип пересчета между ними [3].

Однако при построении объектной системы координат, заданной от плоскости [4], получается следующее: тахеометр проводит измерения так, что ось Z всегда направлена в зенит (строго говоря, ось Z всегда противоположно направлена вектору ускорения свободного падения в точке измерения), поэтому оси X и Y образуют горизонтальную плоскость.

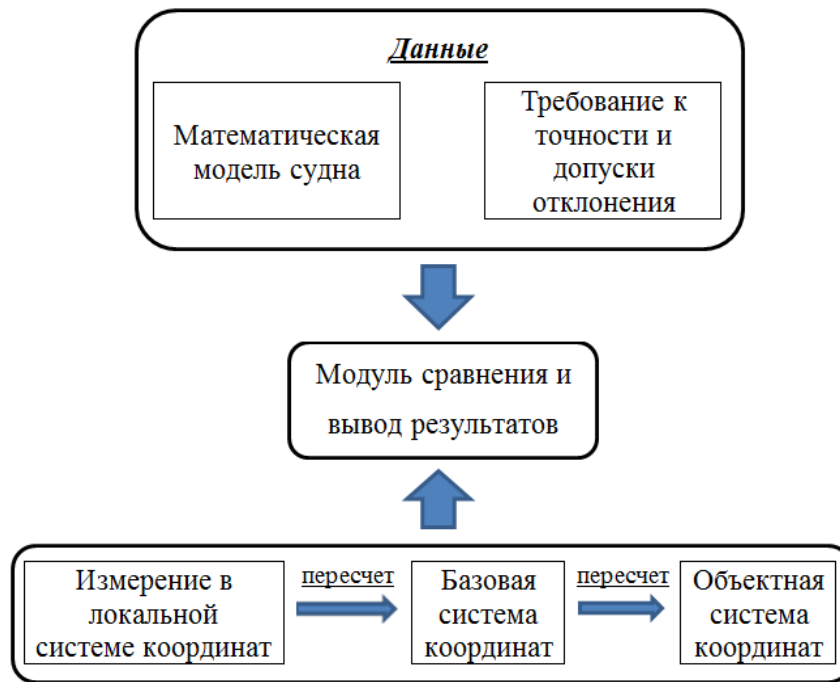


Рис. 1. Блок-схема процесса измерений и пересчета координат

Система координат, заданная плоскостью, используется при сборке секций корпуса судна, которые изготавливаются в горизонтальном положении. При этом плоскость, которая задает объектную систему координат судна, почти горизонтальна. Из математики построения объектной системы из такой базовой системы следует, что в случае горизонтального расположения объектной системы (актуальный для судостроения случай), в формулах присутствует деление на ноль. При почти горизонтальном расположении системы деление на ноль заменяется делением на величины, близкие к нулю, при этом вырастает погрешность построения системы (разность двух почти равных величин, измеренных с погрешностью, становится соизмеримой с величиной самой погрешности).

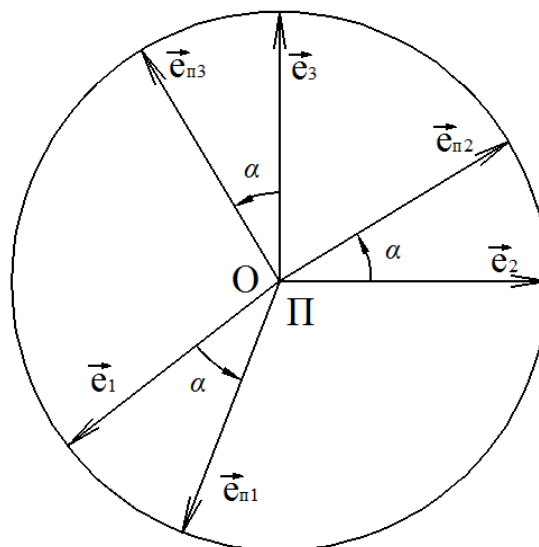


Рис. 2. Промежуточная система координат П

Для исключения проблем при определении коэффициентов пересчета, принимая во внимание изложенное ранее, целесообразно ввести промежуточную систему координат П, развернутую относительно базовой на некоторый угол.

Построим систему П следующим образом:

1) начало координат системы П совпадает с началом координат базовой системы О;

2) векторы $\vec{e}_{\Pi 1}, \vec{e}_{\Pi 2}, \vec{e}_{\Pi 3}$ развернем относительно $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ на угол α вокруг оси, проходящей через начало координат, как показано на рис. 2.

Для того чтобы производить пересчет координат из системы О в систему П, и обратно, запишем:

- для системы О: $\vec{r} = \vec{e}_1 \cdot x + \vec{e}_2 \cdot y + \vec{e}_3 \cdot z$,
- для системы П: $\vec{r} = \vec{e}_{\Pi 1} \cdot x_{\Pi} + \vec{e}_{\Pi 2} \cdot y_{\Pi} + \vec{e}_{\Pi 3} \cdot z_{\Pi}$.

Здесь r - любой радиус-вектор, имеющий начало в точке О (П):

x, y, z - координаты радиус-вектора в базовой системе координат О;

$x_{\Pi}, y_{\Pi}, z_{\Pi}$ - координаты радиус-вектора в промежуточной системе координат П.

Итак

$$\vec{r} = \vec{e}_1 \cdot x + \vec{e}_2 \cdot y + \vec{e}_3 \cdot z = \vec{e}_{\Pi 1} \cdot x_{\Pi} + \vec{e}_{\Pi 2} \cdot y_{\Pi} + \vec{e}_{\Pi 3} \cdot z_{\Pi}. \quad (1)$$

Если скалярно умножить обе части равенства (1) последовательно на $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3, \vec{e}_{\Pi 1}, \vec{e}_{\Pi 2}, \vec{e}_{\Pi 3}$, то получим уравнения для пересчета координат из системы О в систему П и обратно:

$$\begin{cases} x = (\vec{e}_{\Pi 1} \cdot \vec{e}_1) \cdot x_{\Pi} + (\vec{e}_{\Pi 2} \cdot \vec{e}_1) \cdot y_{\Pi} + (\vec{e}_{\Pi 3} \cdot \vec{e}_1) \cdot z_{\Pi} \\ y = (\vec{e}_{\Pi 1} \cdot \vec{e}_2) \cdot x_{\Pi} + (\vec{e}_{\Pi 2} \cdot \vec{e}_2) \cdot y_{\Pi} + (\vec{e}_{\Pi 3} \cdot \vec{e}_2) \cdot z_{\Pi} \\ z = (\vec{e}_{\Pi 1} \cdot \vec{e}_3) \cdot x_{\Pi} + (\vec{e}_{\Pi 2} \cdot \vec{e}_3) \cdot y_{\Pi} + (\vec{e}_{\Pi 3} \cdot \vec{e}_3) \cdot z_{\Pi} \\ x_{\Pi} = (\vec{e}_{\Pi 1} \cdot \vec{e}_1) \cdot x + (\vec{e}_{\Pi 1} \cdot \vec{e}_2) \cdot y + (\vec{e}_{\Pi 1} \cdot \vec{e}_3) \cdot z \\ y_{\Pi} = (\vec{e}_{\Pi 2} \cdot \vec{e}_1) \cdot x + (\vec{e}_{\Pi 2} \cdot \vec{e}_2) \cdot y + (\vec{e}_{\Pi 2} \cdot \vec{e}_3) \cdot z \\ z_{\Pi} = (\vec{e}_{\Pi 3} \cdot \vec{e}_1) \cdot x + (\vec{e}_{\Pi 3} \cdot \vec{e}_2) \cdot y + (\vec{e}_{\Pi 3} \cdot \vec{e}_3) \cdot z \end{cases} \quad (2)$$

Для успешного пересчета координат из системы О в систему П и обратно, необходимо сделать такой поворот системы координат, при котором мы сможем легко вычислить углы между ортами двух систем. На рис. 3 представлены различные варианты поворота векторов базовой системы в промежуточную.

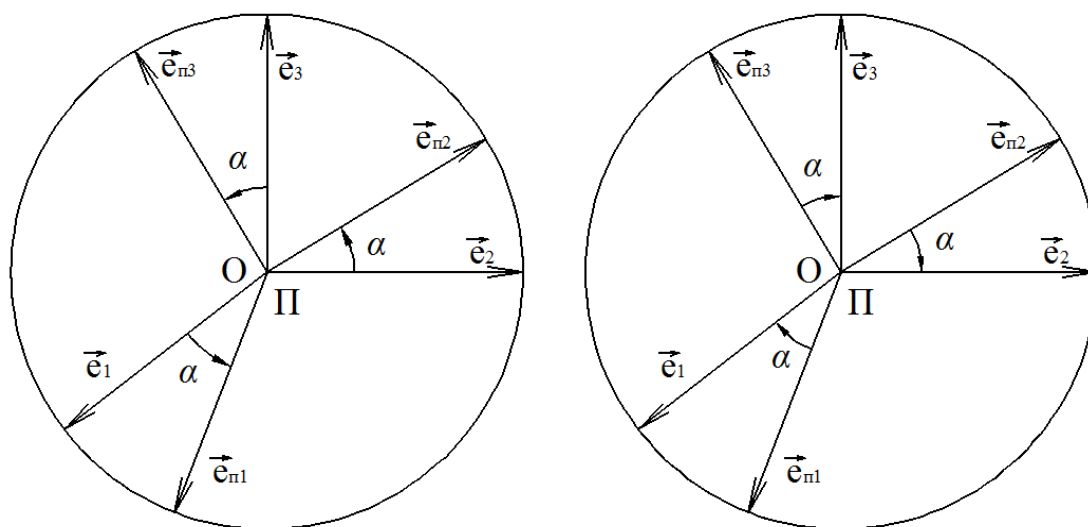


Рис. 3. Различные варианты поворота векторов базовой системы в промежуточную

Вычислим углы между ортами для варианта поворота промежуточной системы против часовой стрелки (рис. 4).

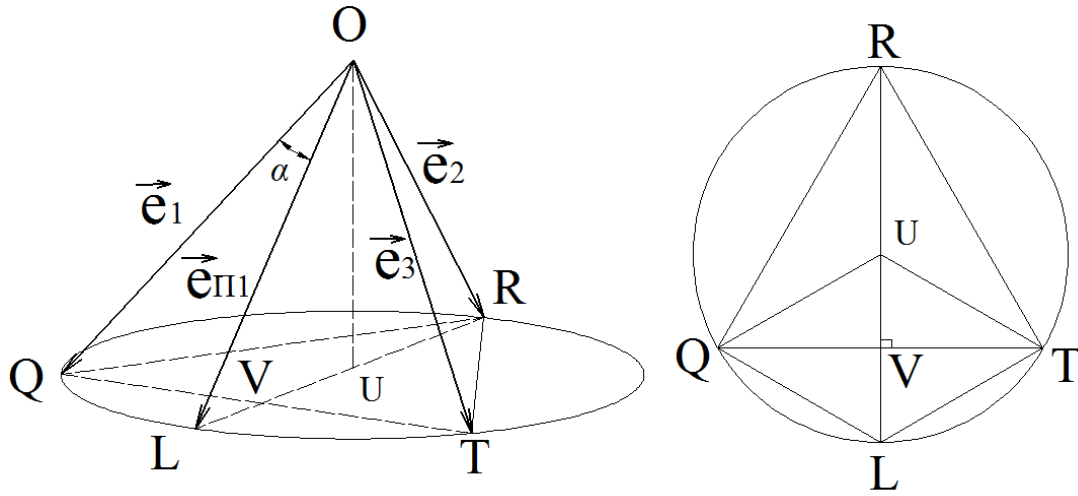


Рис. 4. Определение углов между ортами

В треугольнике OQT :

$$\begin{aligned} \angle QOT &= 90^\circ, \\ \Rightarrow QT^2 &= OQ^2 + OT^2 = 2, \\ \Rightarrow QT &= \sqrt{2}. \end{aligned}$$

Треугольник RQT – равносторонний. Так как: $RT = RQ = QT = \sqrt{2}$.

Точка U – пересечение медиан, высот и биссектрис равностороннего треугольника RQT . Следовательно,

$$LQ = UT = UR = \frac{2}{3} \cdot RT \cdot \sin 60^\circ = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{\sqrt{6}}{3}.$$

По теореме косинусов в треугольнике OQL имеем:

$$LQ^2 = OQ^2 + OL^2 - 2 \cdot OQ \cdot OL \cdot \cos \alpha,$$

где α – угол между ортами $\vec{e}_1, \vec{e}_{\Pi 1}$.

Итак

$$\cos \alpha = \frac{OQ^2 + OL^2 - LQ^2}{2 \cdot OQ \cdot OL} = \frac{2 - \frac{6}{9}}{2} = \frac{2}{3},$$

$$\Rightarrow (\vec{e}_{\Pi 1} \cdot \vec{e}_1) = 1 \cdot 1 \cdot \cos \alpha = \frac{2}{3}.$$

Мы имеем

$$\lambda_{ik} = (\vec{e}_{\Pi k} \cdot \vec{e}_i) = |\vec{e}_{\Pi k}| \cdot |\vec{e}_i| \cdot \cos(\vec{e}_{\Pi k} \cdot \vec{e}_i) = \cos(\vec{e}_{\Pi k} \cdot \vec{e}_i) = (\vec{e}_i \cdot \vec{e}_{\Pi k}) = \gamma_{ki}.$$

Аналогично определим скалярные произведения ортов для варианта поворота промежуточной системы против часовой стрелки. Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Скалярные произведения ортов для варианта поворота промежуточной системы против часовой стрелки

$\lambda_{11} = 2/3$	$\lambda_{21} = 2/3$	$\lambda_{31} = -1/3$
$\lambda_{12} = -1/3$	$\lambda_{22} = 2/3$	$\lambda_{32} = 2/3$
$\lambda_{13} = 2/3$	$\lambda_{23} = -1/3$	$\lambda_{33} = 2/3$

Окончание табл. 1

$\gamma_{11} = 2/3$	$\gamma_{21} = -1/3$	$\gamma_{31} = 2/3$
$\gamma_{12} = 2/3$	$\gamma_{22} = 2/3$	$\gamma_{32} = -1/3$
$\gamma_{13} = -1/3$	$\gamma_{23} = 2/3$	$\gamma_{33} = 2/3$

Результаты вычислений скалярных произведений ортов для варианта поворота промежуточной системы по часовой стрелке приведены в табл. 2.

Таблица 2

Скалярные произведения ортов для варианта поворота промежуточной системы по часовой стрелке

$\lambda_{11} = 2/3$	$\lambda_{21} = -1/3$	$\lambda_{31} = 2/3$
$\lambda_{12} = 2/3$	$\lambda_{22} = 2/3$	$\lambda_{32} = -1/3$
$\lambda_{13} = -1/3$	$\lambda_{23} = 2/3$	$\lambda_{33} = 2/3$
$\gamma_{11} = 2/3$	$\gamma_{21} = 2/3$	$\gamma_{31} = -1/3$
$\gamma_{12} = -1/3$	$\gamma_{22} = 2/3$	$\gamma_{32} = 2/3$
$\gamma_{13} = 2/3$	$\gamma_{23} = -1/3$	$\gamma_{33} = 2/3$

Таким образом, система (2) имеет шесть уравнений с шестью неизвестными величинами и нетрудно получить ее решение.

Заключение

Подводя итоги всему изложенному, мы пришли к следующему выводу:

1. Предлагаемый принцип решает коренную задачу по вычислению погрешности при контроле положения плоских секций судна в пространстве с помощью тахеометра ЗТа5Р6. Одновременно он открывает перспективу создания программного обеспечения для быстрого выполнения измерений для повышения точности сборки судовых конструкций.

2. Практика показывает, что применяемые бесконтактные методы измерения координат объектов на основе тахеометров позволяют повысить производительность и конкурентоспособность верфей.

Библиографический список

1. Точность в судовом корпусостроении / В. Л. Александров [и др.]. – СПб.: Судостроение, 1994. – 172 с.
2. Нгуен Чунг Ань. Контроль положения поперечных переборок судна в пространстве с помощью тахеометра ЗТа5Р6 / Нгуен Чунг Ань, В. Н. Лубенко // Вестник АГТУ. Сер. «Морская техника и технология». 2013. № 2 (октябрь). С. 46–50.
3. Нгуен Чунг Ань. Применение тахеометров в судостроении – принцип измерения и пересчета координат / Нгуен Чунг Ань, Н. П. Боронина, В. Н. Лубенко // Современный научный вестник. Сер. «Технические науки». 2014. №7 (203) С. 133–139.
4. Нгуен Чунг Ань. Контроль положения плоских секций судна в пространстве с помощью тахеометра ЗТа5Р6 / Нгуен Чунг Ань, В. Н. Лубенко // Морские интеллектуальные технологии. 2014. Т. 2. №2. С. 22–26.

Дата поступления
в редакцию 22.01.2015

Nguyen Trung Anh, V. N. Lubenko

**DECISION OF TASKS ON CALCULATION OF ERROR AT CONTROL OF POSITION
OF FLAT SECTIONS OF SHIP BY MEANS TACHEOMETER 3TA5P6**

Astrakhan state technical university

Purpose: The article discusses issues related to the practical application of tacheometers in shipbuilding. Depending on the measurement process of tacheometer (method of determining the basic coordinate system and object coordinate system for flat sections of the ship and the principle of recalculation between them) sets out the decision of tasks on calculation of error at control of position of flat sections of ship in the space.

Method: applied intermediate coordinate system.

Results: The proposed principle opens up the prospect of creating of software for fast execution of measurements to improve the accuracy assembling ship structures.

Conclusion: Practicably, the applications of tacheometers in shipbuilding improve the quality of results, labor productivity and also the competitiveness of shipyards. However, due to practical analysis works also require necessarily instructions of modern three-dimensional measurement system use and software creation in order to rapidly accomplish measurements during manufacture, exploitation, repairing ships and vessels.

Key words: shipbuilding, measurement, tacheometer 3Ta5P6, basic coordinate system, intermediate coordinate system, recalculation.

УДК 629.12.001

М.Э. Францев

ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ АМФИБИЙНОГО СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ В ЕГО КОНСТРУКЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

АО «Нептун-Судомонтаж», г. Москва

Изложены принципы повышения полезной нагрузки амфибийного судна на воздушной подушке, реализуемые на этапе проектирования, за счет использования в его конструкции крупных элементов из композиционных материалов. Приведены проектировочные уравнения, в первую очередь, уравнение нагрузки и уравнение прочности.

Ключевые слова: амфибийные суда на воздушной подушке, полезная нагрузка, композиционные материалы.

Известно, что наибольшую долю в совокупной структуре прямых расходов на эксплуатацию скоростного судна и, в частности, амфибийных катеров на воздушной подушке (далее АКВП), составляют расходы на топливо. Поэтому при обосновании основных принципиальных решений в проекте АКВП целесообразно анализировать их интегрированные расходные характеристики, включающие полную массу судна, его скорость, мощность главных двигателей, их удельный расход топлива, а также характеристики полезной нагрузки судна – дедвейт и его отдельные статьи. Наибольший интерес среди таких интегрированных характеристик представляют:

1. Коэффициент утилизации по дедвейту (полезной нагрузке) в виде:

$$\eta = \frac{DW}{D} . \quad (1)$$

2. Расход топлива на перемещение 1 т дедвейта на 1 км пути в виде:

$$P_{DW} = \frac{qN}{D\eta v} . \quad (2)$$

3. Расход топлива на перемещение одного пассажира на 1 км пути в виде:

$$P_{ПАСС} = \frac{qN}{nv} , \quad (3)$$

где D - полная масса; N - мощность главных двигателей; DW – дедвейт (полезная нагрузка); q - удельный расход топлива двигателей на номинальном режиме; v - скорость крейсерского хода; n – пассажировместимость [2].

Рассмотрим принципы повышения характеристик эффективности АСВП, реализуемых на этапе проектирования, за счет повышения его полезной нагрузки. Представим нагрузку масс амфибийного судна на воздушной подушке в виде:

$$D = \sum_{i=1}^n P_i , \quad (4)$$

где P_i – статья нагрузки.

Нагрузка масс также может быть представлена в виде

$$D = \sum_{i=1}^n P_i = D_{пор} + DW , \quad (5)$$

где $D_{пор}$ – водоизмещение порожнем.

Основными составляющими водоизмещения порожнем для амфибийных судов на воздушной подушке будут:

$$D_{\text{пор}} = P_{\text{корп}} + P_{\text{эу}} + P_{\text{ГО}} + P_{\text{ДК}} + P_{\text{НК}} + P_{\text{эл.об}} + \sum_j P_j, \quad (6)$$

где $P_{\text{корп}}$ - масса корпуса; $P_{\text{эу}}$ - масса энергетической установки; $P_{\text{ГО}}$ - масса гибкого ограждения; $P_{\text{ДК}}$ - масса движительного комплекса; $P_{\text{НК}}$ - масса нагнетательного комплекса; $P_{\text{эл.об}}$ - масса электрооборудования; $\sum P_j$ - сумма масс всех остальных статей водоизмещения порожнем, как правило, не превышающая 3-5% от общей суммы.

Составляющими дедвейта для амфибийных судов на воздушной подушке будет масса экипажа и пассажиров, а также запас топлива, который в большой степени определяет потребительские качества судна такого типа. Тогда:

$$DW = P_{\text{пасс}} + P_{\text{топл}} + \sum_g P_g, \quad (7)$$

где $P_{\text{пасс}}$ - масса пассажиров и экипажа; $P_{\text{топл}}$ - масса топлива; $\sum P_g$ - масса остальных статей дедвейта, как правило, не превышающая 3-5% от общей суммы.

Проанализировав основные статьи нагрузки масс, можно увидеть, что основным резервом увеличения полезной нагрузки АСВП является правильное проектирование его корпуса, заключающееся в оптимальном сочетании массы корпуса, его общей и местной прочности.

Подсистема «Корпус» является доминирующей среди подсистем первого уровня декомпозиции судна, как системы. Масса корпуса, в состав которой входят массы собственно корпуса АСВП и его надстройки (рубки), входит в качестве слагаемого в уравнение нагрузки и может быть выражена как

$$D = \sum P_i = P_k + \sum P_{i-1} = q_k(LBH) + \sum P_{i-1}, \quad (8)$$

где P_k - масса по статье нагрузки «Корпус»; $\sum P_{i-1}$ - масса по статьям нагрузки без статьи «Корпус»; L, B, H - длина, ширина, высота корпуса; q_k - кубический модуль, представляющий собой отношение массы корпуса к его объему, определяемый с помощью анализа баз данных.

Материал корпуса является подсистемой второго уровня декомпозиции по отношению к подсистеме «Корпус». Характеристики материала корпуса входит в качестве множителя в уравнение прочности:

$$M_{\text{max}} = k\sigma_0 W, \quad (9)$$

где M_{max} - предельный изгибающий момент от общего изгиба АСВП при наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки; σ_0 - предел прочности материала; k - коэффициент пропорциональности; W - момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе судна.

Предельный изгибающий момент при общем изгибе АСВП в наиболее неблагоприятном случае эксплуатационной нагрузки, также может быть выражен как

$$M_{\text{max}} = \frac{DL}{k_1}, \quad (10)$$

где D - полная масса судна; k_1 - коэффициент пропорциональности.

Момент сопротивления поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе может быть представлен как

$$W = \frac{\eta_k FH}{2}, \quad (11)$$

где F - площадь поперечного сечения эквивалентного бруса на миделе; η_k - коэффициент утилизации профиля эквивалентного бруса.

Приравнивая выражения (9) и (10), получим

$$\frac{DL}{k_1} = \frac{k\sigma_0\eta_k FH}{2}. \quad (12)$$

Выражение (12) отражает степень влияния материала корпусных конструкций судна на его полную массу и, как следствие, на характеристики полезной нагрузки.

Известно, что характеристики сопротивления АСВП включают составляющие, связанные с движением по водной поверхности или твердому экрану, а также составляющие, связанные с его воздушным сопротивлением. Составляющие сопротивления, связанные с движением по водной поверхности или твердому экрану, обусловлены, в большой степени, конструкцией и формой гибкого ограждения (ГО) воздушной подушки. Составляющие сопротивления АСВП, связанные с его воздушным сопротивлением, в большой степени обусловлены формой его надстройки (рубки) [1].

В соответствии со сложившейся в отечественном судостроении практикой, наиболее предпочтительным материалом для постройки скоростных судов считаются легкие сплавы. В то же время придание конструкциям из легких сплавов совершенных аэродинамических форм связано с применением достаточно сложных технологий обработки и, как следствие, с большими затратами. Поэтому наиболее предпочтительным для подсистемы «Корпус» АСВП является сочетание легких сплавов для конструкции собственно корпуса и композиционных материалов для конструкции надстройки (рубки).

Известно, что наибольшую часть массы корпуса АСВП составляет масса наружной обшивки, а на долю набора, фундаментов и подкреплений редко приходится более 15% массы корпуса [1]. Поэтому на этапе декомпозиции подсистемы «Корпус», на котором производится определение его массы, конструкция корпуса и надстройки (рубки) может рассматриваться, как оболочка.

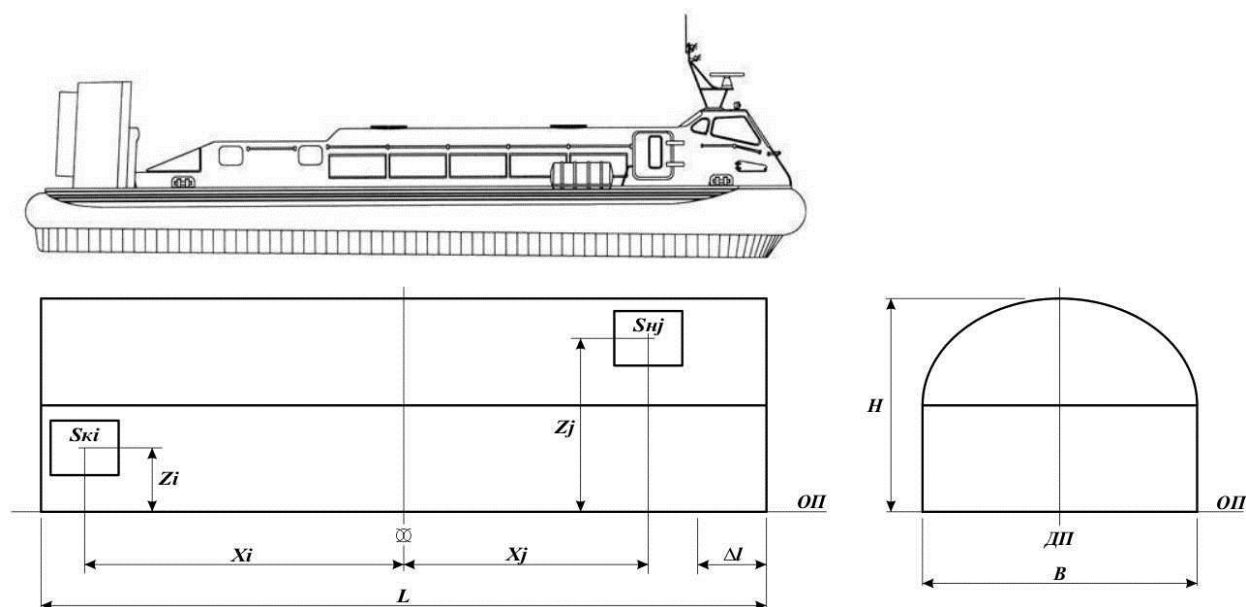


Рис. 1. Расчетная схема для определения массы корпуса АСВП, сочетающего в конструкции легкие сплавы и композиционные материалы

Можно рассматривать поверхность корпуса и надстройки АСВП в виде двух участков. Первым участком является часть корпуса упрощенной формы, находящаяся внутри ГО. Она, как правило, изготавливается из легких сплавов. Вторым участком является поверхность надстройки (рубки) судна, которую целесообразно изготавливать из композиционных материалов. Обе части входят в состав эквивалентного бруса и обеспечивают общую прочность АСВП. Из условия обеспечения прочности корпуса АСВП при общем изгибе (12) может быть выражен предел прочности материала корпуса:

$$\sigma_0 = \frac{2DL}{kk_1\eta_k FH} \cdot \quad (13)$$

Момент сопротивления эквивалентного бруса без учета площади продольного набора, которая, как правило, невелика, на этом этапе разработки проекта может быть представлен как

$$W = \eta_k (B + H) t_{cp} H, \quad (14)$$

где t_{cp} – средняя толщина обшивки.

Условие обеспечения общей прочности (9) справедливо, как для корпуса, изготовленного из легких сплавов, так и для корпуса, изготовленного из композитов. Подставив в уравнение общей прочности выражение (14), получаем

$$\eta_k (B + H) t_{cpKM} H \sigma_{0KM} = \eta_k (B + H) t_{cpLC} H \sigma_{0LC}, \quad (15)$$

где t_{cpKM} , t_{cpLC} – средняя толщина обшивки корпуса соответственно из композита и из легкого сплава; σ_{0KM} , σ_{0LC} – пределы прочности, соответственно, композита и легкого сплава.

Выражение (15) является условием равной прочности конструкций корпуса, изготовленного из легких сплавов и конструкций корпуса, изготовленного из композитов. Для корпусов, имеющих единые размеры, это условие будет иметь вид

$$\frac{t_{cpLC}}{t_{cpKM}} = \frac{\sigma_{0KM}}{\sigma_{0LC}}. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет определить предел прочности композита и его среднюю толщину при условии совместной деформации при общем изгибе корпуса, состоящего из нижней части (собственно корпуса АСВП), изготовленной из легких сплавов, и верхней части (надстройки АСВП), изготовленной из композита.

Создание конструкции из композита представляет собой решение триединой задачи. Это выбор армирующих и связующих материалов для композита (стеклопластик, углепластик), разработка его конструкции (схем армирования, послойной структуры, определение мест расположения подкрепляющих и усиливающих элементов конструкции, закладных деталей и др.), а также технологии его изготовления (контактное формование, вакуумная инфузия и проч.) На этапе разработки проекта надстройки АСВП решаются все эти вопросы.

В дополнение к нагрузкам от общего изгиба корпуса АСВП, на поверхность его нижней части, изготовленной из легких сплавов, действует комплекс локальных статических и динамических нагрузок. Поверхность надстройки из композитов подвергается эпизодическим внешним воздействиям локальных нагрузок, имеющих существенно меньшую величину и принципиально иной характер. Конструкции корпуса и надстройки АСВП обеспечивают прочность при действии этих различающихся нагрузок, поэтому имеют различную площадь поперечного сечения и соответственно различную массу единицы поверхности.

Рассмотрим элемент поперечного сечения корпуса и надстройки длиной ΔL (рис. 1) Выделим на поверхности нижней части корпуса элементарную дугу S_{ki} , а на поверхности надстройки S_{nj} . Отнесем к площадке $S_{ki} \Delta L$ массу всех конструкций G_i , находящихся на этой площадке. Соответственно к площадке $S_{nj} \Delta L$ будет отнесена масса всех конструкций G_j , находящихся на этой площадке. Тогда масса первого участка может быть представлена как

$$P_1 = \sum \sum G_i S_{ki} \Delta L. \quad (17)$$

Масса второго участка может быть определена как

$$P_2 = \sum \sum G_j S_{nj} \Delta L. \quad (18)$$

Определим моменты относительно плоскости мидель - шпангоута и основной плоскости для каждого элементарного участка. Соответственно, для нижней части (собственно, корпуса) и верхней части (надстройки) корпуса АСВП запишем:

$$M_{1x} = \sum \sum G_i S_{ki} X_i \Delta L, \quad (19)$$

$$M_{1z} = \sum \sum G_i S_{ki} Z_i \Delta L, \quad (20)$$

$$M_{2x} = \sum \sum G_j S_{nj} X_j \Delta L, \quad (21)$$

$$M_{2z} = \sum \sum G_j S_{nj} Z_j \Delta L. \quad (22)$$

Масса всего корпуса АСВП равна:

$$P_1 + P_2 = \sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{ni} \Delta L \quad (23)$$

Координаты его центра тяжести определяются, как:

$$X_{gk} = \frac{(M_{1x} + M_{2x})}{P_k} = \frac{(\sum \sum G_i S_{ki} X_i \Delta L) + (\sum \sum G_j S_{nj} X_j \Delta L)}{\sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{ni} \Delta L} \quad (24)$$

$$Z_{gk} = \frac{(M_{1z} + M_{2z})}{P_k} = \frac{(\sum \sum G_i S_{ki} Z_i \Delta L) + (\sum \sum G_j S_{nj} Z_j \Delta L)}{\sum \sum G_i S_{ki} \Delta L + \sum \sum G_j S_{ni} \Delta L} \quad (25)$$

Используя выражения (20)–(25), варьируя толщину и другие характеристики материалов корпуса и надстройки АСВП, можно оптимизировать массу корпуса и надстройки судна, обеспечивая положение центра тяжести судна в соответствии с условиями, определенными из уравнения ходкости и необходимого дифферента. Изменение весовых и механических характеристик материалов корпуса и надстройки АСВП позволяет, в определенных пределах, управлять положением центра тяжести по высоте, что дает возможность влиять на характеристики остойчивости судна.

Оценим эффект от применения в конструкции АСВП композитов. Представим полную массу судна в виде

$$D = \sum P_i = q_k(LBH) + p_m N + p_T Nt + \sum P_{i-3}, \quad (26)$$

где p_m – измеритель по статье «Механизмы»; p_T – измеритель по статье «Топливо»; t – продолжительность рейса; $\sum P_{i-3}$ – масса по статьям нагрузки без статей «Корпус», «Механизмы», «Топливо».

Если неизвестен измеритель p_T , запас топлива может быть рассчитан также по предполагаемой дальности действия АСВП. В этом случае определяется продолжительность предполагаемого рейса по заданному радиусу действия:

$$t = \frac{2l}{kv}, \quad (27)$$

где t – продолжительность окружного рейса, ч; l – дальность действия АСВП, км; k_2 – коэффициент, учитывающий снижение линейной скорости за счет непрямолинейной траектории движения, препятствий и других подобных факторов $1 > k = 0,7-0,8$;

$$P_{\text{топл}} = q_m n N t = \frac{2q_m N l}{k_2 v}, \quad (28)$$

где q_m – удельный расход топлива главных двигателей на полной мощности.

Для АСВП мощность главных двигателей может быть представлена как

$$N = a D v \quad (29)$$

где a – коэффициент пропорциональности, определяемый при анализе базы данных.

Подставив выражение (29) в (26) получаем:

$$D = q_k(LBH) + a p_m D v + a D v p_T + \sum P_{i-3} \quad (30)$$

Снижение массы корпуса за счет применения композитов представим как ΔP_k . Снижение массы корпуса позволяет дополнительно снизить массу главных двигателей за счет снижения потребной мощности, достаточной для поддержания заданной скорости. Кроме того, дополнительно может быть уменьшен запас топлива за счет снижения расходных характеристик двигателей. Образовавшаяся экономия полной массы ΔD может быть направлена на увеличение полезной нагрузки судна (например, увеличение количества пассажиров или прием, в дополнение к имеющимся пассажирам, генерального груза), которое может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \Delta D &= \Delta D W = \Delta P_k + a p_m \Delta P_k v + a p_T \Delta P_k v t = \\ &= \Delta P_k (1 + a p_m v + a p_T v t). \end{aligned} \quad (31)$$

Возвращаясь к интегрированным расходным характеристикам АСВП (1)–(3), можно увидеть, что за счет увеличения полезной нагрузки происходит улучшение экономических показателей эксплуатации АСВП. Кроме того, в качестве варианта повышения потребительских качеств АСВП, образовавшаяся экономия полной массы частично может быть направлена на повышение запаса топлива и соответственно увеличение дальности действия судна. Сохранение первоначальной мощности главных двигателей при снижении массы корпуса влечет за собой увеличение энерговооруженности АСВП, что, как правило, способствует повышению его амфибийных качеств.

Библиографический список

1. **Андреев, Г.Е.** По воде и по суше (Очерки о разработке и применении судов-амфибий) / Г.Е. Андреев [и др.]. – М. ИНИЦ Роспатента, 2002. – 272 с.
2. **Францев, М.Э.** Анализ эксплуатационных и экономических аспектов в модели проектной оптимизации амфибийных катеров на воздушной подушке, предназначенных для перевозки пассажиров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева; НГТУ. Нижний Новгород, 2012. №2. С. 179–184.

*Дата поступления
в редакцию 22.01.2015*

M. E. Frantsev

PROJECT JUSTIFICATION TO INCREASE THE USEFUL LOAD OF AMPHIBIOUS HOVERCRAFT USING COMPOSITE MATERIALS IN ITS DESIGN

«Neptun-Sudomontaj», Moscow

Subject: The article outlines the principles for increasing payload amphibious hovercraft, which can be implemented at the design stage, using elements of composite materials. Engineering equation given in the first equation and the equation of the load resistance.

Approach: When the basic decisions in the project amphibious hovercraft are justified, it is advisable to analyze their integrated metering characteristics, including the full weight of the ship, its speed, main engine power, specific fuel consumption, and the characteristics of the load on the vessel - dwt and its components.

Conclusions: After analyzing the main components of the load mass, you can see that the main reserve increase in payload amphibious hovercraft is the correct design of its body, which consists in the optimal combination weight of the body, the General and local strength. Economic performance amphibious hovercraft may be improved by increasing its useful load.

Key words: amphibious hovercrafts, payload, composites.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.24

Е.Н. Соснина¹, А.В. Шалухо¹, С.А. Анисимов², И.А. Липужин¹, А.А. Смирнов¹

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Теком», г. Нижний Новгород²

Рассмотрены особенности электротехнических комплексов с ветродизельными электростанциями с точки зрения устойчивости их работы, а также причины и последствия нарушений статической и динамической устойчивости. Обосновано применение имитационного моделирования для исследования устойчивости в электротехнических комплексах с возобновляемыми источниками энергии. Приведено описание составных блоков, входных переменных с пределами их изменения и исследуемых режимов имитационной модели электротехнического комплекса с ветродизельной электростанцией.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, ветродизельная электростанция, имитационная модель, статическая устойчивость, динамическая устойчивость.

Введение

Одной из ключевых задач для России является промышленное и социальное развитие удаленных восточных регионов. Рост численности населения и реализация инвестиционных проектов напрямую связаны с необходимостью увеличения объемов электроэнергии.

Вариант электрификации путем расширения объединенных энергосистем для большинства восточных районов страны является нерентабельным [1]. Низкая плотность населения и значительные ресурсы ветровой и солнечной энергии в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке делают перспективным создание электротехнических комплексов малой мощности с комбинированным использованием энергоустановок на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) и органическом топливе [2, 3].

Для нормального функционирования системы электроснабжения с ВИЭ, как и для любой электроэнергетической системы, еще на стадии проектирования необходимо решить вопросы обеспечения устойчивости.

Обоснование выбора подхода к исследованию устойчивости в электротехнических комплексах с возобновляемыми источниками энергии

Исследованиями в области устойчивости электротехнических комплексов занимаются на протяжении десятков лет многие ученые и специалисты. Разработаны решения по обеспечению и повышению устойчивости крупных энергосистем, систем электроснабжения промышленных предприятий и городов [4, 5]. Технические требования, которым должны удовлетворять электроэнергетические системы в отношении устойчивости, содержатся в специальных методических указаниях [6].

Однако это касается только крупных энергосистем. Электротехнические комплексы с ВИЭ обладают рядом важных особенностей:

- нестабильный график выдачи мощности (вследствие случайного характера изменения скорости и плотности ветра);
- нестабильный график нагрузки при соизмеримых мощностях энергоустановок и потребителей.

Данные особенности приводят к необходимости проведения отдельных исследований и разработке собственных решений по оценке и повышению устойчивости систем электропитания с ВИЭ [7].

Объектом исследования является электротехнический комплекс с ветродизельной электростанцией (ВДЭС). Ветровая энергоустановка (ВЭУ) и дизельная электростанция (ДЭС) сопряжены через шину постоянного тока (рис. 1).

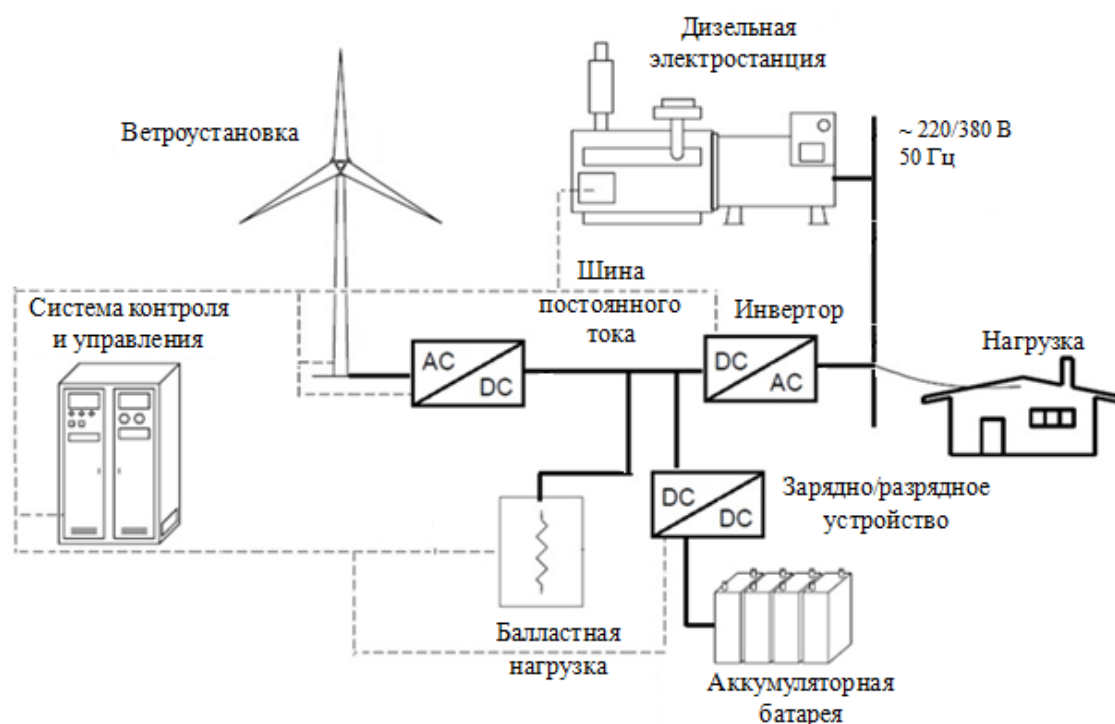


Рис. 1. Структурная схема электротехнического комплекса с ветродизельной электростанцией

Приведенная схема сопряжения источников энергии является наиболее перспективной и распространенной [8]. Электроэнергия от ВЭУ и ДЭС после преобразования поступает на шину постоянного тока, к которой подключены потребители, аккумуляторная батарея и балластная нагрузка. Потребители получают питание через инвертор на переменное напряжение 220/380 В. Аккумуляторная батарея осуществляет отбор мощности в моменты избытка, и отдает ее при нехватке в системе, реализуя, таким образом, функции управления потоками энергии. Не отобранная аккумуляторной батареей мощность в момент избытка рассеивается на балластной нагрузке. Исследуемая система является изолированной, возможность подключения к централизованной сети не рассматривается.

В электротехническом комплексе с ВДЭС, как и в любой электроэнергетической системе, должны обеспечиваться статическая и динамическая устойчивость. Нарушения статической устойчивости связаны с малыми изменениями режима работы системы, при которых отклонения параметров несоизмеримо малы по сравнению со значениями этих параметров. Под динамической устойчивостью понимается способность системы вернуться к установившемуся режиму после нарушений без перехода в асинхронный режим. Причины нарушений устойчивой работы электротехнического комплекса с ВДЭС различны, а последствия могут быть очень серьезными (табл. 1).

Таблица 1

**Причины и последствия нарушения устойчивости электротехнических комплексов
с ветродизельными электростанциями**

Устойчивость	Причины нарушения	Последствия нарушения
Статическая устойчивость	1) изменение генерируемой мощности ветроустановки; 2) незначительное изменение нагрузки	изменение параметров режима работы системы: - напряжение у потребителей; - угол нагрузки; - частота в системе
Динамическая устойчивость	1) неправильный выбор параметров компонентов схемы; 2) нарушения в работе отдельных компонентов; 3) нарушения в работе системы управления; 4) скачкообразные изменения генерируемой мощности ветроустановки и нагрузки	1) недоотпуск электроэнергии; 2) повышенный расход дизельного топлива; 3) нарушение электроснабжения потребителей

Устойчивая работа электротехнического комплекса с ВДЭС должна поддерживаться системой контроля и управления. В последнее время число научных исследований, посвященных управлению режимами электротехнических комплексов с ВИЭ, заметно возросло. Решаются вопросы поддержания баланса токов, обеспечения параллельной работы разнохарактерных энергоустановок, ведения правильного режима заряда/разряда аккумуляторных батарей [9, 10].

Тем не менее, задачи в области повышения устойчивости ВДЭС считать полностью решенными нельзя. В частности, отсутствуют подробное описание взаимосвязи между причинами и последствиями нарушений устойчивости и методика расчета количественных показателей устойчивости. Решение этих задач способствовало бы совершенствованию алгоритмов управления электротехнических комплексов с ВИЭ.

Для оценки устойчивости крупных энергосистем в инженерных расчетах применяются методики практической и математической оценок. Практические критерии основаны на физических представлениях о механизме нарушения устойчивости и позволяют установить предельный режим и границу устойчивости при выбранном способе воздействия на систему электроснабжения. Математическая оценка заключается в исследовании уравнений движения, записанных в виде уравнений малых колебаний [5]. Однако корректное использование классических методик для оценки устойчивости электротехнических комплексов с ВДЭС невозможно. Практические критерии оценки предполагают ряд допущений (напряжение приемной системы постоянно; частота системы постоянна; скорость вращения ротора синхронной машины изменяется в малых пределах от синхронной скорости), которые не правомерны для систем электроснабжения с ВДЭС. При математической оценке возникают проблемы, связанные с невозможностью введения количественных показателей для оценки устойчивости и необходимостью разработки большого числа математических моделей для отдельных компонентов комплекса.

**Имитационная модель электротехнического комплекса
с ветродизельной электростанцией**

Данные недостатки в значительной степени устраняются при использовании имитационного моделирования. В пакете Matlab Simulink разработана имитационная модель электротехнического комплекса с ВДЭС, в котором ВЭУ и ДЭС сопряжены через шину постоянного тока. Блок-схема модели представлена на рис. 2.

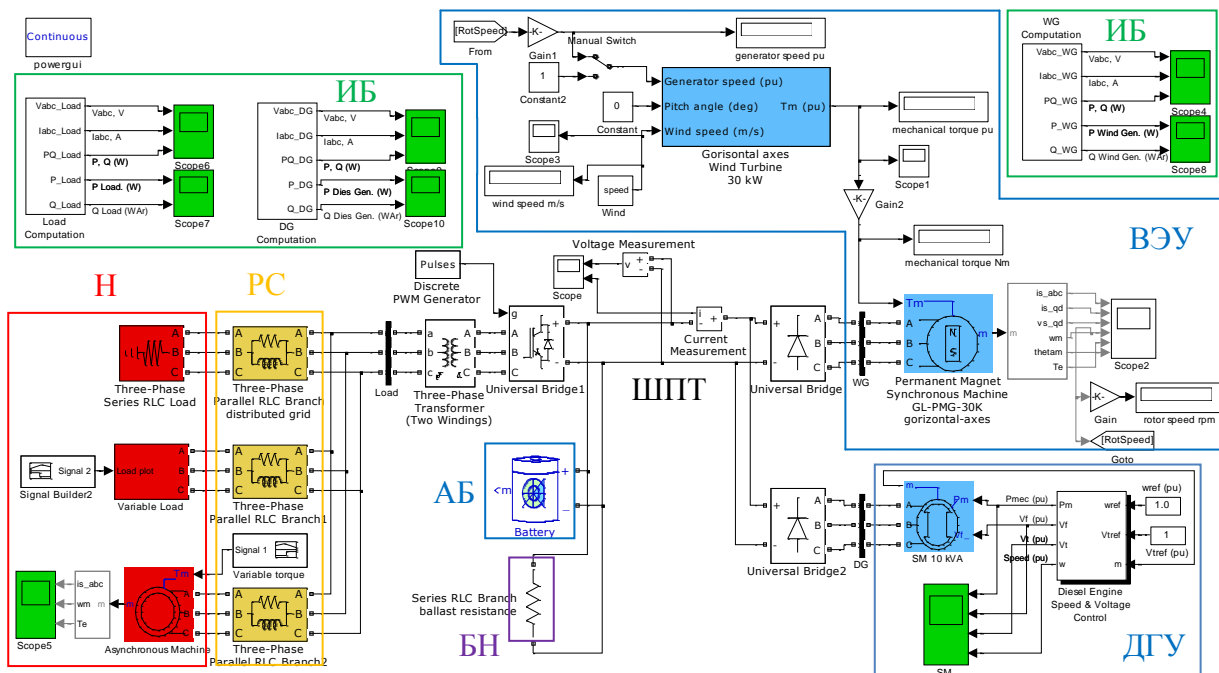


Рис. 2. Имитационная модель электротехнического комплекса с ветродизельной электростанцией:

АБ – аккумуляторная батарея; БН – балластная нагрузка;
 ВЭУ – ветроэлектроустановка; ДГУ – дизель-генераторная установка;
 ИБ – измерительные приборы; Н – нагрузка; РС – распределительная сеть

Имитационная модель включает восемь взаимосвязанных блоков:

- 1) ВЭУ, состоящую из ветротурбины с горизонтальной осью вращения (без редуктора) и синхронного генератора на постоянных магнитах GL-PMG-30K мощностью 30 кВт;
- 2) ДГУ с переменной частотой вращения, состоящую из дизельного двигателя с системой управления и синхронного генератора мощностью 10 кВт;
- 3) блок нагрузки, позволяющий моделировать потребителей электроэнергии тремя различными способами: комплексной активно-индуктивной нагрузкой, графиком нагрузки и с помощью асинхронного двигателя с переменной нагрузкой на валу;
- 4) блок, моделирующий распределительную электрическую сеть (кабельные линии);
- 5) шину постоянного тока, выпрямители, автономные инверторы и коммутационную аппаратуру;
- 6) аккумуляторную батарею;
- 7) балластную нагрузку, заданную активным сопротивлением;
- 8) измерительные приборы для контроля основных электрических величин.

Основными входными переменными имитационной модели являются: скоростной напор ветра и мощность нагрузки. Граничные значения переменных выбраны исходя из поставленных задач по исследованию устойчивости. Для электротехнического комплекса с ВДЭС к нарушению статической устойчивости могут привести незначительные изменения мощности, генерируемой ветроустановкой и/или потребляемой нагрузкой. К нарушению динамической устойчивости приводят аналогичные нарушения, но скачкообразного характера. Поэтому для обеспечения возможности исследования устойчивости при различных режимах работы электротехнического комплекса в имитационной модели предусмотрены возможности изменения скорости ветрового потока от 0 до 10 м/с и мощности нагрузки от 0 до 50 кВт.

В зависимости от соотношения входных переменных моделируемые режимы разделены на три группы:

- 1) потребители получают электроэнергию от ВЭУ, при этом $S_{ВЭУ} \geq S_H$:

- если $S_{ВЭУ} > S_H$, то избыток мощности расходуется на зарядку АБ;
- если $S_{ВЭУ} > S_H$ и заряд батареи максимален $U_{АБ} > \max$, то не использованная мощность рассеивается в балластной нагрузке.

2) питание потребителей осуществляется от ДГУ, при этом $S_{ВЭУ} = 0$ (штиль или ВЭУ отключена);

3) ВЭУ и ДГУ работают параллельно на нагрузку при нехватке мощности ВЭУ ($S_{ВЭУ} \leq S_H$); если $S_{ВЭУ} = S_H$ и заряд АБ ниже минимального значения, то ДГУ включается для заряда АБ.

Построение модели основано на методе итерационных последовательных усложнений. На каждом этапе будет происходить оценка целевых свойств модели, ее верификация и калибровка, т.е. коррекция имитационной модели с целью приведения в соответствии с предъявляемыми требованиями и усложнением [11, 12].

По завершении итерационных усложнений модель будет проверена на корректность. По результатам проверки будут внесены исправления и корректировки до приемлемого уровня. Оценка адекватности разрабатываемой модели будет осуществляться путем ее экспертизы на тестовых данных. Это является неотъемлемым этапом имитационного моделирования, поскольку отсутствие строгой математической модели, как и при любом численном методе, может привести к частному виду результата моделирования.

Выводы

Таким образом, исследование имитационной модели электротехнического комплекса с ВДЭС позволит установить взаимосвязь между причинами и последствиями нарушения устойчивости; оценить устойчивость системы при переходе от одного режима работы к другому. Изменяя величины входных переменных (скоростной напор ветра и мощность нагрузки) в режиме параллельной работы ВЭУ и ДЭС, представляется возможным установить допустимые пределы параметров режима, что позволит скорректировать алгоритмы управления ВДЭС. Система управления, учитывающая контроль параметров устойчивости электротехнического комплекса, повысит надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей. Также результаты исследований могут быть использованы при разработке методических указаний по расчету устойчивости в системах с ВИЭ и для создания единых технических требований по подключению ВИЭ к сети.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.574.21.0009 о предоставлении субсидии от 17.06.2014). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0009.

Библиографический список

1. Схемы и программы перспективного развития ЕЭС // Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: <http://so-ups.ru> (дата обращения: 10.11.2014)
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Утверждена Расп. Прав. РФ от 13 ноября 2009 года № 1715-р. – М., 2009.
3. **Филиппов, С. П.** Перспективы применения электрогенерирующих установок малой мощности / С. П. Филиппов // Атомная энергия. 2011. №5.
4. **Веников, В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
5. **Жданов, П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
6. СО 153-34.20.576-2003. Министерство энергетики Российской Федерации. Методические указания по устойчивости энергосистем. Правила и инструкции. Утв. 2003-06-30. – М.: НЦ ЭНАС, 2004. – 15 с.
7. **Sosnina, E.** Research of static stability of autonomous power supply system with wind-diesel power

- plant / E. Sosnina., A. Shalukho, I. Lipuzhin // The challenges of contemporary science. Theory and applications. – Warsaw, 2014. P. 61–62.
8. **Обухов, С.Г.** Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Промышленная энергетика. 2012. Вып. 7. С. 46–51.
 9. **Сарсикеев, Е.Ж.** Математическая модель ветротурбины малой мощности в MATLAB SIMULINK // Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал. 2012. №2. С. 42–48.
 10. **Куфтин, Д.С.** Повышение устойчивости систем внутреннего электроснабжения с собственной генерацией при соизмеримой с нагрузкой мощностью: дисс. ... канд. техн. наук / Куфтин, Д.С. – М., 2013. – 181 с.
 11. **Замятина, О.М.** Компьютерное моделирование: учеб. пособие / О.М. Замятина. – Томск: ТПУ, 2007. – 121 с.
 12. **Евдокунин, Г.А.** Принципы имитационного моделирования процессов в электроэнергетических системах / Г.А. Евдокунин, Е.Н. Попков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. Т5(181). С. 46–49.

*Дата поступления
в редакцию 12.02.2015*

E.N. Sosnina¹, A.V. Skalukho¹, S.A. Anisimov², I.A. Lipuzhin¹, A.A. Smirnov¹

RESEARCH OF STABILITY OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES WITH WINDDIESEL POWER PLANTS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
LLC «Tecom»², Nizhny Novgorod

Purpose: Research of questions of stability of an electrotechnical complex with winddiesel power plant.

Methodology: Authors proposed approach to evaluating the sustainability of the electrotechnical complex with wind-diesel power plant based on simulation.

Results: The article presents the stages of development of a simulation model of electrotechnical complex with wind-diesel power plant. Block diagram of the modeled system is shown, model parts and their parameters are described, the range of variation of values proved and modeled modes are listed. The advantages and disadvantages of using simulation to solve the problem noted in the conclusions.

Key words: Electrotechnical complex, winddiesel power plant, imitating model, static stability, dynamic stability.

УДК 631.314

В.А. Тихомиров, Г.В. Свердлик

**ПРОГРАММИРУЕМЫЙ РЕГУЛЯТОР НАГРЕВА
ДЛЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ООО «Экологические технологии», г. Балахна

Различные существующие регуляторы температуры способны лишь поддерживать заданный уровень температуры, но не могут формировать график температуры во времени. И тем более они не способны формировать многозонный график нагрева.

Предлагается техническая реализация программируемого многозонного регулятора нагрева с автоматическим повтором циклов нагрева. Разработанный программируемый регулятор температуры содержит в своём составе три основных элемента: программируемый промышленный контроллер, сенсорную графическую панель и установленную на персональном компьютере программу для архивирования параметров процесса нагрева. Причём все три элемента соединяются между собой с помощью интерфейсных кабелей. Если персональный компьютер имеет доступ в интернет, то возможно дистанционное наблюдение или считывание параметров процесса нагрева.

В качестве регулятора применен релейный ШИМ-регулятор с автоматической настройкой времени нагрева в зависимости от рассогласования между заданной температурой и реальной, измеряемой датчиком температуры, помещенном в нагреваемую среду.

Ключевые слова: программируемый регулятор нагрева, промышленный контроллер, сенсорная графическая панель, архивирование данных.

Во многих странах все большее внимание уделяется экологии и ресурсосбережению. Значительное влияние на экологию оказывают бытовые и производственные отходы от упаковки. Различные виды современной упаковки обычно содержат в своем составе бумагу, полиэтилен, фольгу и другие материалы. При использовании упакованной продукции эти составляющие обычно образуют твердые бытовые отходы.

Полимерная пленка, выделенная из твердых бытовых отходов, может использоваться для получения новых композиционных материалов [1]. Отходы термопластов часто перерабатывают в строительные изделия (кровельные покрытия, черепица, строительные бруски и т.п.). Сущность технологии заключается в сухом измельчении компонентов, их смешивании (содержание полиэтиленовой пленки в смеси – 30-70%), нагревании полученной смеси до получения расплава (температура 150-300°C), прессовании, экструзии, литье под давлением.

Нагрев широко также используется для получения и очистки различных веществ. При этом широко применяются разнообразные технологические методы. Один из них – метод возгонки [2]. Возгонкой или сублимацией называют процесс, при котором кристаллическое вещество, нагретое ниже его температуры плавления, переходит в парообразное состояние (минуя жидкое), а затем оседает на холодной поверхности в виде кристаллов.

Оба описанных ранее технологических процесса требуют организации нагрева исходных материалов. Именно для этих целей был разработан программируемый регулятор нагрева. Он предназначен для формирования заданного многозонного кусочно-линейного графика нагрева технологической среды и автоматического поддержания температуры в соответствии с заданием. Задающий график должен обеспечивать до 10 зон нагрева с возможностью повтора этих зон от 1 до 99 раз (циклов).

Для автоматического поддержания задающего графика температуры необходимо построение замкнутой системы с регулятором и в нагреваемой среде должен быть установлен датчик действительной температуры.

При автоматизации сложных технологических процессов в настоящее время обычно применяют программируемые промышленные контроллеры. Промышленный контроллер является законченным устройством, которое обладает широкими возможностями по реализации программным способом различных алгоритмов управления, и содержит встроенные регуляторы для автоматического регулирования параметров технологического процесса. Промышленный контроллер всегда имеет несколько блоков расширения и встроенных интерфейсов для связи с внешними устройствами. Все это позволяет выполнять программирование контроллера в соответствии с заданным алгоритмом управления, вводить в промышленный контроллер командные сигналы и сигналы от внешних датчиков, выдавать на внешние устройства управляющие и информационные сигналы (сигналы к регулирующим усилителям и сигналы для формирования базы данных технологического процесса - архива).

Для оперативного изменения параметров программы в промышленном контроллере и визуального наблюдения параметров технологического процесса наиболее подходит другой элемент современных систем автоматизации – программируемая сенсорная графическая панель.

Связка из промышленного контроллера и сенсорной панели может быть дополнена установленной на персональном компьютере программой для архивирования параметров процесса нагрева. Если персональный компьютер имеет доступ в Интернет, то возможно дистанционное наблюдение или считывание параметров процесса нагрева из архива.

Именно расписанная ранее концепция и была принята для реализации программируемого регулятора нагрева.

Вот как может выглядеть примерный задающий график программируемого нагрева.

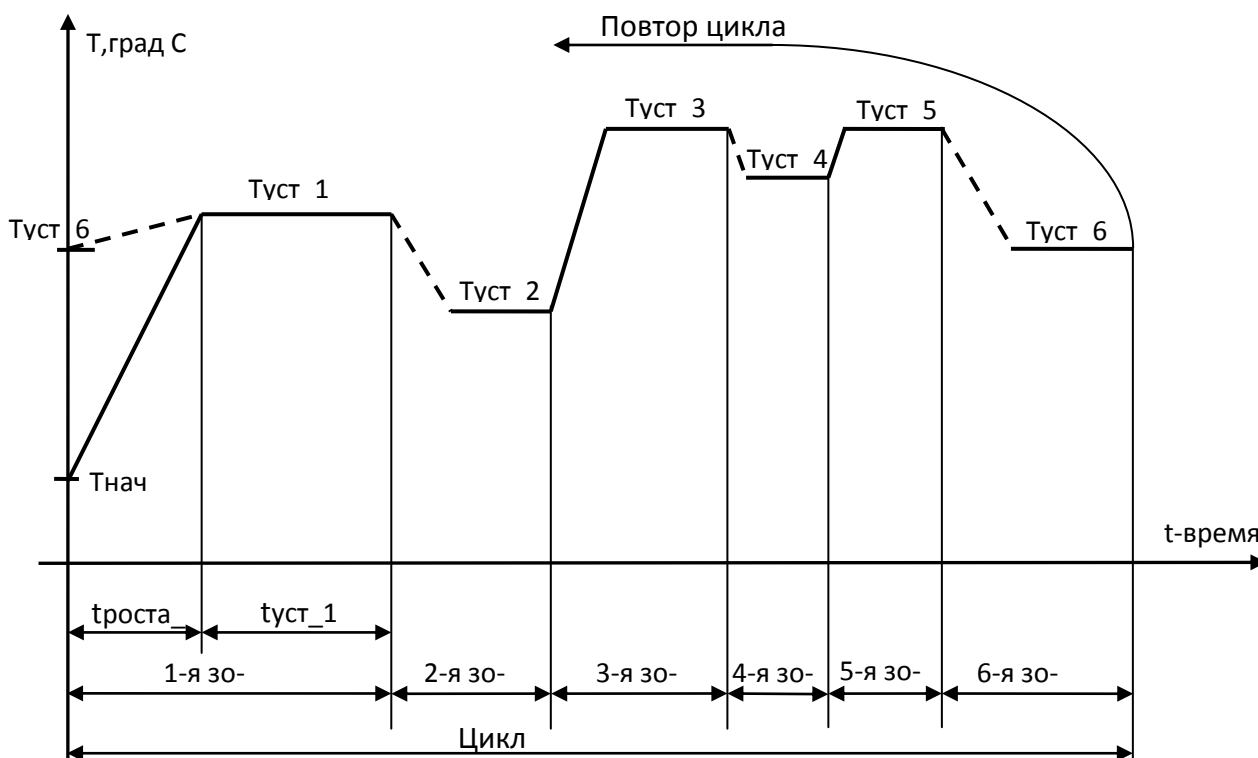


Рис. 1

На программируемых зонах возможны участки нарастания и снижения температуры. Участки снижения на графике показаны пунктиром. Снижение температуры возможно за счет естественного или принудительного охлаждения нагреваемой среды до заданной установившейся температуры.

Для реализации программируемого регулятора нагрева был применен промышленный контроллер тайваньской фирмы FATEK. С помощью его формируется задающий график нагрева и реализуются два возможных вида регулятора: релейный или ПИД-регулятор. Заказчик сам выбирает подходящий для него вид регулятора.

Технические характеристики задатчика температуры нагрева:

1. Программа нагрева формируется по зонам. В каждой зоне обеспечивается или нарастание температуры, или ее поддержание (удержание). Максимальное количество зон нагрева – 6. Совокупность зон нагрева формирует цикл. Первая зона нагрева всегда начинается с температуры окружающей среды.

2. Минимальное время удержания температуры – 1 мин, максимальное время удержания – 999 ч (40 суток).

3. Максимальная температура нагрева среды 600° С.

4. Длительность цикла складывается из длительностей зон нарастания, зон удержания и зон снижения температуры. Если после какой-либо зоны удержания устанавливается новая зона удержания с пониженной температурой, то охлаждение происходит естественным образом.

5. Обеспечивается автоматический повтор цикла. Количество автоматических повторов – до 99. Новый цикл должен начинаться с температуры последней зоны в предыдущем цикле. Общее время нагрева – до трех месяцев (90 суток).

6. Команда на начало нагрева подается оператором с сенсорного экрана. Предусмотрена кнопка *ручного* останова нагрева в любой момент времени.

7. Автоматический регулятор предназначен для автоматического поддержания заданного графика температуры нагреваемой среды. Поэтому в среду должен быть помещен датчик температуры.

8. Предусмотрена возможность ручной регулировки мощности нагревателя.

Нарастающие участки температуры формировались в контроллере с помощью цифрового счетчика, подсчитывающего импульсы от генератора импульсов. Период импульсов рассчитывался контроллером по следующей формуле:

$$t_{\text{имп}} = t_{\text{рост}} / T_{\text{рост}},$$

где $t_{\text{рост}}$ – время роста температуры; $T_{\text{рост}}$ – код роста температуры, равный разности заданной установившейся температуры на зоне нагрева и начальной температуре на этой зоне $T_{\text{уст}} - T_{\text{нач}}$ (см. график ранее).

Описание регулятора температуры

Автоматическое поддержание заданной температуры осуществляется с помощью имеющихся в контроллере двух типов программных регуляторов. Это релейный регулятор на компараторе или цифровой ПИД-регулятор.

Выход релейного регулятора через логический транзисторный выход контроллера подсоединяется к ключевому усилителю на тиристорах или твердотельных реле, работающих в режиме включено-выключено.

Выход ПИД-регулятора через цифро-аналоговый преобразователь подключается к силовому тиристорному преобразователю с фазовым управлением выходным напряжением [3].

Названные усилители питают нагреватели среды, в качестве которых применяются ТЭНы.

При релейном регуляторе силовая часть отличается простотой, но обеспечивает точность поддержания заданной температуры $\pm 2\%$.

При использовании тиристорного преобразователя с фазовым управлением силовая часть несколько сложнее, так как для реализации фазового управления требуется система

импульсно-фазового управления на маломощных электронных компонентах. Нами предлагается собственная разработка такой системы. ПИД-регулятор с тиристорным усилителем может обеспечить точность поддержания заданной температуры $\pm 0,2\%$.

Задающий график нагрева формируется в контроллере и программируется с помощью управляющей сенсорной панели Weintek MT6050i. Сенсорная панель имеет несколько рабочих экранов. При включении панели первым является главный экран, на котором находятся сенсорные командные кнопки и можно наблюдать весь процесс нагрева:



Рис. 2

С помощью сенсорной кнопки «Пуск» начинается процесс нагрева по заданной программе. С помощью кнопки «Стоп» процесс нагрева может быть остановлен в любой момент времени. Между кнопками «Пуск» и «Стоп» находится индикатор состояния этих кнопок. Если процесс нагрева не запущен или остановлен, то этот индикатор имеет красный цвет и мигает. Если процесс нагрева запущен, то этот индикатор имеет зеленый цвет и не мигает.

Справа от кнопок находятся цифровые дисплеи, назначение которых понятно из расположенных над ними поясняющих надписей.

Слева от «Индикатора времени нагрева» находится квадратная рамка, в которой по окончании заданного процесса нагрева появится надпись «Нагрев окончен».

Внизу первого главного экрана находятся сенсорные кнопки перехода ко второму экрану «Задание количества зон и циклов» и к третьему экрану, который называется «Задание временных параметров нагревателя» для задания параметров ШИМ-регулятора мощности нагрева. На третьем экране задаются временные параметры подачи энергии на нагреватель (ТЭНы). Способ подачи энергии называется «Широтно-импульсная модуляция». Этот способ обеспечивает дозированную подачу энергии на нагрев. Его идея поясняется рис. 3.

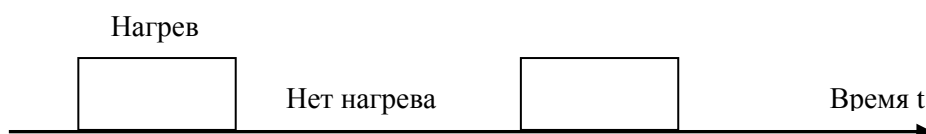


Рис. 3

Здесь на интервале «нагрев» нагреватель включен, на интервале «нет нагрева» он выключен. Средняя мощность, выделяемая на нагревателе, равна

$$P_{cp} = P_{max} * T_{нагр} / (T_{нагр} + T_{пауз}),$$

где P_{max} – установленная мощность нагревателя.

На третьем экране задается начальное время нагрева «нач $T_{нагр}$ », возможное приращение времени нагрева « $dT_{нагр}$ » и время паузы « $T_{пауз}$ ». Начальное время нагрева «нач $T_{нагр}$ » определяет первоначальную величину включенного состояния нагревателя. Реальное время включенного состояния нагревателя фиксируется на отдельном дисплее «реал $T_{нагр}$ ». В процессе нагрева «реал $T_{нагр}$ » рассчитывается контроллером в зависимости от отклонения температуры от заданной следующим образом:

$$реалT_{нагр} = начT_{нагр} + dT.$$

В свою очередь dT определяется как $dT_{нагр} * \Delta t$. Здесь Δt - это отклонение реальной температуры от заданной. Подбирая вручную время паузы, можно эффективно менять время отдачи энергии от нагревателя к нагреваемой среде.

На четвертом и пятом экранах задаются параметры нагрева на зонах. Вот скриншот четвертого экрана.



Рис. 4

На этом экране с помощью сенсорных дисплеев для зон задаются «Установившаяся температура» нагрева в град С, «Время роста» в мин до установившейся температуры и «Время установившегося режима» в ч и мин.

При нажатии на любой из сенсорных дисплеев на четвертом и пятом экранах появляется окно кнопочного набора, где и задаются параметры нагрева.

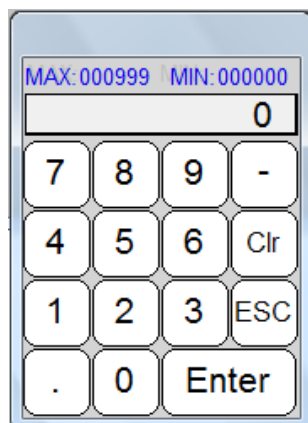


Рис. 5

Максимальный формат задаваемых чисел 999, за исключением формата минут. Максимальное значение минут равно 59.

Внизу второго и пятого экранов находятся сенсорные кнопки возврата на первый экран и перехода на следующий экран.

Поддержание заданного графика температуры обеспечивается с помощью релейного или ПИД-регулятора, который строится на основе программных блоков контроллера Fatek. Принцип поддержания температуры основывается на классической замкнутой системе регулирования по отклонению реальной температуры от заданной. Реальная температура нагреваемой среды контролируется типовым датчиком температуры. Большинство выпускаемых датчиков температуры формируют выходной сигнал в виде аналогового токового сигнала $4\div 20\text{мА}$ или напряжения $2\div 10\text{в}$. При вводе сигнала температуры от датчика в контроллер Fatek через блок аналого-цифрового преобразователя требуется преобразование цифрового значения этого сигнала к эквивалентному диапазону $0\text{--}10\text{В}$. Это преобразование может быть выполнено по следующему выражению:

$$N_{OC} = (N_{DA} - 1638) * 20 / 16 ,$$

где N_{OC} – код реальной температуры, который используется в качестве сигнала отрицательной обратной связи на входе регулятора, $N_{OC} = 0 \div 8191$; N_{DA} – код, получающийся в результате преобразования аналогового токового сигнала $4\div 20\text{мА}$ или входного напряжения $2\div 10\text{в}$ в цифровой код $1638 \div 8191$.

Для визуального контроля параметров процесса нагрева и архивирования любых желаемых параметров нагрева нами была разработана специальная программа, которая устанавливается на персональный компьютер с операционной системой Windows. Промышленный контроллер, имеющий внутри всю информацию о процессе нагрева, соединяется с персональным компьютером по интерфейсному кабелю RS485-USB. Оболочка программы показана на рис. 6.

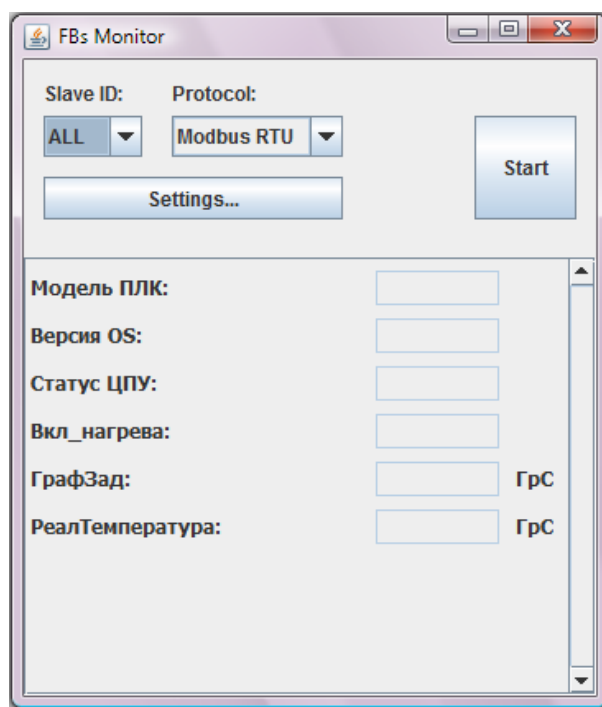
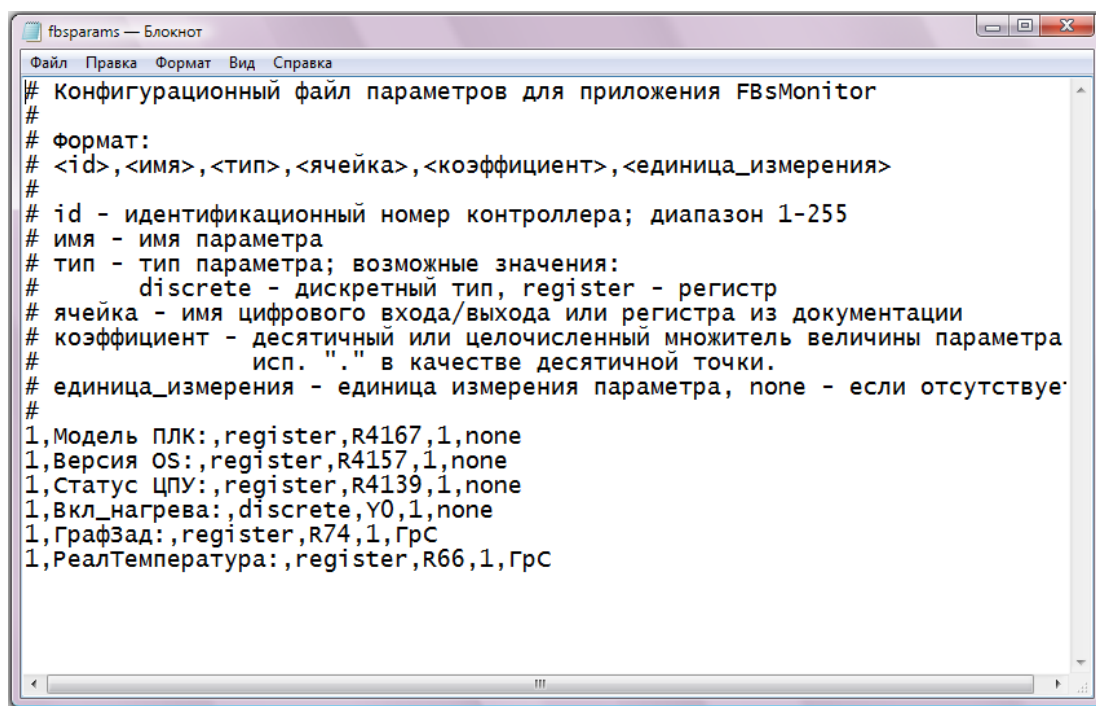


Рис. 6

Архив записывается на устройство памяти персонального компьютера в файл с расширением «.csv» и читается с помощью офисной программы Excel, которая позволяет прове-

сти математическую обработку результатов процесса нагрева и построить необходимые графики. Особенно удобно использовать архивирование данных при медленно текущих процессах (более суток), для контроля соблюдения технологического процесса или для научных целей. Архив ведется через 1 с, объем его занимает не более 500 Мб, которого хватает на 1,5 года записей. Количество архивируемых параметров практически не ограничено. Для определения желаемых наблюдаемых и архивируемых параметров пользователем в любом текстовом редакторе среды Windows составляется конфигурационный файл (рис. 7), который не требует специальной подготовки пользователя.



```
fbtparams — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
# Конфигурационный файл параметров для приложения FBSMonitor
#
# формат:
# <id>, <имя>, <тип>, <ячейка>, <коэффициент>, <единица_измерения>
#
# id - идентификационный номер контроллера; диапазон 1-255
# имя - имя параметра
# тип - тип параметра; возможные значения:
#     discrete - дискретный тип, register - регистр
# ячейка - имя цифрового входа/выхода или регистра из документации
# коэффициент - десятичный или целочисленный множитель величины параметра
#             исп. "." в качестве десятичной точки.
# единица_измерения - единица измерения параметра, none - если отсутствует
#
1, Модель ПЛК:, register, R4167, 1, none
1, Версия OS:, register, R4157, 1, none
1, Статус ЦПУ:, register, R4139, 1, none
1, Вкл_нагрева:, discrete, Y0, 1, none
1, ГрафЗад:, register, R74, 1, ГрС
1, РеалТемпература:, register, R66, 1, ГрС
```

Рис. 7

Разработанная программа является универсальной и может применяться для считывания данных с любого устройства, имеющего интерфейс RS485

Заключение

Разработанный регулятор нагрева обладает определенной универсальностью. Эта универсальность определяется несколькими факторами:

1. Задающий график температуры может иметь практически любой многозонный вид и легко программируется с помощью сенсорного экрана. Возможен повтор циклов нагрева.
2. Тип применяемого регулятора в замкнутом контуре регулирования может быть выбран пользователем (релейный или ПИД) в зависимости от требуемой точности и стоимостных затрат.
3. Возможность архивирования данных процесса нагрева с помощью разработанной программы позволяет фиксировать все данные процесса нагрева за длительный срок и контролировать соблюдение технологического процесса нагрева. Программа может быть использована для научно-исследовательских работ в области новых технологий.

Библиографический список

1. Переработка отходов пластмасс. <http://ztbo.ru/o-tbo/lit/texnologii-otxodov/pererabotka-otxodov-plastmass>

2. Методы возгонки. <http://chem21.info/info/817004/>
3. Руденко, В.С. Преобразовательная техника / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – Киев: Вища школа, 1983. – 431 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.01.2015*

V. A. Tikhomirov, G. V., Sverdlik

**PROGRAMMABLE HEATING CONTROLLER FOR COMPLEX
TECHNOLOGICAL PROCESSES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev
Limited Liability Company "Ecological technologies", Balahna

Various existing temperature controllers are only able to maintain the set temperature, but could not form a graph of temperature over time. And the more they are able to form multi-zone temperature. Proposed technical implementation of the programmable multi-zone control of heating with automatic repeat cycles of heating. Developed programmable temperature controller contains three basic elements: programmable industrial controller, graphic touch panel and installed on a personal computer program for archiving parameters of the heating process. Moreover, all three elements are interconnected with interface cables. If the personal computer has Internet access, it is possible for remote monitoring or reading the parameters of the heating process. As a regulator applied relay PWM controller with automatic setting of the time of heating depending on the error between the preset temperature and the actual, measured by the temperature sensor, placed in a heated environment.

Key words: programmable heating controller, industrial controller, graphic touch panel, data archiving.

УДК 621.314

А.И. Чивенков¹, И.С. Панфилов², С.Ю. Панфилов¹, Н.Н. Вихорев¹, А. Ghedifa¹**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ
В АВИАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОСИСТЕМАХ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород²

Рассмотрен способ управления инвертором напряжения, позволяющий регулировать потоки энергии в авиационной электросистеме, образованной двумя и более источниками электроэнергии. Показано, что одновременно или раздельно изменяя параметры управляющего сигнала (амплитуды и фазового угла опережения по отношению к напряжению сети переменного тока) инвертора возможно эффективно воздействовать на распределение потоков энергии между электрическими источниками.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, усилитель класса Д, simulink, активная и реактивная энергии, угол управления.

Совершенствование любых авиационных радиосистем невозможно без соответствующего развития каждой ее составной части, в том числе и электросистемы.

Развитие электросистем производится по различным направлениям с целью сокращения массы и габаритов, обеспечения потребителей электроэнергией номинального качества при любой её (электросистемы) переконфигурации, необходимой для обеспечения гарантированных потоков энергии при частично вышедших из строя первичных источниках электрической энергии.

Современное требование непрерывности электропитания означает, что в течение заданного промежутка времени электросистема должна обеспечить не только непрерывность электропитания потребителя, но и совместную работу первичных источников разных видов, например, постоянного и переменного токов [1].

Неотъемлемой частью таких электросистем является преобразователь постоянного напряжения в переменное (инвертор) с многократной равномерной широтно-импульсной модуляцией (усилитель класса Д) [2]. Особенность работы усилителя класса Д в качестве инвертора в электросистеме состоит в формировании выходного напряжения постоянной частоты на переменную нагрузку (активная и реактивная составляющие ее сопротивления, а также и их соотношения могут изменяться в широких пределах).

Одним из вариантов построения силовой части электросистемы является параллельное соединение инвертора и источника переменного тока и организация их совместной работы на общую нагрузку. Условием функционирования такой электросистемы является достижение равенства параметров выходных напряжений источника переменного напряжения и инвертора. При этом появляется принципиальная возможность за счет изменения выходного напряжения инвертора регулировать соотношение величин потоков энергии от первичных источников вплоть до перехода потребления энергии на один из источников.

Для формирования на выходе синусоидального напряжения инвертор содержит фильтры низких частот, наиболее распространенными среди которых являются LC-фильтры. Наличие фильтра низких частот в свою очередь определяет зависимость коэффициента передачи инвертора от параметров элементов и режимов работы электросистемы. Коэффициент передачи при этом является комплексной величиной, модуль которой характеризует отношение амплитуд входного (управляющего) и выходного напряжений, а аргумент – фазовый угол сдвига между ними.

Инвертор имеет по каждой гармонике отличные друг от друга комплексные коэффициенты передачи:

$$\dot{K}_n = K_n e^{j\delta_n} = \frac{\dot{U}_{\text{тпвых}}}{\dot{U}_{\text{тпупр}}}, \quad (1)$$

где \dot{K}_n – комплексные коэффициенты передачи по n -й гармонике;


K_n – модули коэффициентов передачи по n -й гармонике (отношение амплитуд выходного $U_{\text{тпвых}}$ и управляющего $U_{\text{тпупр}}$ напряжений по n -й гармонике);

δ_n – аргументы коэффициентов передачи по n -й гармонике (разности фаз выходного $U_{\text{тпвых}}$ и управляющего $U_{\text{тпупр}}$ напряжений по n -й гармонике).

Для исследования характеристик и режимов работы электросистемы целесообразно применение программных комплексов, позволяющих проводить имитацию (виртуальное или компьютерное представление) процессов в электрических схемах любой сложности.

Для этого используется ряд имитационных моделей в интерактивной системе (программный комплекс) MATLAB 7.9.0 с пакетом расширения SIMULINK [3].

Модель инвертора (рис. 1) состоит:

- из усилителя/делителя напряжения K ;
- контроллера Generator (ШИМ-модулятор);
- силовой части Invertor, выполненной на основе транзисторного моста;
- Г-образного фильтра (дроссель L_f и конденсатор C_f);
- V1 напряжение управления;
-  – выход инвертора.

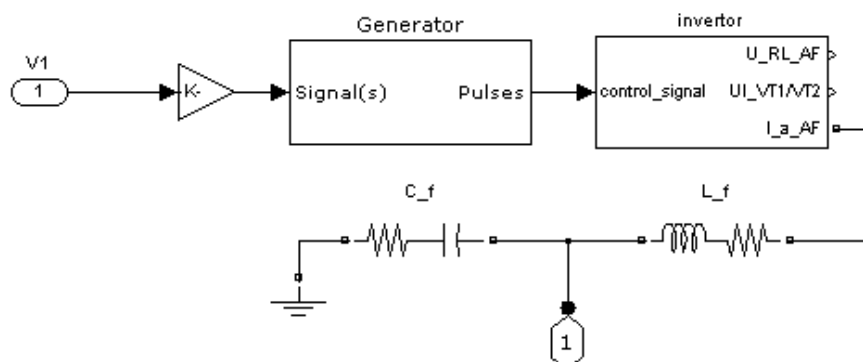


Рис. 1. Эквивалентная схема инвертора

Имитационная модель автономной работы инвертора на нагрузку (рис. 2) предназначена для исследований выходного напряжения при различных значениях полного сопротивления нагрузки, напряжения управления, параметрах фильтра и позволяет определить (форма представления результатов моделирования – на рис. 3):

- время задержки выходного напряжения по отношению к сигналу управления V1 на рис. 1 (разность фаз управляющего и выходного напряжений);
- форму выходного напряжения (его основной гармоники и уровня высших гармонических составляющих);
- модуль коэффициента передачи инвертора;
- мгновенные значения токов элементов фильтра и нагрузки;
- мгновенные значения токов и напряжений ключевых элементов транзисторной мостовой схемы силовой части инвертора.

Модель инвертора, работающего в автономном режиме, состоит из следующих устройств:

- трёхфазного источника ЭДС (E_a, E_b, E_c), используемого в качестве задающего генератора;

- измерителя напряжения (measure 1), вывод U которого используется для управления инвертором, а вывод $U1$ для сравнения выходного напряжения инвертора с заданным значением;
- инвертора, представленного на рис. 1;
- нагрузки Z_{load} ;
- измерительных приборов Scope1 - Scope6.

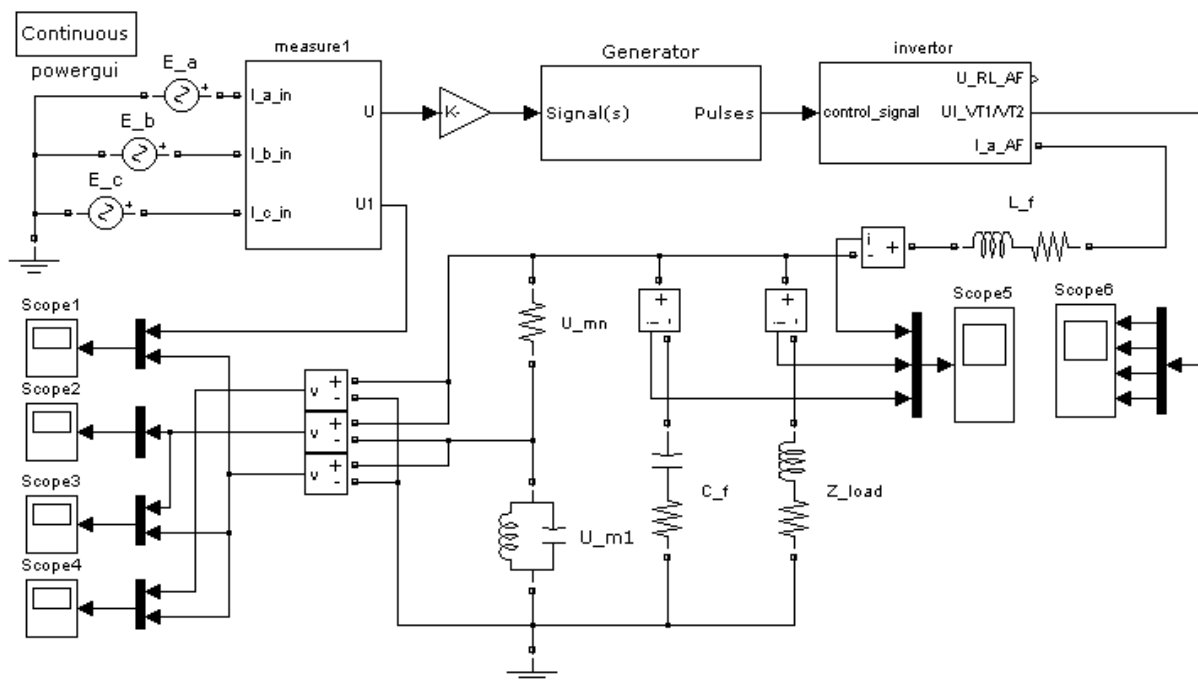


Рис. 2. Имитационная модель автономной работы инвертора

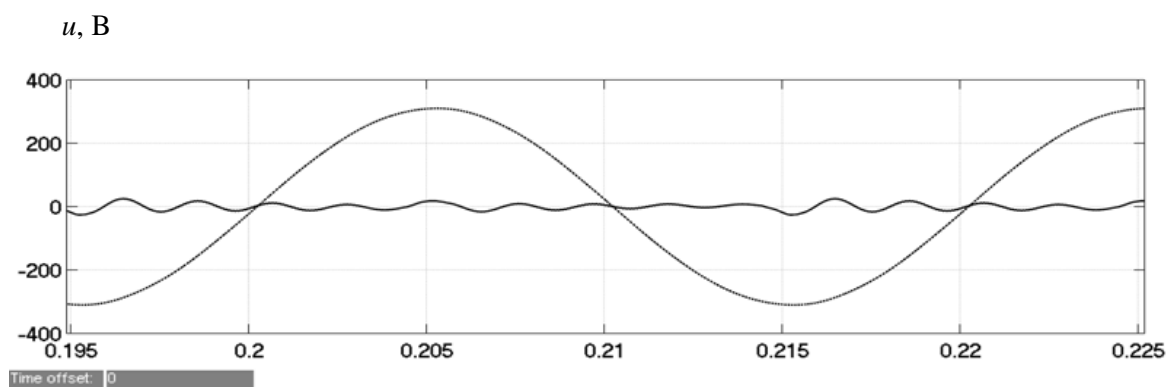


Рис. 3. Мгновенные значения выходного напряжения ($U_{m1} = 300 \text{ В}$) и напряжения искажений при автономной работе инвертора

$t, \text{ с}$

Имитационная модель инвертора, работающего на нагрузку совместно с сетью переменного тока (рис. 4), предназначена для исследований направлений передачи энергии. При различных значениях полного сопротивления и характера нагрузки, параметрах фильтра модель обеспечивает:

- управление временем опережения напряжения управления инвертором по отношению к напряжению сети переменного тока (установку угла опережения $\delta_{упр}$);
- установку модуля коэффициента передачи инвертора;

- определение формы выходного напряжения (его основной гармоники и уровня высших гармонических составляющих);
- определение токов элементов фильтра, сети и нагрузки.

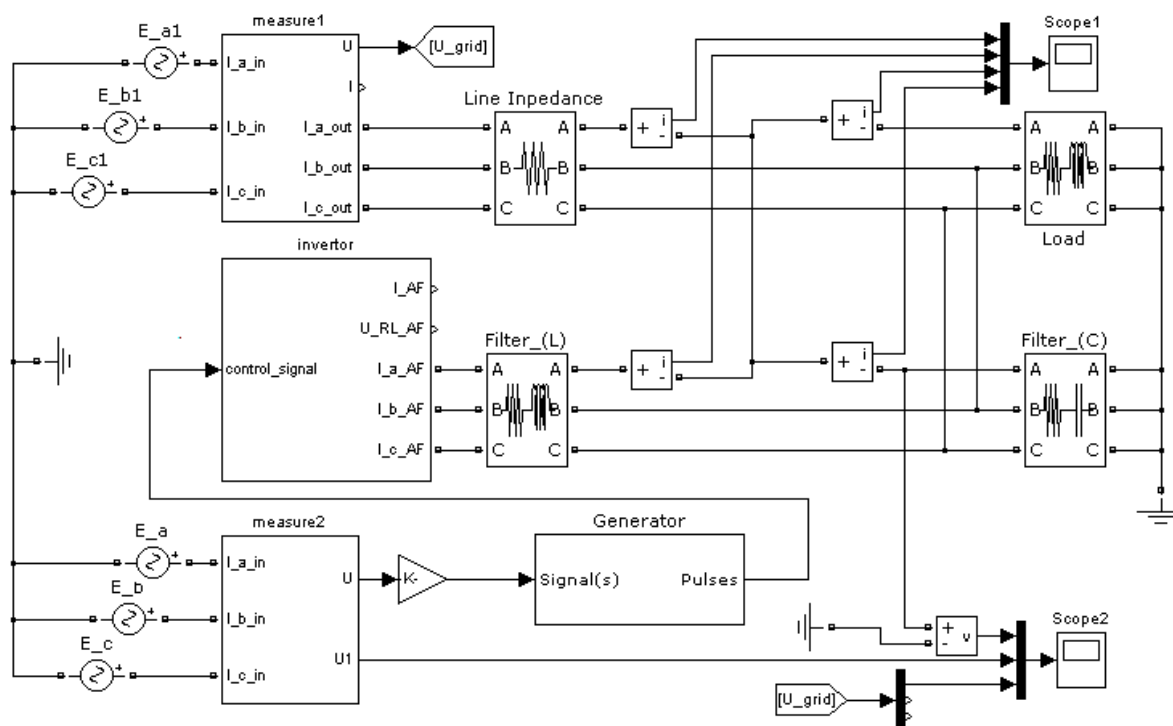


Рис. 4. Имитационная модель работы инвертора совместно с централизованной электросетью

Модель инвертора при параллельной работе с сетью переменного тока состоит из следующих устройств:

- трёхфазного источника ЭДС (E_a , E_b , E_c), используемого в качестве задающего генератора для управления инвертором;
- трёхфазного источника ЭДС1 (E_{a1} , E_{b1} , E_{c1}), используемого в качестве имитатора сети переменного тока;
- измерителя напряжения (*measure 1*) для контроля ЭДС1;
- измерителя напряжения (*measure 2*), вывод U которого используется для управления инвертором, а вывод $U1$ для сравнения выходного напряжения АИН с заданным значением;
- инвертора, выполненного по схеме, приведенной на рис. 1;
- нагрузки *load*;
- измерительных приборов *Scope1 - Scope2*;
- сопротивления линии *Line Impedance*.

Исследования проводились в два этапа. Сначала определялись зависимости фазовых углов запаздывания $\Delta\varphi$, выходного напряжения инвертора в зависимости от емкости конденсатора инвертора C_f , индуктивности дросселя фильтра инвертора L_f , характера нагрузки $Z_{нагр}$ ($\cos\varphi$) и уровня напряжения $E_{ал}$ источника постоянного тока. Результаты исследований приведены на рис. 5.

Далее исследовалась работа инвертора совместно с типовой авиационной электросетью переменного тока на общую нагрузку с целью определения возможности регулирования потоков активной и реактивной энергии.

Анализ режимов работы инвертора при различных его параметрах проводился по симулированным мгновенным значениям напряжений и токов (рис. 6).

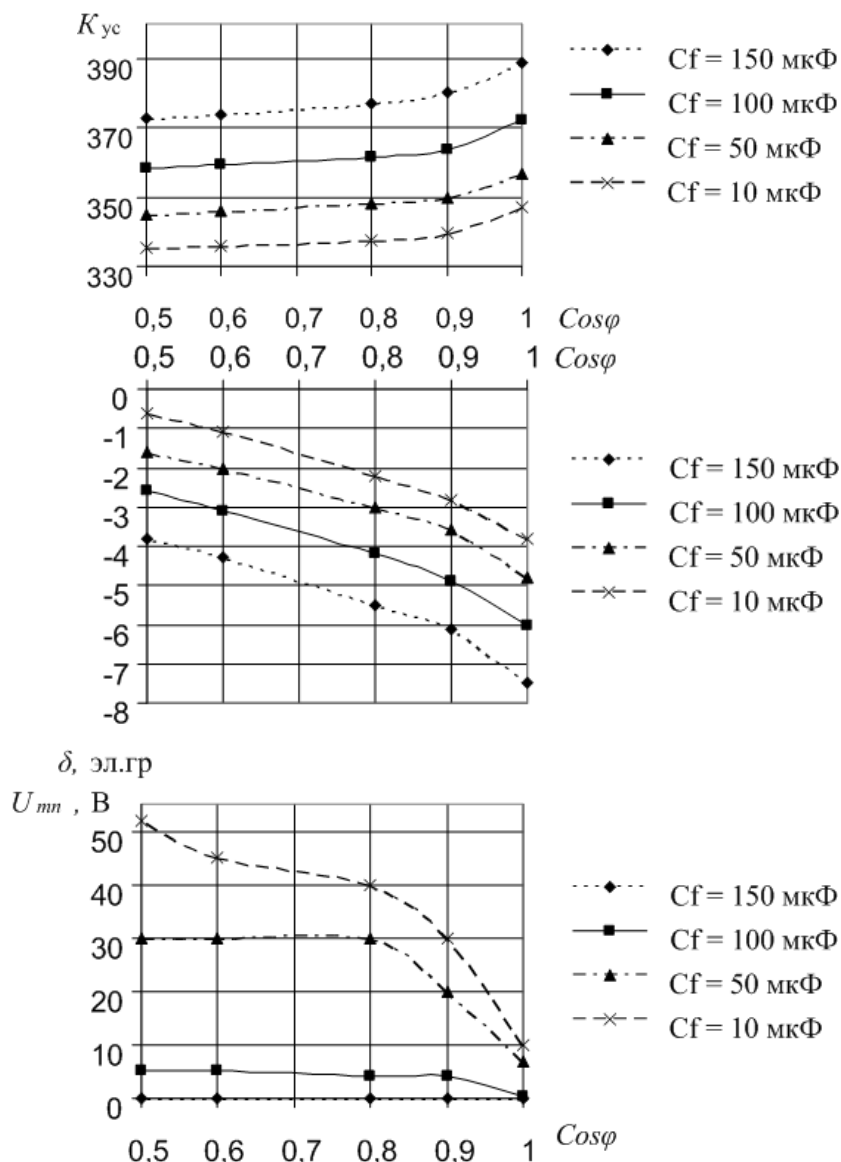


Рис. 5. Зависимость угла $\Delta\varphi_3$, K_{yc} , U_{mn} от значения $\cos\varphi$ при автономно работающем инверторе

Анализ моделирования показал (рис. 7), что одновременно или раздельно изменяя параметры управляющего сигнала (амплитуды и фазового угла опережения по отношению к напряжению сети переменного тока) инвертора возможно эффективно воздействовать на распределение потоков энергии между электрическими источниками.

Кроме того, возможно раздельно управлять не только модулями (полной составляющей) мощностей, но и их составляющими (активной и реактивной) при различных параметрах нагрузки.

При моделировании установлено, что угол задержки $\Delta\varphi_3$ выходных фильтров выделения первой гармонической составляющей напряжения равен 5 эл.град. Соответственно направление генерирующих токов определяется величиной задания фазового угла выходного напряжения УП относительно напряжения питающей сети с учётом $\Delta\varphi_3$. Фазовые углы первой гармонической составляющей напряжения до фильтра изменялись в пределах от 0 до 10 эл.град., коэффициент задания амплитуды напряжения относительно базового критерия $K_{Uупр} = 1$ при условии постоянства величин напряжения и соответственно тока нагрузки (потребителя). Полученные результаты исследований приведены на векторной диаграмме (рис. 7).

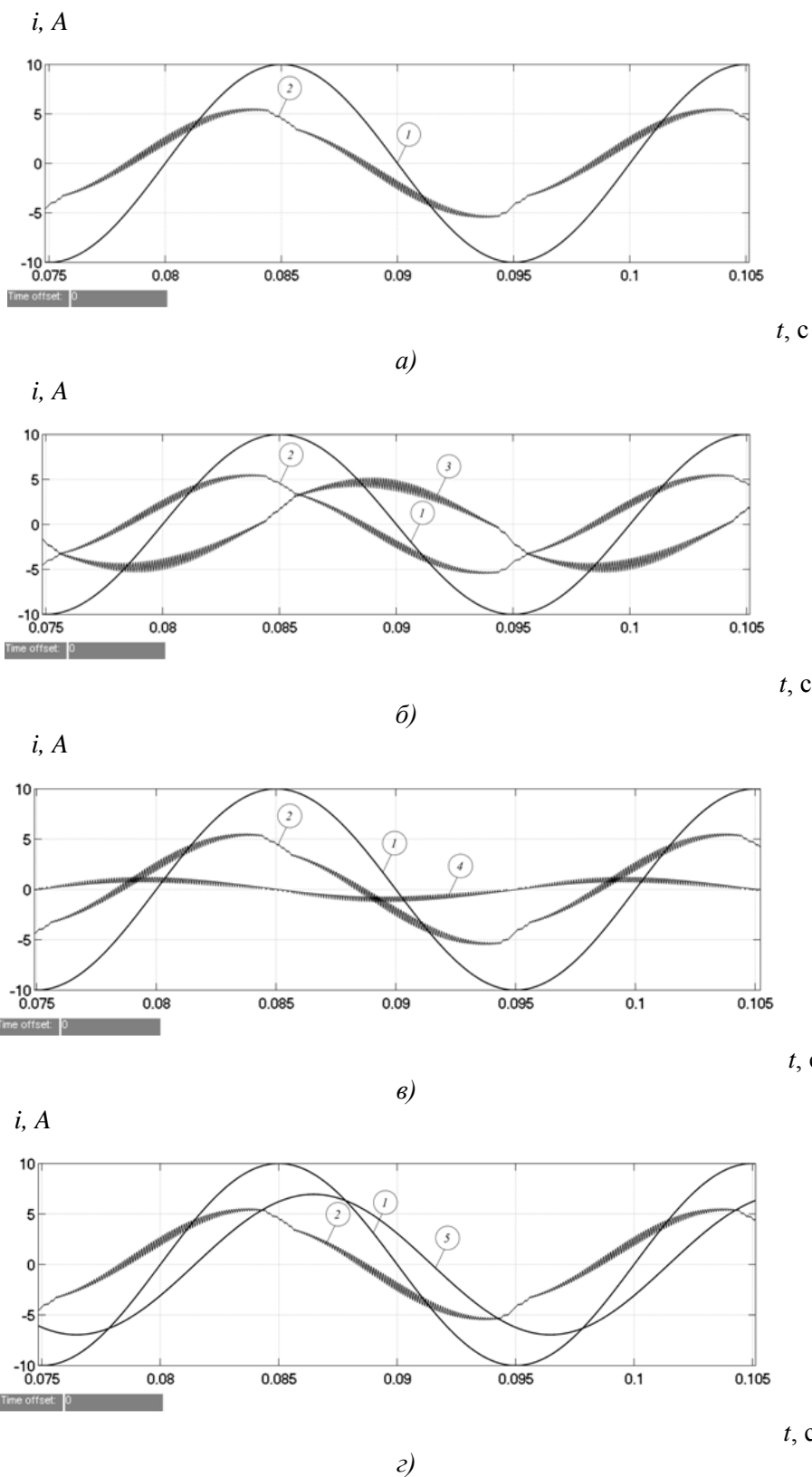


Рис. 6. Мгновенные значения токов при совместной работе инвертора и централизованной сети на нагрузку (угол $\delta = 0$ эл. град.):

a – ток централизованной сети; *б* – токи централизованной сети и дросселя инвертора; *в* – токи централизованной сети и конденсатора инвертора; *г* – токи централизованной сети и нагрузки;
1 – нормированное напряжение централизованной сети ($U/31$); *2* – ток централизованной сети;
3 – ток дросселя АИН; *4* – ток конденсатора АИН; *5* – ток нагрузки

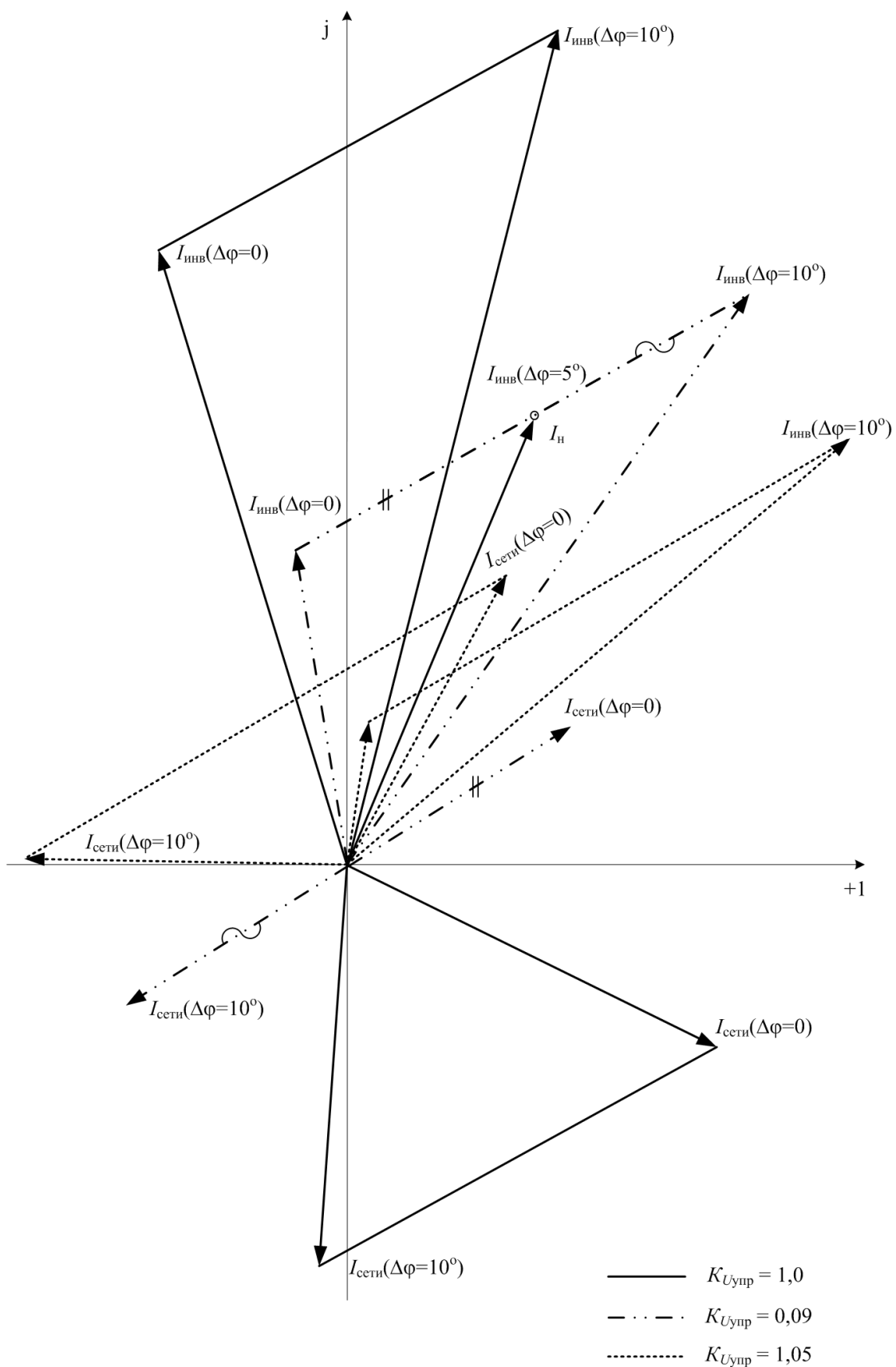


Рис. 7. Векторные диаграммы амплитудных значений токов от угла $\delta_{упр}$ ($C_f = 10 \text{ мкФ}$, $L_f = 0,0125$, $R_{нагр} = 22$, $L_{нагр} = 0,1214$, $\cos\varphi = 0,5$.)

Так, например, изменяя величину угла управления $\delta_{\text{упр}}$, возможны четыре режима работы (нагрузки) сети:

- активно-емкостная нагрузка ($\delta_{\text{упр}} > \Delta\varphi_3$);
- «чисто» емкостная нагрузка ($\delta_{\text{упр}} = \Delta\varphi_3$);
- емкостная – «минус активная» ($\delta_{\text{упр}} < \Delta\varphi_3$);
- «чисто» «минус активная» ($\delta_{\text{упр}} = 0$).

Введенный термин «минус активная» относится к режиму передачи энергии от инвертора в сеть переменного тока.

Изменяя параметры управляющего сигнала инвертором (амплитуды и фазового угла опережения по отношению к напряжению сети переменного тока), возможно эффективно воздействовать на распределение потоков энергии между источниками электроэнергии.

Режим передачи от инвертора реактивной (емкостной) энергии в сеть обеспечивается при угле фазового сдвига управляющего сигнала, равном углу задержки выходного напряжения инвертора ($\delta_{\text{упр}} = \Delta\varphi_3$).

Регулирование потоков энергии возможно осуществлять при любом характере нагрузки.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М., 2010.
2. Моин, В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В.С. Моин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
3. Simulink 7 - User Guide © COPYRIGHT 1990-2010 by The MathWorks, Inc.

*Дата поступления
в редакцию 29.01.2015*

A.I. Chivenkov¹, I.S.Panfilov², S.J.Panfilov¹, N.N. Vikhorev¹, A. Ghedifa¹

MODELING WORK OF A VOLTAGE INVERTER IN AVIATION ELECTRICAL SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC «SIE «POLET»²

Purpose: Reducing the weight and dimensions of electrical systems of autonomous objects, providing consumers with a nominal power quality for any reconfiguration to exclude a faulty electrical power sources.

Design/methodology/approach: To study the methods used to accomplish the task a number of simulation models in an interactive system, MATLAB / SIMULINK.

Findings: It is shown that at the same time or separately by changing the parameters of the control signal (amplitude and phase advance angle with respect to the AC line voltage) of the inverter is possible to effectively influence the distribution of energy flows between electrical sources. In addition, it is possible to control not only separate modules (complete component) capacity, but also their components (active and reactive) for different parameters of the load.

Research limitations/implications: The way of the inverter control voltage to regulate the flow of energy in the electric power system formed by two or more power sources.

Originality/value: The urgency is to provide a collaborative AC sources to the total load or collaboration of different types of sources, such as direct and alternating currents.

Key words: pulse-width modulation, amplifier class D, simulink, active and reactive energy, control angle.

УДК 621.311

К.С. Аверьянова, Н.В. Безменова

**К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В КОМПЛЕКТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

Самарский государственный технический университет

Приведены результаты экспериментальных исследований напряженности магнитного поля промышленной частоты от проводников различного сечения комплектных распределительных устройств 6(10) кВ. Исследования проведены с учетом влияния: ограниченной длины проводника на характер изменения напряженности магнитного поля в окружающем воздушном пространстве на небольшом расстоянии; расстояния между точкой пространств распределительного устройства (контрольной точкой), где могут быть расположены технические устройства, чувствительные к магнитным полям промышленной частоты, и центром проводника с током. Определение напряженности магнитного поля промышленной частоты выполнялось с помощью измерителя напряженности поля промышленной частоты ПЗ – 50. Получены выражения, которые могут быть использованы для определения значений напряженности магнитного поля промышленной частоты, в воздушном пространстве для рабочих токов проводников круглого и прямоугольного сечения.

Ключевые слова: комплектные распределительные устройства, напряженность магнитного поля промышленной частоты, одиночный проводник, шина, экспериментальные исследования.

Наибольшее влияние магнитных полей (МП) промышленной частоты (ПЧ) может проявиться в комплектных распределительных устройствах 6 (10)кВ (КРУ). Это обусловлено небольшими расстояниями между токоведущими частями, как правило, шинами распределительных устройств, создающих магнитные поля промышленной частоты, и устройствами микропроцессорной релейной защиты.

В КРУ 6 (10) кВ подстанций источниками магнитных полей промышленной частоты являются проводники с током как круглого сечения (провода), так и прямоугольного сечения (шины) однофазного и трехфазного исполнения [1].

В соответствии с законом полного тока [2] в диэлектрике магнитную напряженность можно определять расстоянием от проводника с током, считая, что ток протекает по оси провода бесконечной длины:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot R}, \text{ А/м}, \quad (1)$$

где I - ток в проводнике, А; R - расстояние от оси проводника, м.

В КРУ проводники имеют ограниченную длину. Для учета влияния ограниченной длины проводника на характер изменения напряженности магнитного поля в окружающем воздушном пространстве на небольшом расстоянии (в пределах 1...3 м) были проведены экспериментальные исследования. Исследования напряженности магнитного поля промышленной частоты осуществлялись измерителем напряженности поля промышленной частоты ПЗ – 50.

В результате экспериментальных исследований было получено, что при перемещении в окружающем пространстве контрольной точки (антенны ПЗ-50) вдоль проводника круглого сечения ограниченной длины L с током I , напряженность МППЧ от проводника круглого сечения изменяется по окружностям с увеличением их радиуса при увеличении расстояния R от проводника до контрольной точки.

Из рис. 1 также видно, что наибольшее значение напряженности МППЧ в окружающем пространстве находится в точке напротив центра круглого проводника ограниченной длины. Следовательно, при последующих исследованиях напряженности МППЧ от проводника круглого сечения в окружающем пространстве от влияния проводников с током огра-

ниченной длины L целесообразно анализировать только максимальные значения напряженности МППЧ, определяемые напротив (перпендикулярных) центральных точек проводника с током, характер изменения которых от длины круглого проводника, в частности, при $R = 0,2$ м показан на рис. 2.

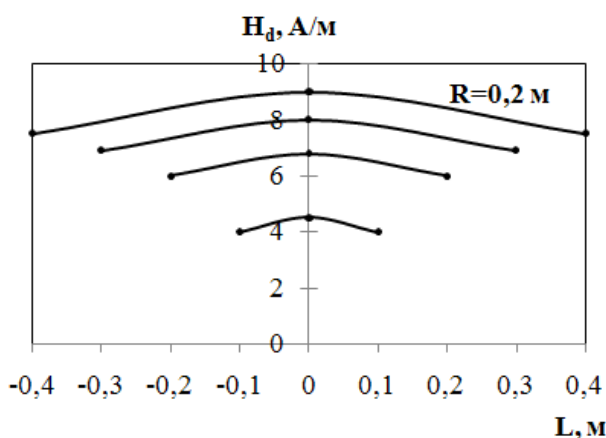


Рис. 1. Характер изменения H_d , напряженности МППЧ в окружающем пространстве при изменении длины $L = 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$ м круглого проводника с током $I = 16$ А при неизменном расстоянии $R = 0,2$ м от антенны до проводника

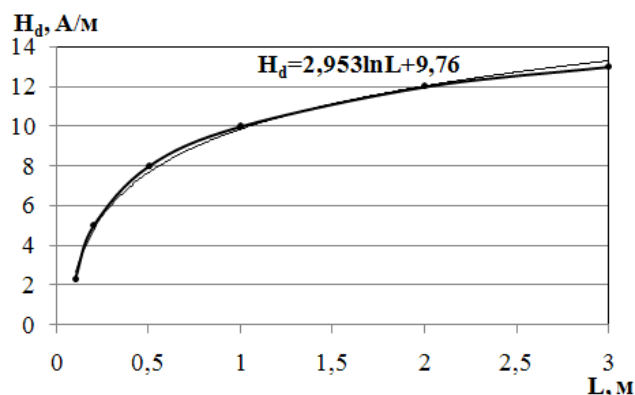


Рис. 2. Характер изменения максимальных значений напряженности МППЧ, создаваемой током $I = 16$ А в круглом проводнике ограниченной длины $L = 0,2 \dots 3,0$ м с сечениями $S = 2,5 \dots 25$ мм² на расстоянии $R = 0,2$ м

Представленная на рис. 2 кривая изменений значений напряженности МППЧ от проводника круглого сечения в окружающем пространстве с учетом длины проводников $L = var$ для частных условий: обобщенный диапазон сечений $S = 2,5 \dots 25$ мм²; $I = 16$ А; $R = 0,2$ м; может быть описана следующим выражением:

$$H_{d,R=0,2\text{ м}} \approx 2,95 \cdot \ln L + 8,76 = 2,95 \cdot (\ln L + 3,29), \text{ А/м}, \quad (2)$$

т.е. в общем виде:

$$H_{d,R=\text{const}} = a \cdot \ln L + b, \text{ А/м}, \quad (3)$$

где H_d - напряженность МППЧ в окружающем пространстве от влияния проводника с током круглого сечения, А/м; L - длина круглого проводника, м; R - расстояние от контрольной точки окружающего пространства (от центра антенны) до центра круглого проводника, м.

Принципиально важным при исследованиях напряженности МППЧ в пространстве распределительных устройств (РУ), особенно КРУ, является определение изменения напряженности, А/м не только от длины проводника L , но и от расстояния $R = var$, между точкой пространств РУ (контрольной точкой), где могут быть расположены технические устройства (ТУ), чувствительные к магнитным полям промышленной частоты, и центром круглого проводника с током.

Получено, что значения напряженности МППЧ $H_{d,R=var;L=var}$ в воздушном пространстве, окружающем одиночный круглый проводник ограниченной длины L с током I , для радиуса R могут быть определены по выражению:

$$H_{d,R=var;L=var} = \frac{I \cdot 0,12 \cdot (\ln L + 3,29)}{2 \cdot \pi \cdot R^{1,4}}, \text{ А/м}, \quad (4)$$

При этом следует отметить, что значения напряженности МППЧ от одиночного проводника с током в зависимости от расстояния характеризуются степенью 1,4.

В КРУ шины с рабочими токами, как правило, имеют прямоугольное сечение. По аналогии с (4) для шин прямоугольного сечения получено, что характер изменения напряженности МППЧ $H_{b,R=var;L=var}$, А/м в пространстве по оси узкой стороны прямоугольной

шины ограниченной длины практически совпадает с характером изменения H_d от проводников круглого сечения:

$$H_{b,R=\text{var};L=\text{var}} = \frac{I \cdot 0,12 \cdot (\ln L + 3,29)}{2 \cdot \pi \cdot R^{1,4}}, \text{ А/м}, \quad (5)$$

а по оси широкой стороны шин - напряженность МППЧ $H_{h,R=\text{var};L=\text{var}}$, А/м определяется в виде:

$$H_{h,R=\text{var};L=\text{var}} = \frac{I \cdot 0,15 \cdot (\ln L + 3,11)}{2 \cdot \pi \cdot R^{1,4}}, \text{ А/м}. \quad (6)$$

Напряженность МППЧ в пространстве между осями широкой и узкой сторонами шины от центра шины до контрольной точки окружающей среды определяется по выражению:

$$H_\varphi = \frac{H_h \cdot H_b}{\sqrt{H_h^2 \cdot \sin^2 \varphi + H_b^2 \cdot \cos^2 \varphi}}, \quad (7)$$

где φ - угол между радиусом - вектором и полярной осью.

Полученные выражения (4)–(6) могут быть использованы для определения значений напряженности магнитного поля промышленной частоты, в воздушном пространстве для рабочих токов проводников круглого и прямоугольного сечения.

Библиографический список

1. **Безменова, Н.В.** Оценка допустимых расстояний в распределительных устройствах напряжением 6-10 кВ при обеспечении нормируемых уровней магнитных полей промышленной частоты 50 Гц / Н.В. Безменова, В.М. Салтыков // Технологии ЭМС. №1(36). 2011. С. 14–18.
2. **Бессонов, Л.А.** Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л.А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2003. – 317 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.01.2015*

K.S. Averyanova, N.V. Bezmenova

BY ESTIMATING THE MAGNETIC FIELD STRENGTH IN COMPLETE SWITCHGEARS

Samara state technical university

Purpose: Impact electromagnetic compatibility influence of complete switchgears.

Methodology: Authors performed impact electromagnetic compatibility (magnetic field strength) of complete switchgears by means experimental (magnetic field strength meter PZ – 50) and analytical (expressions) methods.

Results: The paper presents the results of experimental studies of the magnetic field of industrial frequency of conductors of different sections of complete switchgears 6 (10) kV. Expressions for magnetic field strength calculation are obtained, which used by circular and rectangular conductor.

Key words: complete switchgear, the magnetic field of industrial frequency, single conductor, experimental research.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620.179+620.17+620.182

А.Л. Руденко¹, А.А. Миронов², В.В. Мишакин³, А.В. Гончар³

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ ЛОПАТОК НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ГЭС ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ДП АО «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго», г. Набережные Челны¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород³

Приведены результаты исследования состояния лопаток направляющего аппарата (НА) ГЭС после их длительной эксплуатации. С помощью метода акустической томографии получено распределение дефектов по размерам в сварных швах и профиль обратной поверхности пера лопаток. Получены характеристики коррозионной поврежденности.

Рассчитаны скорости роста трещин с учетом НДС и коррозионной поврежденности. Произведена оценка ресурса до достижения критического состояния пера лопатки.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, лопатки направляющего аппарата, дефекты сварных соединений, коррозия, напряженно-деформированное состояние, трещиностойкость, ресурс.

Одним из основных элементов гидротурбины является направляющий аппарат, обеспечивающий необходимое направление потока воды на входе в рабочее колесо турбины и регулирующий расход воды. Он выполнен в виде системы лопаток, поворачивающихся вокруг своих осей с помощью специального привода. Синхронность поворота лопаток обеспечивается регулирующим кольцом, с которым все лопатки связаны шарнирно с помощью рычагов и серег.

Как правило, лопатки НА находятся длительное время в эксплуатации. Например, лопатки некоторых агрегатов на Нижнекамской ГЭС до ремонта проработали 32 года, на Жигулевской ГЭС около 50 лет. Лопатки НА подвержены статическим и динамическим нагрузкам, которые могут приводить к образованию эксплуатационных и развитию технологических дефектов, например, дефектов сварки. Для эффективного восстановления лопаток и обеспечения их безопасной работы необходимо выполнить комплекс исследований, включающий контроль дефектов, как на поверхности изделия, так и в объеме материала, анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), определение распределения дефектов по размерам и ориентации, оценку скорости развития существующих дефектов в поле напряжений с учетом коррозионной поврежденности.

Исследования, проведенные на лопатках (всего 28 штук) Нижнекамской ГЭС, находившихся на восстановлении на территории предприятия ДП АО «Волга-СГЭМ» «Камспецэнерго» в г. Набережные Челны, показали, что в местах сварного соединения верхней и нижней цапфы с пером на 82% лопаток обнаружены макродефекты в виде непроваров и пор, а также другие дефекты. Внешний вид исследуемых лопаток Нижнекамской ГЭС приведен на рис. 1. Длина лопаток – 6350 мм, вес каждой лопатки – 7536 кг.

Исследования сварных соединений проводили с помощью акустического томографа OmniScan MX-PA1664M и портативного комплекса для металлографического анализа МИК-РОКОН МЕТ. Поверхностные трещины исследовали магнитопорошковым методом. На рис. 2 в качестве примера представлены изображения дефектов, выполненные в режиме ли-

нейного сканирования сварных соединений пера лопатки и цапфы прибором OmniScan MX-PA1664M. На горизонтальной оси отложено расположение дефектов в миллиметре от торца лопатки, на вертикальной – расстояние по толщине шва. При толщине пера лопатки 40 мм погрешность измерения размеров дефектов составляла около 2 мм.

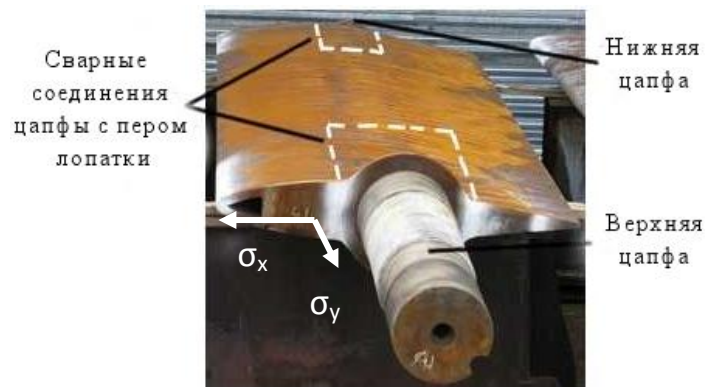


Рис. 1. Вид исследуемых лопаток

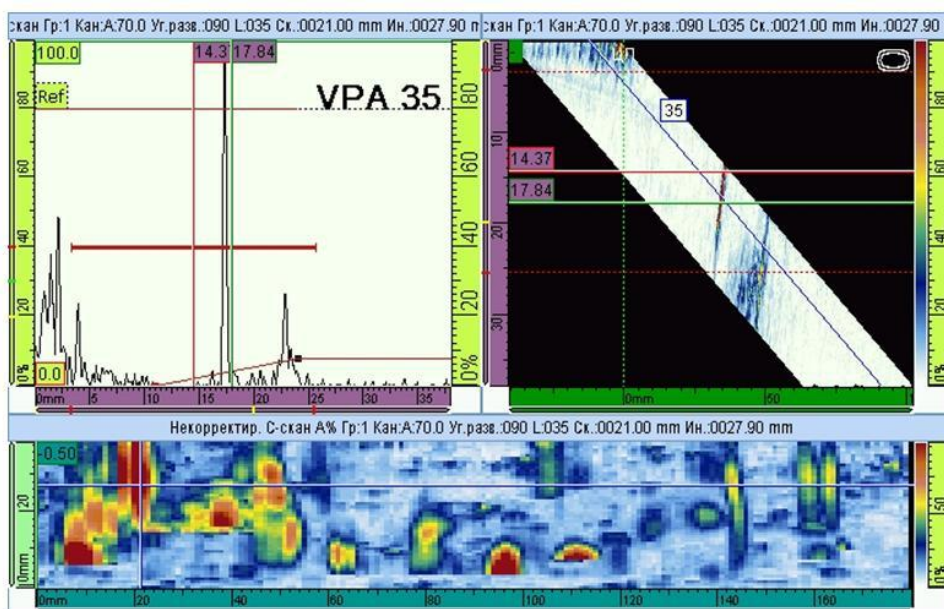


Рис. 2. Изображения дефектов, выполненных в режиме линейного сканирования сварных соединений пера лопатки



Рис. 3. Трещины в районе сварного соединения пера лопатки с цапфой

Обнаружено, что отдельные дефекты имеют значительный размер (до 50 мм и более). В ряде случаев, размеры трещины пересекают толщину пера лопатки и выходят на поверхность. На рис. 3 представлена трещина в районе стыка пера лопатки с цапфой, обнаруженная с помощью магнитопорошковой дефектоскопии.

Трещины развивались, как правило, от дефектов сварки в местах стыка пера лопатки и цапфы. Плоскость трещин направлена вдоль оси сварного шва. Появление трещин в этих местах связано, по-видимому, с тем, что приложение крутящего момента на цапфу при эксплуатации лопаток приводит к повышенной концентрации напряжений в местах, близких к имеющему дефекты сварки соединению цапфы с пером лопатки.

Металлографические исследования показали, что основными дефектами сварки являются несплавления и поры (рис. 4).

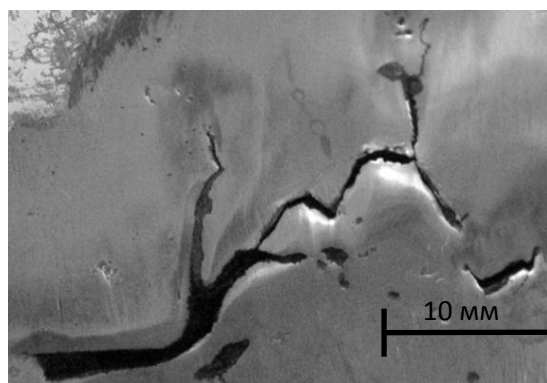


Рис.4. Фотография поверхности с дефектами сварки

Обнаружено, что от некоторых трещиноподобных дефектов и пор развиваются усталостные трещины (рис. 5). Необходимо отметить, что трещины развивались в условиях коррозионной среды, что существенно увеличивало скорость их роста.

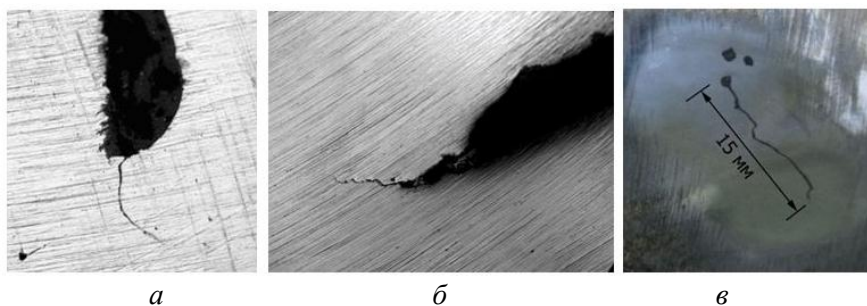


Рис. 5. Развитие трещин от дефектов сварки:

а, б – развитие трещины от несплояния (*а* – увеличение $\times 75$; *б* – увеличение $\times 150$);
в – развитие трещины от поры

Вскрытие одной из трещин показало, что берега имеют характерные участки (рис. 6). Участок, показанный на рис. 6, *а* – начало трещины от концентратора, которым являлся несплояние в корне шва. Относительно гладкий участок, представленный на рис. 6, *б*, предположительно образовался при медленном продвижении трещины в процессе усталостного разрушения. Более детальный рельеф (наличие усталостных бороздок) затенен процессом коррозии. Поверхность, соответствующая нестабильному распространению трещины (участок, показанный на рис. 6, *в*), имеет грубый, волокнистый рельеф. Участок мог сформироваться при достижении в месте концентрации напряжений величины критического значения коэф-

фициента интенсивности напряжений (КИН), что вызвало нестабильный характер распространения трещины. Остановку трещины можно объяснить её выходом из области концентрации напряжений. Участок, представленный на рис. 6, *з*, соответствует долому при приготовлении образца.

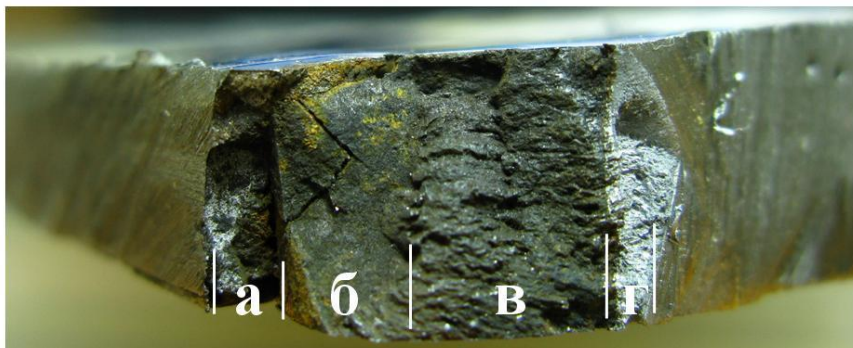


Рис. 6. Фотография поверхности излома:

а – дефект сварки; *б* – поверхность, соответствующая стабильному распространению усталостной трещины; *в* – участок нестабильного распространения трещины; *г* – участок долома при приготовлении образца

На рис. 7 показана средняя протяженность дефектов на каждые 100 мм шва по мере удаления от края пера лопатки, к которому этот шов прилегает.

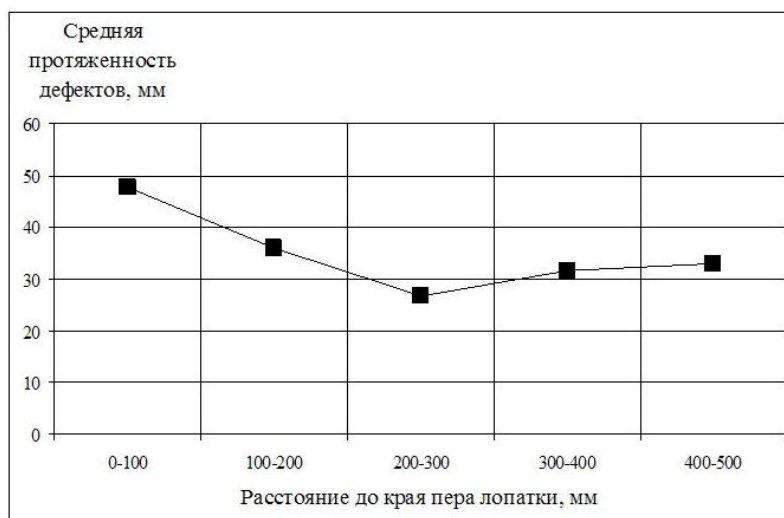


Рис. 7. Средняя протяженность дефектов в зависимости от расстояния до края лопатки

Как видно из рис. 7, наиболее дефектные участки сварных швов находятся вблизи торцов пера лопатки. Средняя протяженность дефектов составляет 35 мм на каждые 100 мм длины сварного шва. Большая плотность дефектов увеличивает вероятность их объединения и последующего разрушения изделия, особенно при повышении эксплуатационных нагрузок (наборе мощности гидроагрегатом).

Методом конечных элементов был выполнен расчет НДС лопатки направляющего аппарата в условиях гидроудара с максимальным давлением на лопатку $P = 0,27$ МПа и приложении максимального крутящего момента 27,5 т·м, создаваемого с помощью сервомоторов. Величина максимального давления на лопатку и максимальный крутящий момент соответствовали данным, используемым при расчете на прочность лопаток направляющего аппарата Нижнекамской ГЭС. Конечно-элементная (КЭ) схема конструкции приведена на рис. 8.

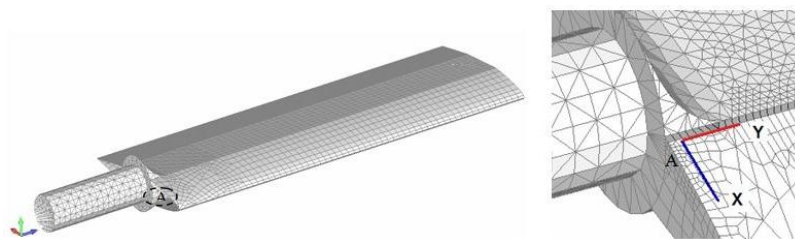
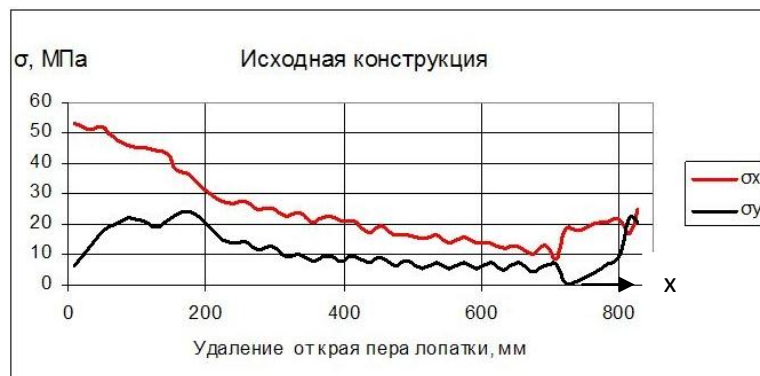


Рис. 8. КЭ схема конструкции

На рис. 9 приведено распределение напряжений σ_x и σ_y вдоль сварного шва.

Рис. 9. Распределение напряжений σ_x и σ_y вдоль сварного шва

Необходимо отметить, что в процессе длительной эксплуатации активно развивалась коррозионная поврежденность. Наряду с отдельными язвами поверхности пера и цапф на некоторых лопатках были обнаружены области, в которых толщина стенок пера лопатки существенно уменьшалась относительно номинального значения 40 мм. Для отдельных лопаток была выполнена акустическая толщинометрия стенок пера лопатки с помощью прибора УИУ-Сканер и получен профиль обратной поверхности пера лопатки. Результаты измерений толщины приведены в табл. 1 (h_{\min} и h_{\max} – максимальное и минимальное значение толщины).

Таблица 1

№	h_{\min} , мм	h_{\max} , мм	Максимальное относительное уменьшение толщины стенки по сравнению с номинальной, %
1	32,1	40,1	20
2	35,4	41,4	12
3	32,1	41,7	20
4	34,0	41,2	15
5	35,9	40,5	10

Средняя скорость коррозии стенки пера лопатки с учетом срока эксплуатации 32 года равна $0,14 \pm 0,3$ мм/год. Изменение живого сечения в отдельных местах в результате коррозии доходит до 20%, что необходимо учитывать при оценке ресурса изделия.

В качестве примера на рис.10 показана фактическая толщина стенки пера одной из лопаток вдоль сварного шва, измеренная акустическим методом. Максимальная толщина стенки лопатки на некоторых участках приближается к номинальному значению 40 мм, минимальное значение составило 32,5 мм. Отклонение размеров живого сечения от номинального подчиняется нормальному закону распределения.

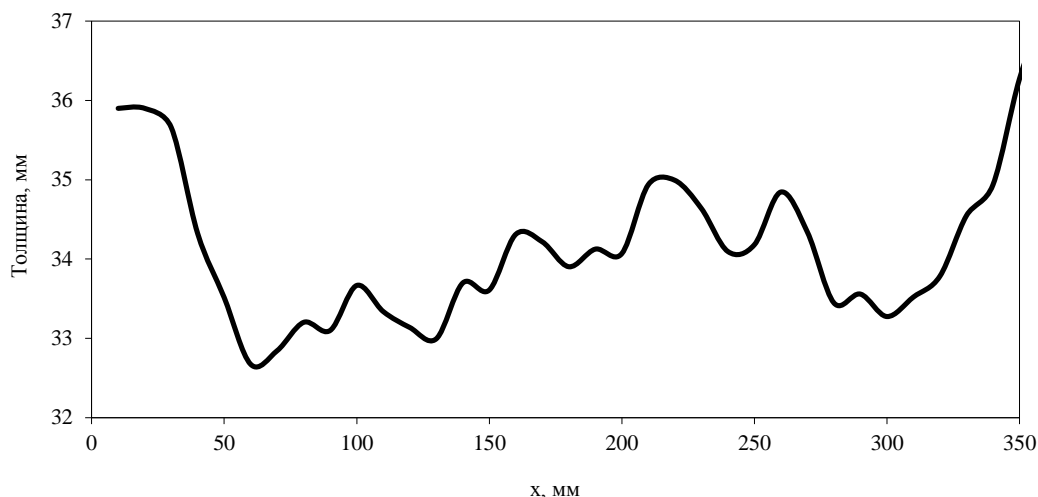


Рис. 10. Распределение фактической толщины стенки пера лопатки вдоль сварного шва

Эффективное напряжение $\sigma(x)$ с учетом уменьшения толщины стенки лопатки в результате коррозионной поврежденности рассчитывалось по формуле:

$$\sigma(x) = \frac{\sigma_0(x)}{1 - \frac{h_0 - h(x)}{h_0}}, \quad (1)$$

где $\sigma_0(x)$ – распределение напряжений без учета коррозии; h_0 – начальное значение толщины стенки лопатки; h – толщина стенки лопатки по результатам замеров.

На рис. 11 приведено распределение напряжений с учетом коррозионной поврежденности и без ее учета.

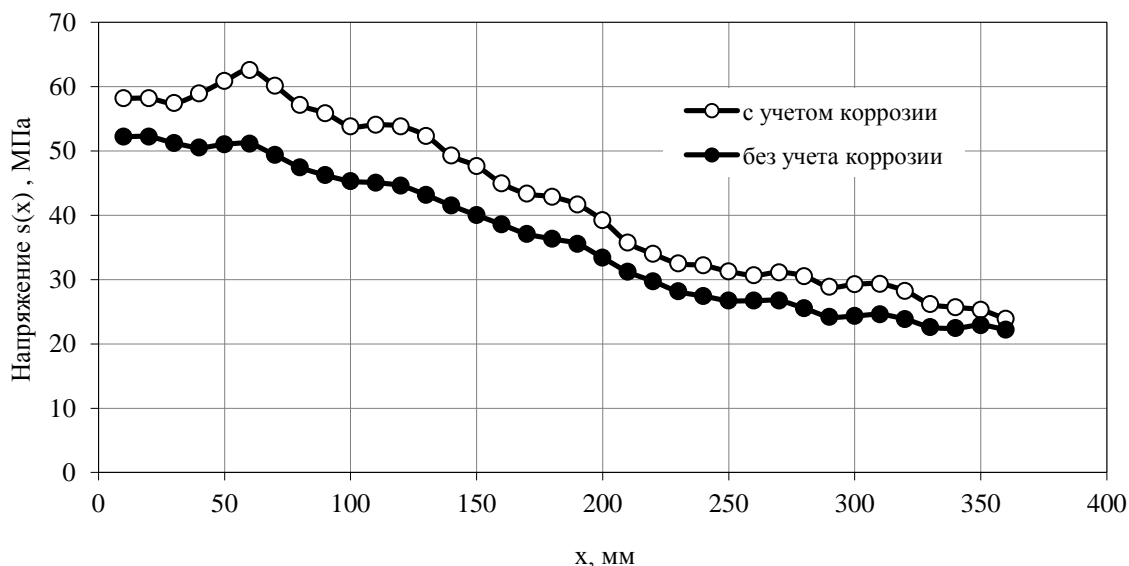


Рис. 11. Распределение напряжений вдоль пера лопатки с учетом и без учета коррозионной поврежденности

Натурные исследования показали, что выработка ресурса конструкции лопаток происходит при совместном действии двух механизмов – коррозии и усталостного разрушения. Для оценки остаточного ресурса необходимо разработать расчетную модель, учитывающую совместное действие указанных механизмов.

Процесс коррозии приводит к увеличению эффективного напряжения и снижению показателей циклической трещиностойкости металла. С учетом средней величины скорости коррозионного износа v_k выражение для эффективного напряжения можно представить в виде:

$$\sigma(x, t) = \sigma_0(x) \frac{h_0}{(h(x) - v_k t)}. \quad (2)$$

Для описания скорости роста усталостной трещины используем уравнение Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (3)$$

где a - длина трещины; C и m - характеристики циклической трещиностойкости металла, определяемые с учетом влияния коррозионной среды; ΔK - размах КИН нормального отрыва.

Решение для КИН в исследуемом случае краевой трещины может быть получено на основе метода суперпозиции, в рамках которого рассматривается трещина, к берегам которой приложено напряжение, определяемое зависимостью (2). Выражение для КИН получим интегрированием решения [2] для случая действия на берегах краевой трещины элементарных сосредоточенных сил $dP = \sigma(x, t)dx$:

$$K(a, t) = \int_0^a \sigma(x, t) F(a, x) dx, \quad (4)$$

где $F(a, x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1 + f(x/a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} \sqrt{a}$,

$$f(a/x) = \left[1 - (a/x)^2 \right] \left[0,2945 - 0,3912(a/x)^2 + 0,7685(a/x)^4 - 0,9942(a/x)^6 + 0,5094(a/x)^8 \right].$$

Введение среднего значения числа циклов нагружения в год n позволяет записать (3) в виде дифференциального уравнения, описывающего изменение длины усталостной трещины во времени:

$$\frac{da}{dt} = nC[\Delta K(a, t)]^m. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) осуществляется при начальных условиях $t = 0$, $a = a_0$. Остаточный ресурс конструкции t_p соответствует моменту времени достижения трещиной критического размера a_c , определяемого из критерия разрушения:

$$K_{\max}(t_p, a_c) = K_{fc},$$

где K_{fc} - циклическая вязкость разрушения металла.

Разделение переменных в выражении (2) позволяет построить расчетную модель, не требующую интегрирования уравнения (5). Представим зависимость эффективного напряжения от времени в виде:

$$\sigma(x, t) = \sigma(x)\varphi(t), \quad (6)$$

где $\sigma(x) = \sigma_0(x)h_0/h(x)$, $\varphi(t) = \frac{1}{[1 - v_k t/h_{\min}]}$, h_{\min} - минимальное значение толщины по результатам измерений.

С учетом (6) выражение (4) для КИН примет вид:

$$\Delta K(a,t) = K(a)\varphi(t),$$

где $K(a) = \int_0^a \sigma(x)F(a,x)dx$.

После разделения переменных в (5) получим уравнение для определения остаточного ресурса t_p , входящего в верхние пределы интегралов:

$$\int_{a_0}^{a_c(t_p)} \frac{1}{C[\Delta K(a)]^m} da = n \int_0^{t_p} \varphi(t)^m dt. \quad (7)$$

Выполнены расчеты остаточного ресурса лопаток по выражению (7) при варьировании начального размера трещины a_0 и числа циклов нагружения в год n . В расчетах приняты следующие характеристики сварного соединения стали Ст3: $K_{fc} \approx K_{Ic} = 125 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{0,5}$, $C = 8,9 \cdot 10^{-8}$ (принято с учетом влияния коррозионной среды), $m = 3,45$. В расчетах использован коэффициент запаса по вязкости разрушения $n_K = 3$. Результаты расчетов представлены на рис. 12.

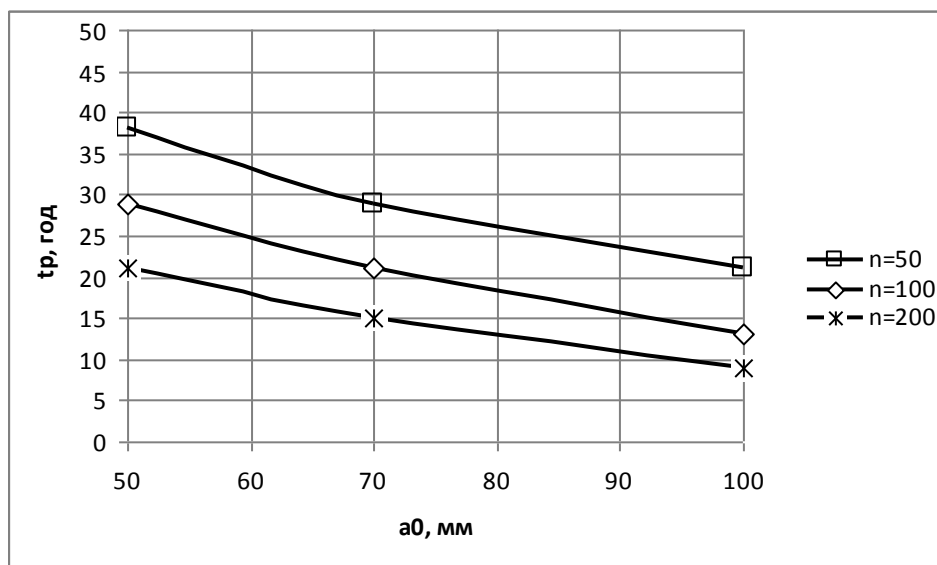


Рис. 12. Зависимость остаточного ресурса лопаток от начального размера трещины

Трещины, зафиксированные на лопатках Нижнекамской ГЭС, отработавших более 32 лет, и на Жигулевской ГЭС, отработавших около 50 лет, достигали размеров соответственно 50 мм и 100 мм. Как видно из рисунка, остаточный ресурс лопаток без серьезных восстановительных мероприятий может быть ограничен до 9 лет.

Таким образом, привлечение средств неразрушающего контроля дефектности сварных соединений лопаток направляющего аппарата в сочетании с металлографическими исследованиями непосредственно на элементе конструкции позволило определить размеры, расположение и распределение дефектов по размерам, установить факт образования и развития трещин от трещиноподобных дефектов сварки в процессе длительной эксплуатации. Исследования характеристики коррозионной поврежденности лопаток НА акустическим методом позволило произвести оценочные расчеты остаточного ресурса изделия с учетом скорости роста трещин и скорости коррозии.

Библиографический список

1. **Херцберг, Р.В.** Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р.В. Херцберг. – М.: Металлургия, 1989. – 576 с.
2. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: [пер. с англ.]: в 2 т. / Ю. Мураками [и др.]. – М.: Мир, 1990. – 448 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.01.2015*

A.L. Rudenko, A.A. Mironov, V.V. Mishakin, A.V. Gonchar

**INVESTIGATION OF HPP GUIDE BLADES DEFECTS DEVELOPMENT AFTER A
PROLONGED USE**

DP JSC "VOLGA-SGAM" "Camspecanergo", Nabere zhnye, embankments Chelny,
Nizhny Novgorod state technical University n.a. R. E. Alexeev,
Institute of problems of mechanical engineering RAS, Nizhny Novgorod

The result of the research by nondestructive testing methods of HPP guide blades in operation for a long period of time is given.

Distribution of defects with respect to welds size and profile of the back surface of the blades was obtained by acoustic tomography. Characteristics of corrosive damage were found. Cracks growth rate with the stress condition and corrosion damage taken into account was calculated. Blades life-time before reaching a critical state was estimated.

Key words: nondestructive testing, HPP hydroturbine's guide blades, defects of welded joints, corrosion, stress-strain state, fracture, resource.

УДК: 621.745

А.С. Лычагов¹, Р.В. Трифонов¹, И.О. Леушин²**МАЛОЗАТРАТНЫЕ ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПРОФИЛАКТИКИ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАСПЛАВА СИЛУМИНА ПРИМЕСЯМИ ЖЕЛЕЗА В УСЛОВИЯХ
ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА**ОАО «НИТЕЛ», г. Нижний Новгород¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

На основании литературных данных и собственных исследований предложены варианты решения проблемы предотвращения загрязнения расплава силумина примесями железа в условиях действующего производства ОАО «НИТЕЛ» (г. Н. Новгород). Рассматривается возможность использования отходов, состоящих из мелкой фракции дробленой и молотой слюды, в составе специальных покрытий для чугунных тиглей. Отмечен предположительный эффект от использования новых покрытий.

Ключевые слова: силумин, интерметаллические соединения, чугунный тигель, слюда, мусковит, флогопит, защитное покрытие.

Силумины – литейные алюминиевые сплавы системы Al-Si, содержащие кремний в количестве до 13% без включения меди, - характеризуются высокой коррозионной стойкостью и хорошими литейными свойствами. Их широко применяют в качестве конструкционных материалов для изделий машиностроения.

В последнее время, в первую очередь, в связи с удорожанием первичных материалов, четко просматривается тенденция все более широкого использования предприятиями более дешевых вторичных шихтовых материалов (лома и отходов) для выплавки силуминов, что значительно снижает затраты на изготовление отливок. Во многих случаях качество вторичных алюминиевых сплавов уступает качеству сплавов, приготовленных из первичных материалов.

Между тем использование повышенного количества низкосортной шихты при выплавке силуминов значительно ухудшает их свойства: способствует насыщению газами, неметаллическими включениями, приводит к неизбежному накоплению металлических примесей в больших количествах, чем предусмотрено стандартом. В первую очередь речь идет о примесях железа, как известно, образующего с химическими элементами в составе силуминов, такими как марганец, медь, магний и кремний, сложные интерметаллические соединения, которые приводят к снижению пластичности и коррозионной стойкости, ухудшению обработки отливок резанием и жидкотекучести расплава [1]. Особенно это заметно при производстве изделий из силуминов при литье в кокиль и песчаные формы. Резкое снижение перечисленных свойств вызывает тонкие иглообразные выделения крупных кристаллов железистой составляющей ($FeAl_3$ или $Al_xSi_yFe_z$) (рис. 1) [2].

Ситуация усугубляется тем, что в небольших литейных цехах машиностроительных предприятий для плавки алюминиевых сплавов из экономических соображений часто применяют чугунные тигли. В то же время при плавке алюминиевых сплавов в таких тиглях содержание железа может достигать до 2,5% и выше, а при сильном перегреве и при длительной выдержке сплава в чугунном тигле наблюдается активное растворение железа, переходящего из тигля в жидкую фазу сплава [3]. Кроме того, по данным [4], параллельно с этим расплав силумина при непосредственном контакте с чугунным тиглем «разъедает» его рабочую поверхность, дополнительно насыщаясь кремнием.

В силуминах железо образует соединения различного состава в виде крупных (до 500 мкм) тонких иглообразных выделений самостоятельной фазы, которые при затверде-

вании имеют грубое кристаллическое строение и поэтому значительно снижают механические свойства отливок, в частности, относительное удлинение и ударную вязкость. И хотя увеличение скорости охлаждения перегретого расплава, например, при его заливке в кокиль, способствует измельчению интерметаллидной фазы, проблема все же остается.



Рис. 1. Микроструктура сплава АК12 ($\times 100$). Травление 10% H_3PO_4

Возможными вариантами решения данной проблемы являются рафинирование расплава от железосодержащих включений и его модифицирование. Рафинирование алюминиевых сплавов от металлических примесей осуществляется более сложными методами, чем рафинирование от неметаллических включений. К традиционным применяемым методам рафинирования силуминов от примесей железа можно отнести ликвационные методы, ликвационно-кристаллизационные (при помощи избирательной растворимости), при помощи вакуумной дистилляции, воздействием химическими реагентами. Все основные операции перечисленных методов ведутся при высокой температуре и давлении, поэтому для их осуществления требуется конструктивно сложная и дорогостоящая аппаратура. Для высокотемпературного перегрева требуются повышенные затраты энергии и топлива, а также имеет место снижение стойкости футеровки и тигля плавильного агрегата. К тому же низкая производительность процесса и сложность его практической реализации вынуждают предприятия использовать более простые и мало затратные варианты решения проблемы загрязнения расплава силумина примесями железа [5, 6, 7].

Модифицирование силуминов приводит к изменению состава, структуры и размеров частиц железосодержащих соединений ($FeAl_3$, Al_4Si_2Fe), образующихся в грубокристаллической форме [8, 9]. В качестве модификаторов используются бериллий (Be), ванадий (V), вольфрам (W), ниобий (Nb), кобальт (Co). При введении бериллия в расплав в количестве 0,15-0,4% при помощи специального приспособления, интерметаллиды переходят из грубой игольчатой структуры в компактную форму в виде многогранников. Добавки ванадия и вольфрама образуют свои интерметаллиды компактной формы взамен игольчатых выделений железосодержащих фаз. Действие добавок ниобия и кобальта проявляется в изменении зерна сплава, а также формы железосодержащих интерметаллидов. Основными недостатками использования данных модификаторов являются: высокая токсичность некоторых компонентов, а также их дефицит, тем самым обусловлена их высокая стоимость.

Очевидно, рафинирование и модифицирование расплава силумина, загрязненного примесями железа, по сути, представляют собой методы устранения имеющейся проблемы. Правильнее вести речь об эффективных способах предотвращения этого нежелательного явления. Как показал информационный обзор известных вариантов решения проблемы, чаще всего отечественные предприятия предпочитают вариант защиты рабочей поверхности чугунного тигля от взаимодействия с расплавом посредством нанесения специального покрытия, содержащего в своем составе отдельно, либо в комбинации такие компоненты, как от-

мученный мел, каолин, окись цинка, огнеупорная глина, молотый шамот, магнезит или тальк (табл. 1) [2, 10, 11].

Таблица 1

Составы защитных покрытий для чугунных тиглей

Смесь	Асбест молотый	Кварцевый песок	Огнеупорная глина	Жидкое стекло	Окись цинка	Графит	Мел молотый	Вода
1	45	-	-	55	-	-	120	1000
2	-	-	-	25	80	20	-	1000
3	-	70	45	-	-	110	-	1000
4	-	10	50	50	-	-	-	1000
5	75	-	-	70	130	-	-	1000
6	-	8	20	5	-	-	30*	37
7	-	-	-	2	33	-	-	65

Примечание: * – шамот молотый.

Выбор таких компонентов объясняется химической инертностью по отношению к расплаву силумина и высокой огнеупорностью специальных покрытий на основе данных материалов. Однако их применение часто связано со сложностью и длительностью приготовления и нанесения, низкой стойкостью. Процесс от начала приготовления некоторых составов красок до момента их готовности занимает до трех суток.

Одним из важных критериев при использовании специальных покрытий является исключение возможности загрязнения расплава неметаллическими примесями, входящими в состав тигельных красок. Так, например, в условиях ОАО «НИТЕЛ» перед плавкой силумина, внутреннюю поверхность чугунного тигля покрывали специальными красками на основе окиси цинка и жидкого стекла, а также огнеупорной глины и мела. Стойкость таких покрытий составляла не более 1-3 плавки. Длительность процесса приготовления и нанесения данных покрытий выходила за рамки технологического процесса. К тому же расплав загрязнялся частицами краски.

Что же касается защитных покрытий, не требующих особой подготовки к использованию и предлагаемых такими фирмами, как ОАО «ЭВТЕКТИКА», Белоруссия, и «ФОСЕКО», Англия, то их продукция отличается высокой стоимостью, кроме того, ее использование вынуждает предприятия идти по пути импортных закупок, что не всегда оправдывает себя в условиях мелкосерийного производства.

В этой связи перед рабочей группой исследователей ОАО «НИТЕЛ» (г. Нижний Новгород) и кафедры «Металлургические технологии и оборудование» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева была поставлена задача поиска малозатратного варианта решения проблемы профилактики загрязнения расплава силумина примесями железа, позволяющего увеличить долю вторичных материалов в шихте и учитывающего специфику производства.

В литейном цехе ОАО «НИТЕЛ» для приготовления алюминиевых сплавов используются стационарные и поворотные тигельные топливные печи типа «Колеман», работающие на газовом топливе. В состав шихты для приготовления силумина входят следующие компоненты: силумин в чушках по ГОСТ 1583-93 (60-70%); возврат собственного производства (30-40%). С целью улучшения механических и технологических свойств алюминиевого сплава, расплав в процессе плавки подвергается металлургической обработке — рафинированию и модифицированию. Для проведения процесса рафинирования и модифицирования применяется универсальный флюс, в состав которого входят: натрий фтористый ГОСТ 2871-75 (40%), натрий хлористый ГОСТ 4233-77 (45%), криолит ГОСТ 10561-80 (15%).

Члены рабочей группы ориентировались на комплексное решение проблемы, предусматривающие проведение поэтапных поисковых работ по следующим направлениям:

- 1) оценка содержания железа в шихтовых материалах и далее в сплаве на всех стадиях изготовления отливки и определение источников загрязнений;
- 2) выбор материала тигля для плавки силуминов;
- 3) выбор материала защитного покрытия и способа его нанесения на рабочую поверхность тигля;
- 4) оценка технической, экономической и экологической эффективности выбранных вариантов.

По результатам выполнения первого направления работ было выявлено, что содержание железа в шихтовых материалах составляет соответственно:

- в силумине в чушках (ГОСТ 1583-93) – 0,2-0,3% Fe;
- в возврате собственного производства – 0,7-2,5% Fe.

Растворение железа в расплаве происходит со скоростями 0,007-0,012% каждые 15 мин при температуре расплава 620-640°C. При повышении температуры расплава до 720-760°C растворимость железа в нем увеличивается до 0,02-0,05% каждые 15 мин. Из этого следует, что загрязнение силумина происходит на этапе выдержки расплава в тигле при рабочих температурах, т.е. источником загрязнения расплава примесями железа является железо с рабочей поверхности чугунного тигля. Чем выше температура перегрева расплава, тем интенсивнее происходит «разъедание» поверхности тигля и растворение железа в силумине.

Это позволило в дальнейшем сосредоточиться на процессе плавки силуминов. В рамках второго направления проводили сравнение тиглей из чугуна и графита.

Следует учитывать, что при выборе материала тигля главными моментами являются его стоимость, стойкость. По всем параметрам чугунный тигель превосходит графитовый: в среднем стоимость графитового тигля в 1,5 раза больше стоимости тигля из чугуна, по стойкости графитовый тигель уступает чугунному в 1,3-1,5 раза.

В итоге остановились на относительно дешевом варианте тигля из чугуна с повышенной стойкостью к расплаву силумина, способного увеличить свой срок службы с 50-60 (базовое значение, зафиксированное на предприятии) до 100-120 плавов. По мнению авторов, решение данной задачи может быть найдено на пути оптимизации структуры и микролегирования материала чугунного тигля без существенного изменения его химического состава. В настоящее время такие работы активно продолжаются.

Параллельно со вторым велись изыскания по третьему направлению.

Внимание рабочей группы привлек весьма перспективный материал - отходы слюдо-содержащей продукции – мелкая фракция дробленой и молотой слюды, имеющийся в распоряжении одного из специализированных предприятий Нижегородской области ОАО «Слюда», р.п. Филинское, занимающегося переработкой слюдяного сырья и производством изделий на основе этого материала.

Производство любого вида продукции из слюды сопровождается наличием определенного количества технологических отходов (от 10 до 40%). За длительный промежуток времени работы предприятия скопилось большое количество отходов слюды, не утилизированной и не переработанной в пригодное для использования сырье.

Отходы переработки слюдяного сырья представляют собой сферические и пластинчатые частицы, размерами от 5 до 500 мкм. В основном это мусковит $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$ и флогопит $(KMg_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2)$, относящиеся соответственно к группам листовых алюминиевых и магнезиально-железистых слюд и являющиеся высококачественными электроизоляционными и теплоизоляционными материалами из-за особенностей структуры. Ее основной элемент представлен трёхслойным пакетом из двух тетраэдрических слоев $[AlSi_3O_{10}]$ с находящимся между ними октаэдрическим слоем, состоящим из катионов Al. Два из шести атомов кислорода октаэдров замещены гидроксильными группами (OH) или фтором. Пакеты связываются в непрерывную структуру через ионы K^+ с координационным числом 12 [12].

Первичная информация о химсоставе отходов слюдяного сырья позволила провести оценку экологической безопасности при возможном применении их в конкретной технологии.

Практический интерес в связи с поставленной задачей выбора материала защитного покрытия тигля представляют такие свойства мусковита и флогопита, как [13]:

- высокая механическая прочность (предел прочности на растяжение у мусковита 48-334 МПа, у флогопита 220-380 МПа; сопротивление сжатию соответственно 800-1200 и 300-600 МПа);
- относительно высокая химическая стойкость к агрессивным средам;
- термическая стойкость (способность сохранять при нагревании физические свойства) до 1000°C;
- высокая температура плавления: 1250–1400°C – мусковит, 1330°C – флогопит;
- низкая смачиваемость жидкостями.

По мнению авторов данной работы, использование покрытия на основе этих материалов исключит возможность прямого контакта расплава с поверхностью чугунного тигля, вследствие чего снизится вероятность попадания примесей железа в расплав. При этом механизм защиты расплава силумина от попадания примесей железа будет базироваться на свойствах, приведенных выше.

Применение отходов слюдяного сырья в составе специальных покрытий требует предварительной подготовки – сортировка по фракциям. Такая подготовка проводится на ОАО «Слюда», р.п. Филинское.

В связи с поставленными задачами разработан план эксперимента для исследования и оценки работы нового покрытия (стойкость, количественный состав, физические свойства).

Соответствующие опытные работы проводятся в настоящее время в условиях литейного цеха ОАО «НИТЕЛ».

Решение проблемы предотвращения попадания примесей железа в алюминиевый расплав, по мнению авторов, обеспечит эффект в части:

- снижения вредного влияния примесей железа на механические и эксплуатационные свойства литых деталей;
- расширения возможностей использования возврата собственного производства;
- снижения брака отливок по отклонению от заданных химического состава и механических свойств;
- увеличения срока службы тигля;
- обеспечения ресурсосбережения за счет использования отходов производства слюдо-содержащей продукции для приготовления покрытия рабочей поверхности чугунных тиглей.

Библиографический список

1. Курдюмов, А.В. Флюсовая обработка и фильтрование алюминиевых расплавов / А.В. Курдюмов [и др.]. – М.: Metallurgy, 1980. – 196 с.
2. Курдюмов, А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник для вузов / А.В. Курдюмов [и др.]. – М.: Metallurgy, 1986. – 416 с.
3. Немененок, Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б.М. Немененок. – Мн.: Технопринт, 1999. – 272 с.
4. Баранов, П.И. Плавка и рафинирование алюминиевых сплавов / П.И. Баранов. – М.: Оборонгиз, 1949.
5. Худяков, И.Ф. Технология вторичных цветных металлов: учебник для вузов / И.Ф. Худяков, А.П. Дорошкевич, С.Э. Кляйн [и др.]. – М.: Metallurgy, 1981. – 280 с.
6. Уткин, Н.И. Производство цветных металлов / Н.И. Уткин. – М.: Интернет Инжиниринг, 2000. – 442 с.
7. Курдюмов, А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник / А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 615 с.

8. **Колобнев, И.Ф.** Справочник литейщика. Цветное литье из легких сплавов. / И.Ф. Колобнев, В.В. Крымов, А.В. Мельников. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 416 с.
9. **Петров, С.М.** Повышение качества вторичных литейных алюминиевых сплавов / С.М. Петров [и др.]. – Л.: ЛДНТП, 1988. – 28 с.
10. **Альтман, М.Б.** Metallurgy литейных алюминиевых сплавов / М.Б.Альтман. – М.: Metallurgy, 1972. – 152 с.
11. **Лебедев, В.М.** Отливки из алюминиевых сплавов / В.М. Лебедев, А.В. Мельников, В.В. Николаенко. – М.: Машиностроение, 1970. – 216 с.
12. **Волков, К. И.** Свойства, добыча и переработка слюды / К.И.Волков, П.Н. Загибалов, М.С. Мецик. – Иркутск, 1971.
13. Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Слюда. – М.: ФГУ ГКЗ, 2007.

*Дата поступления
в редакцию 22.01.2015*

A.S. Lychagov¹, R.V. Trifonov¹, I.O. Leushin²

**COST-EFFECTIVE SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF PREVENTION
OF CONTAMINATION OF THE MELT SILUMIN WITH IRON IMPURITIES
IN THE CONDITIONS OF OPERATING MANUFACTURE**

JSC NITEL, Nizhny Novgorod¹,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev²

Based on the literature data and our own investigations, various solutions was proposed to the problem of preventing contamination of the melt silumin with iron impurities in the conditions of the current manufacturing of JSC "NITEL" (Nizhny Novgorod). The possibility of using waste consisting of the fine fraction of crushed and powdered mica, as part of special coatings for cast iron crucibles. Presumptive effect of these new coatings is noted.

Key words: silumin, intermetallic compounds, pig-iron crucible, mica, white mica, phlogopite, protective coating.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338.001.36

А.А. Крылов¹, Е.С. Митяков²

АНАЛИЗ КРИМИНОГЕННОЙ ОБСТАНОВКИ В СИСТЕМЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ РЕГИОНОВ ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА)

ОАО «Институт микроэкономики»¹,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Предлагается исследование показателей криминогенной обстановки для регионов Приволжского федерального округа. На первом этапе выбирались система показателей. Предложенные показатели характеризуют субъективную оценку жителями региона уровня безопасности, состояние защищенности экономических отношений в регионе, качество работы органов правопорядка в сфере защиты экономических интересов граждан, уровень защищенности экономических интересов различных субъектов региона от коррупционных явлений, а также масштаб ущерба, связанного с криминальными угрозами в регионе. В качестве пороговых значений для всех показателей выбраны аналогичные показатели в целом по Российской Федерации. Для совместного анализа проведена нормировка исходных показателей. После нормировки индикаторы стали безразмерными и изменялись в одних и тех же пределах, что позволило их анализировать с помощью лепестковых диаграмм. Показано, что криминогенная обстановка в ПФО в последние годы была в среднем лучше, чем по России. Большинство криминальных показателей либо превысили порог, либо находились вблизи него.

Ключевые слова: экономическая безопасность, индикаторы экономической безопасности, пороговые значения, криминогенная обстановка, экономика региона.

Под экономической безопасностью понимают такое состояние экономики и институтов власти государства, при котором обеспечивается гарантированная защита национальных интересов страны, её социально направленное развитие в целом, достаточный оборонный потенциал, даже при наиболее неблагоприятных условиях развития внутренних и внешних процессов [1]. Неравномерные условия развития регионов России создают дополнительные угрозы для их экономической безопасности. Кроме объективных факторов, существенно влияющих на неравномерное экономическое развитие регионов, вызывают опасение факторы субъективного характера, в том числе связанные с криминальной обстановкой. В связи с этим актуальной задачей является разработка инструментария для мониторинга экономической безопасности регионов с учетом не только объективных, но и субъективных социальных и экономических факторов.

В работе [2] предложены система индикаторов и методические подходы к оценке экономической безопасности Приволжского федерального округа (ПФО) и входящих в него субъектов федерации. При разработке системы индикаторов экономической безопасности региона и их пороговых значений авторами был обобщен опыт предшествующих исследователей, а также собственный опыт оценки экономической безопасности различных объектов экономики [3, 4]. Оценку экономической безопасности предлагалось осуществлять на основе не только социально-экономических показателей, но и с учетом показателей, характеризующих криминальную обстановку. Построен обобщенный индекс, характеризующий криминогенную обстановку. В качестве продолжения исследований в данной работе предлагается де-

тальное исследование отдельных показателей криминогенной обстановки для регионов Приволжского федерального округа.

Исходные значения индикаторов для России представлены в табл. 1. Именно эти значения выбирались в качестве пороговых при анализе криминогенной обстановки в ПФО. Первые три показателя говорят о субъективной оценке жителями региона уровня безопасности. Показатель «Доля экономических преступлений в числе выявленных и зарегистрированных» свидетельствует о состоянии защищенности экономических отношений в регионе. Показатель «Доля приостановленных уголовных дел в числе зарегистрированных экономических преступлений» показывает качество работы органов правопорядка в сфере защиты экономических интересов граждан и различных региональных хозяйствующих субъектов. Показатель «Количество преступлений коррупционной направленности» указывает на уровень защищенности экономических интересов различных субъектов региона от коррупционных явлений. Последний показатель – «Сумма причиненного материального ущерба» свидетельствует о масштабах ущерба, связанного с криминальными угрозами в регионе. В качестве пороговых значений для всех семи показателей взяты аналогичные показатели в целом по Российской Федерации.

Таблица 1

Исходные значения индикаторов

№ п/п	Название показателя	2010	2011	2012	2013
1	Процент опрошенных граждан, которые считают, что в последние пять-шесть лет жизнь в России стала опаснее.	52	55	55	53
2	Процент опрошенных граждан, которые боятся разорения или нищеты	22	22	22	20
3	Процент опрошенных граждан, которые в целом не чувствуют себя защищёнными от преступников, от посягательств на свою жизнь, здоровье, имущество и т. д.	56	54	56	54
4	Доля экономических преступлений в числе выявленных и зарегистрированных	10,5%	8,4%	7,5%	6,4%
5	Доля приостановленных уголовных дел в числе зарегистрированных экономических преступлений	22,3%	20,5%	19,4%	19,4%
6	Количество преступлений коррупционной направленности (на 100 тыс. чел.)		28,3	34,6	29,7
7	Сумма причиненного материального ущерба, тыс. руб. (на 100 тыс. чел.)	101	95	88	111

Поскольку все индикаторы имеют различную размерность, для совместного анализа целесообразно проводить их нормировку. При этом индикаторы становятся безразмерными и могут изменяться в одних и тех же пределах, что дает возможность их анализировать с помощью лепестковой диаграммы.

В общем случае можно выделить «затратные» и «эффектные» индикаторы. Рост первых ведет к снижению, а рост вторых – к увеличению уровня экономической безопасности системы. В данном случае все индикаторы являются «затратными». Нормирующие функции выбирались таким образом, чтобы после нормировки все индикаторы стали «эффектными» (чем меньше значение нормированного индикатора, тем больше угроз экономической безопасности). Первые пять показателей нормировались с использованием соотношения следующего вида

$$y = \begin{cases} 1,75 - 0,75 \frac{x}{a}, & x < a; \\ \frac{x - 100}{a - 100}, & x \geq a, \end{cases} \quad (1)$$

где x – реальное значение индикатора; a – его пороговое значение. Данная функция является ку-

сочно-непрерывной и линейной. Нормировка позволила отобразить индикаторы на единую безразмерную шкалу [0;1,75]. При этом индикаторы, которые находятся в зонах риска, расположились ниже уровня $y = 1$. Поскольку пределы изменения шестого и седьмого индикаторов определить довольно сложно, то для их нормировки использовалась следующая функция [5]:

$$y = \begin{cases} 2^{\left(1-\frac{x}{a}\right) \cdot \ln \frac{10}{3}}, & \text{если } \frac{x}{a} < 1; \\ 2^{-\log_{10} \frac{x}{a}}, & \text{если } \frac{x}{a} \geq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Далее на рис. 1-7 приведены нормированные значения предложенных индикаторов. Для сравнительного анализа данные представлены за 2009, 2011 и 2013 гг.

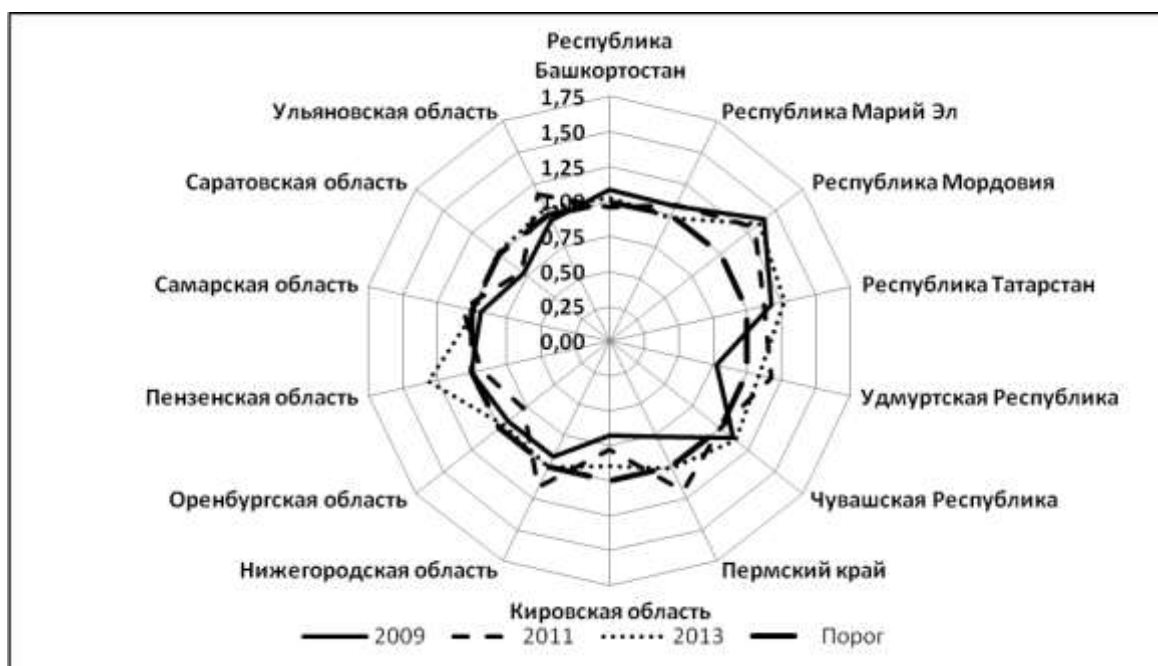


Рис. 1. Процент опрошенных граждан, которые считают, что в последние пять-шесть лет жизнь в России стала опаснее

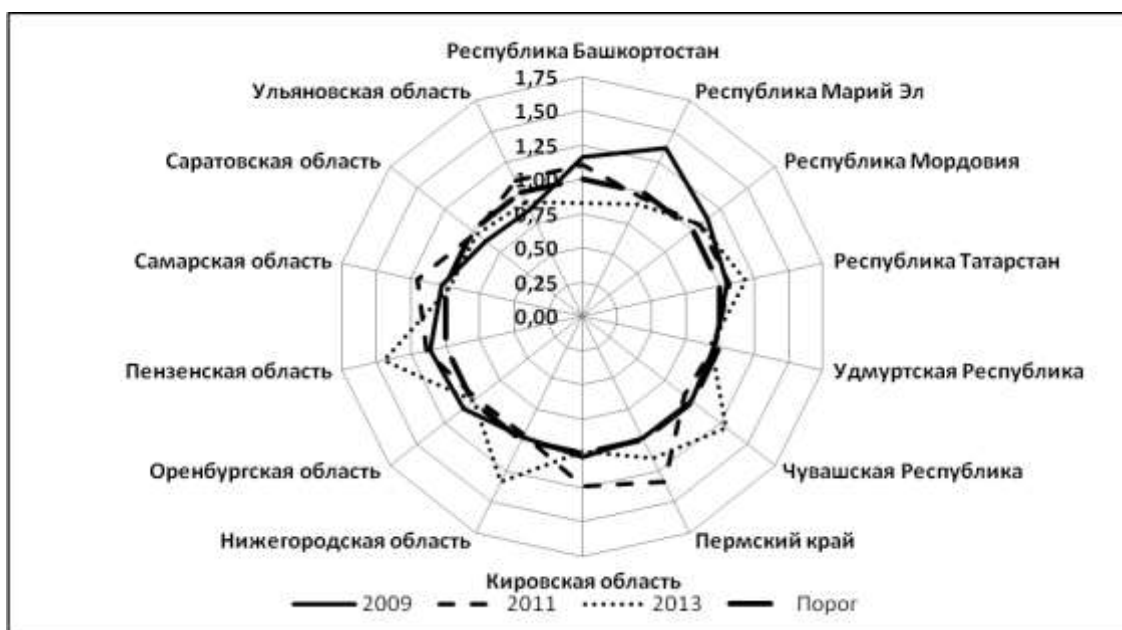


Рис. 2. Процент опрошенных граждан, которые боятся разорения или нищеты

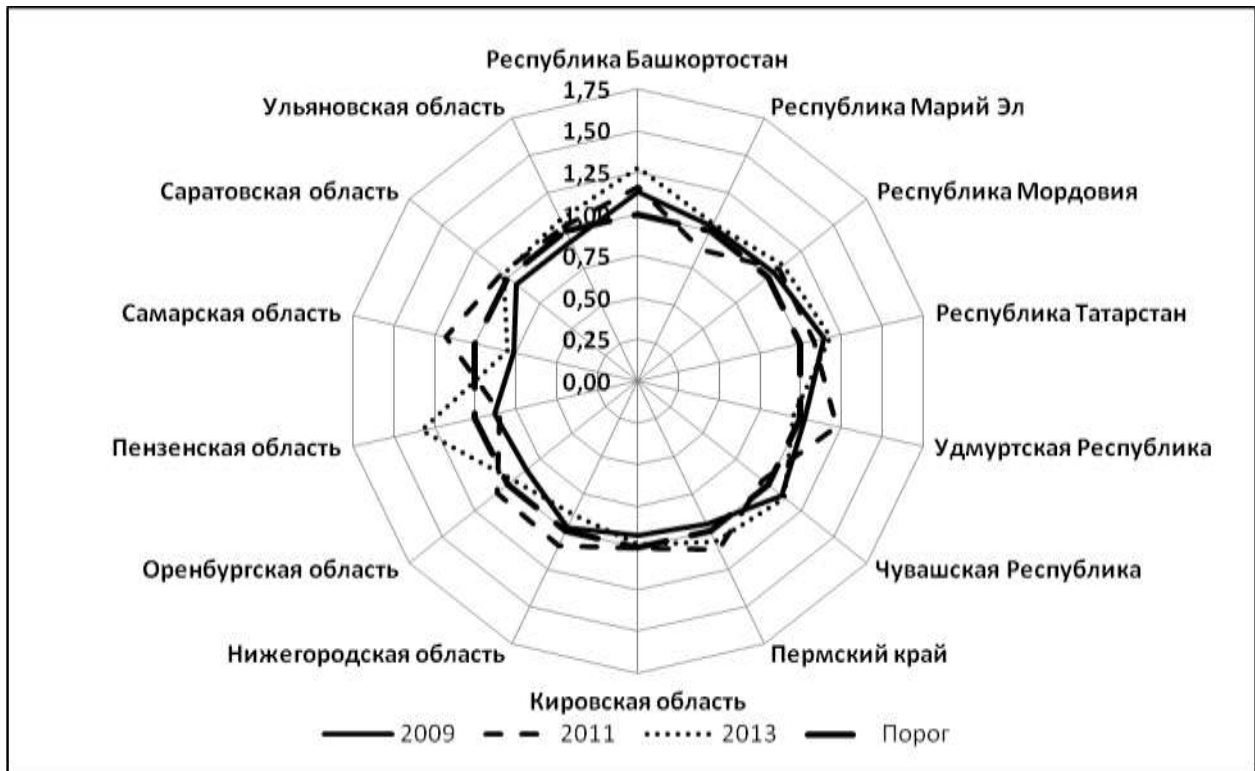


Рис. 3. Процент опрошенных граждан, которые в целом не чувствуют себя защищёнными от преступников, от посягательств на свою жизнь, здоровье, имущество и т. д.

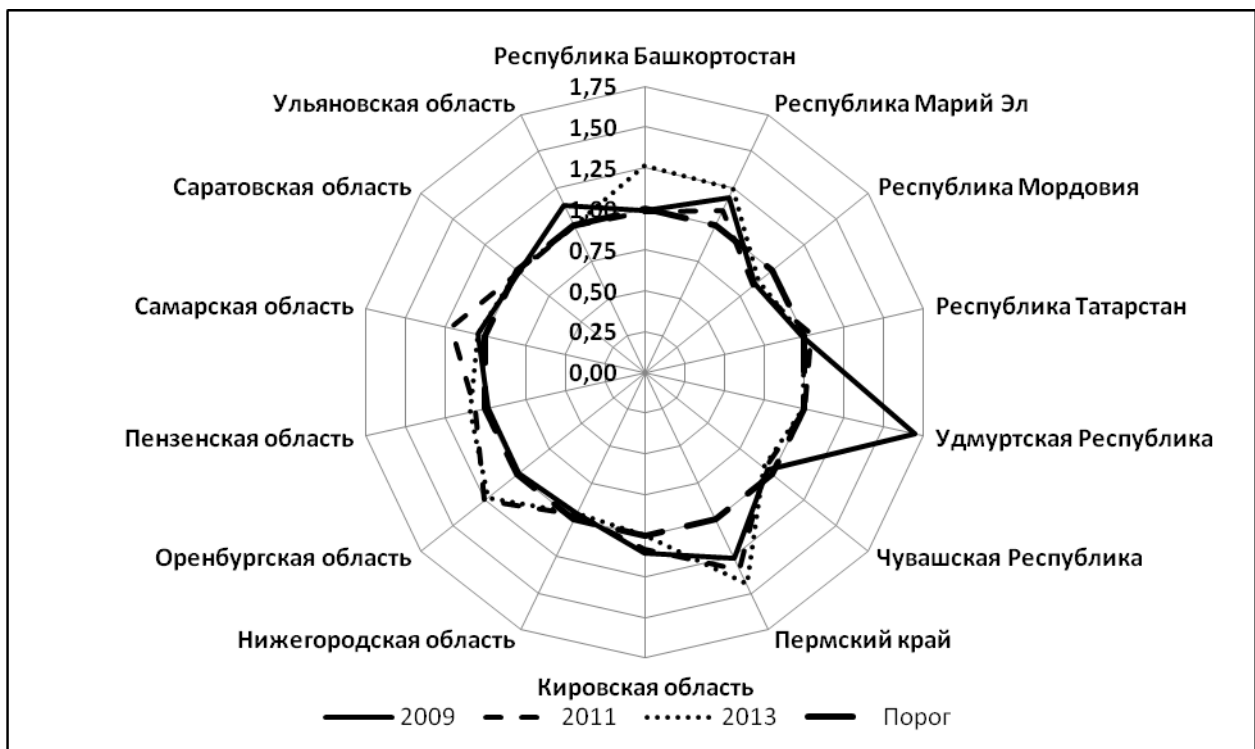


Рис. 4. Доля экономических преступлений в числе выявленных и зарегистрированных

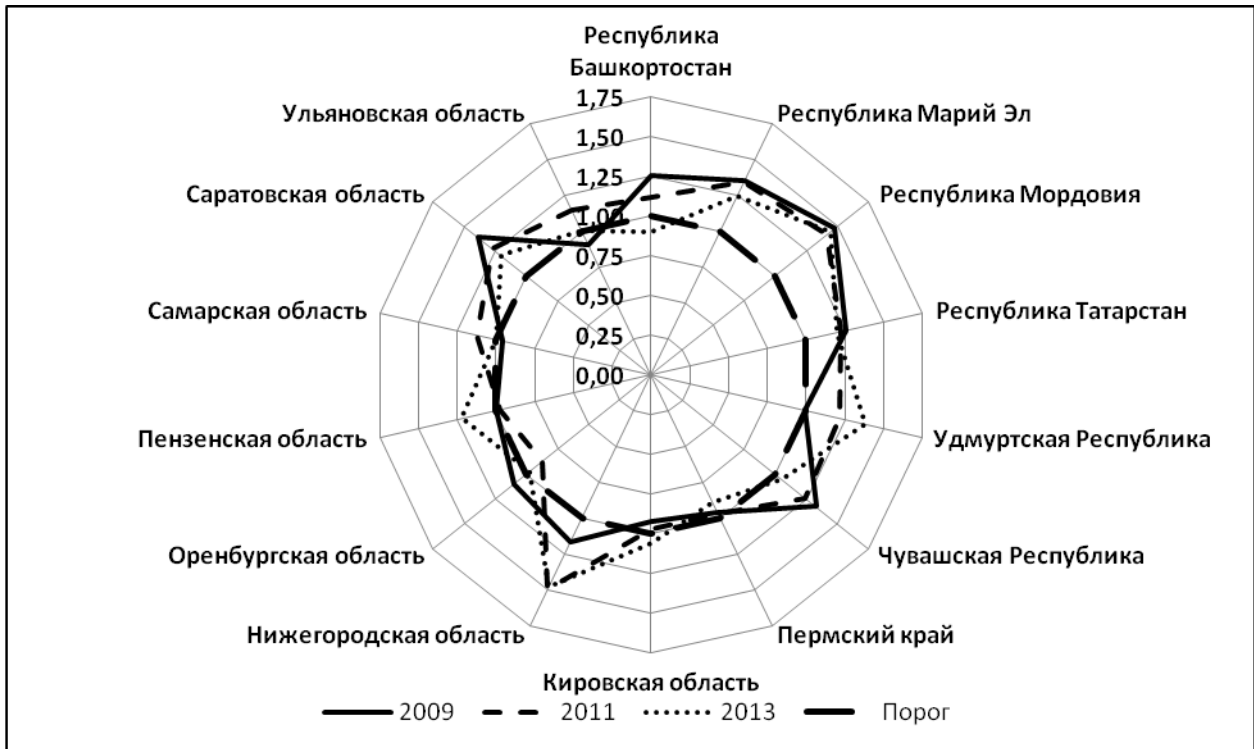


Рис. 5. Доля приостановленных уголовных дел в числе зарегистрированных экономических преступлений

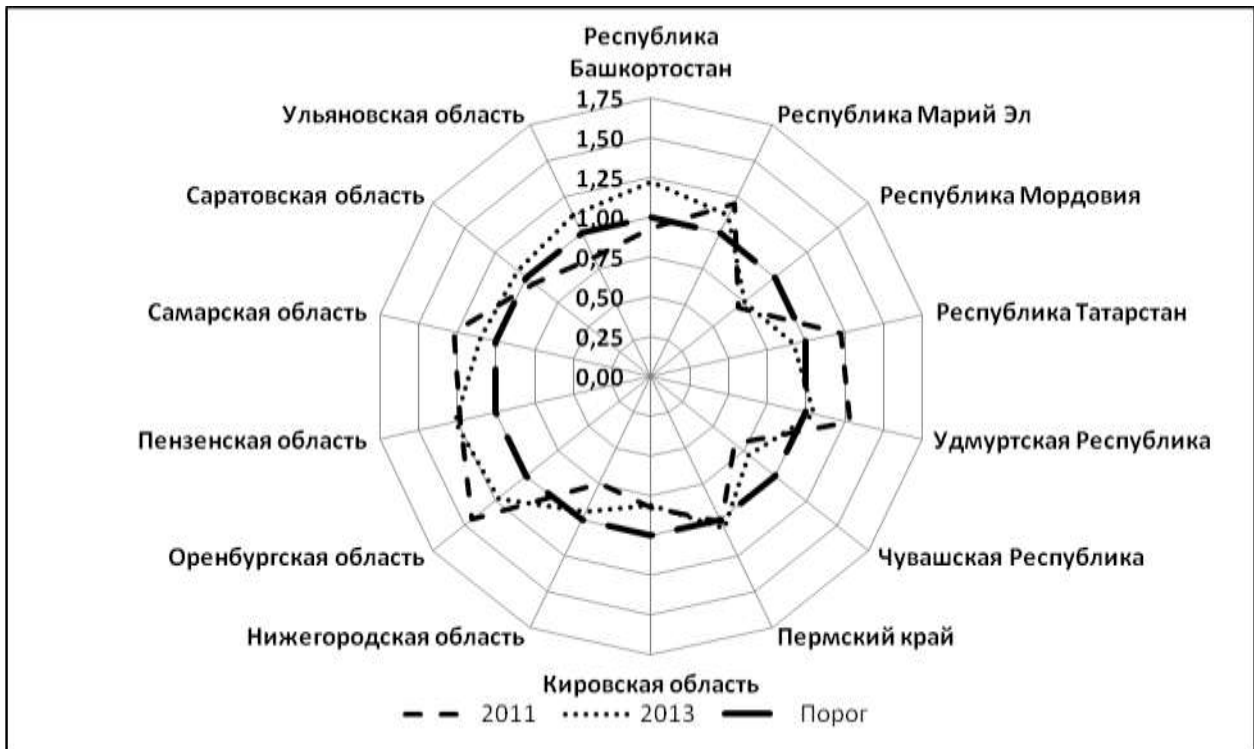


Рис. 6. Количество преступлений коррупционной направленности (на 100 тыс. чел.)

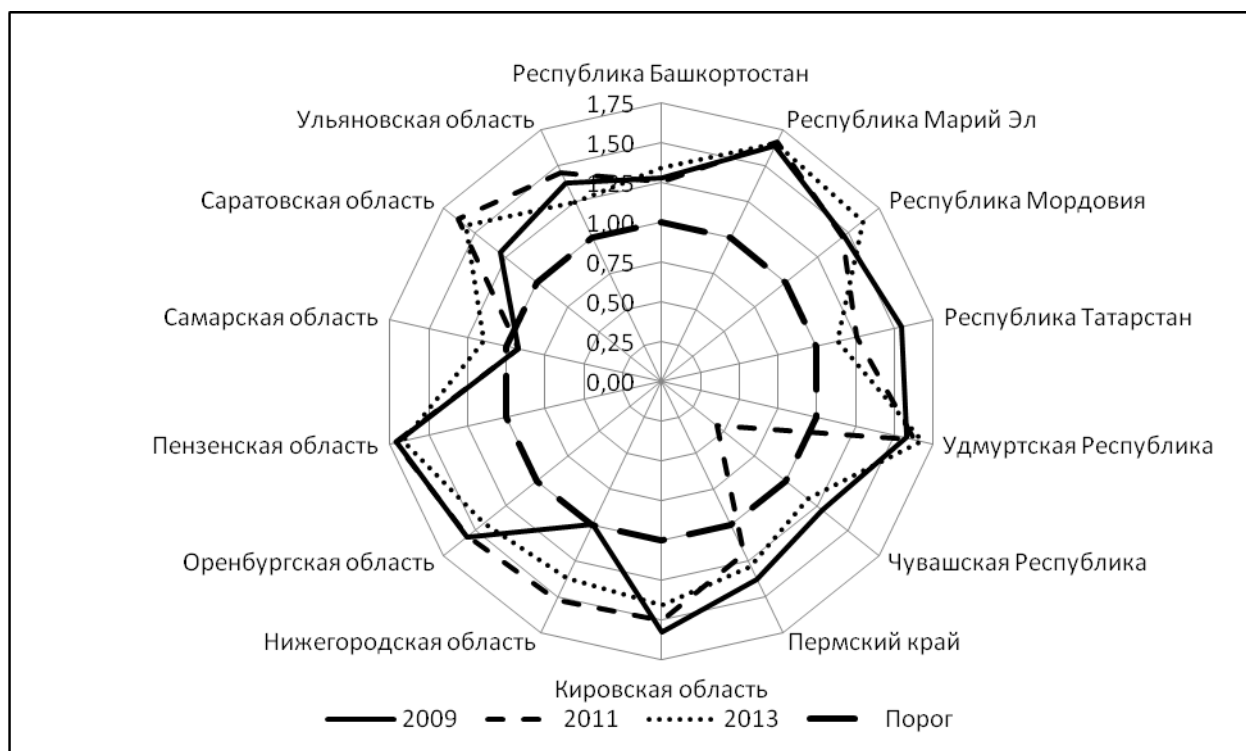


Рис. 7. Сумма причиненного материального ущерба (на 100 тыс. чел.)

Анализ индикатора «Процент опрошенных граждан, которые считают, что в последние пять-шесть лет жизнь в России стала опаснее» (рис. 1) показал, что Мордовия является явным лидером среди регионов ПФО. Наихудшее значение индикатора наблюдается в Кировской области. Остальные регионы расположены вблизи среднероссийского уровня.

Анализируя индикатор «Процент опрошенных граждан, которые боятся разорения или нищеты» (рис. 2), можно сделать вывод о том, что в целом по его значению регионы равномерно распределены. В отдельные годы меняются регионы лидеры и аутсайдеры: в 2009 году лидировала Республика Марий Эл, в 2011 – Пермский край, а в 2013 – Пензенская, Нижегородская области и Чувашская Республика.

Индикатор «Процент опрошенных граждан, которые в целом не чувствуют себя защищёнными от преступников, от посягательств на свою жизнь, здоровье, имущество и т. д.» (рис. 3) показал в целом равномерное распределение между регионами ПФО. Отметим, что в ряде регионов (Самарская, Пензенская, Оренбургская области и др.) наблюдается значительная положительная динамика данного индикатора.

Анализ индикатора «Доля экономических преступлений в числе выявленных и зарегистрированных» (рис. 4) показал, что практически во всех регионах (за исключением Республики Мордовия и Чувашия) значение нормированного индикатора находится в зоне стабильности (выше среднероссийского уровня).

Индикатор «Доля приостановленных уголовных дел в числе зарегистрированных экономических преступлений» (рис. 5) в большинстве регионов (за исключением Ульяновской, Кировской областей и Пермского края) находится в зоне стабильности.

Анализ индикатора «Количество преступлений коррупционной направленности (на 100 тыс. чел.)» (рис. 6) продемонстрировал наличие явных лидеров: Пензенская, Самарская, Оренбургская области, Республики Удмуртия и Марий Эл, где ситуация лучше, чем в среднем по стране. К аутсайдерам следует отнести Республики Чувашия и Мордовия, Нижегородскую и Кировскую области.

Наконец, анализ индикатора «Сумма причиненного материального ущерба (на 100 тыс. чел.)» (рис. 7) показал, что в ПФО ситуация по данному показателю существенно луч-

ше, чем в Российской Федерации. Однако в ряде случаев (Чувашская Республика, 2011) наблюдались отрицательные выбросы в динамике данного индикатора.

В заключение можно сделать вывод о том, что криминогенная обстановка в ПФО в последние годы была в среднем лучше, чем по России. Большинство криминальных показателей либо превысили порог, либо находились вблизи него.

Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ в проведении научных исследований «Методологические основы анализа экономической безопасности региона (на примере Нижегородской области)», проект №14-02-00093.

Библиографический список

1. **Сенчагов В.К.** Экономическая безопасность России: общий курс: учебник / В.К. Сенчагов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 815 с.
2. **Крылов, А.А.** Анализ экономической безопасности Приволжского федерального округа с использованием показателей, характеризующих криминальную обстановку / А.А. Крылов, Е.С. Митяков, А.Л. Ситковский // Микроэкономика. 2014. №5. С. 53–59.
3. Организация и правовое обеспечение мониторинга состояния экономической безопасности промышленных предприятий органами внутренних дел: научно-практическое пособие / А.А. Крылов [и др.]. – М.: ФГКУ «ВНИИ МВД России», 2014. – 179 с.
4. **Сенчагов, В.К.** Индикаторы устойчивого развития регионов Российской Федерации / В.К.Сенчагов, С.Н. Митяков // Проблемы устойчивости функционирования стран и регионов в условиях кризисов и катастроф современной цивилизации: тез. докл. XVII Междунар. науч.-практич. конф. – М., 2012. С. 17–19.
5. **Сенчагов, В.К.** Экономическая безопасность регионов России / В.К. Сенчагов [и др.]. – Н. Новгород: Растр-НН, 2012. С. 31–72.

*Дата поступления
в редакцию 01.12.2014*

A.A Krylov¹, E.S Mityakov²

ANALYSIS OF THE CRIME SITUATION IN SYSTEM OF ECONOMIC SECURITY OF THE REGION (ILLUSTRATED THE VOLGA FEDERAL DISTRICT)

JSC "Institute of microeconomics"¹
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

The paper investigated the crime situation indicators for the Volga Federal District. In the first stage chosen a system of indicators. The proposed indicators characterize subjective assessment of the region's inhabitants level of security, state security of economic relations in the region, the quality of law enforcement in the field of protection of the economic interests of citizens, the level of protection of the economic interests of the various actors in the region of corruption phenomena and the extent of damage associated with criminal threats in the region. As the thresholds for all the indicators chosen for the average Russian. For the joint analysis carried normalization baseline values. After normalization, indicators become dimensionless and varied the same range as possible to analyze them with a spade diagrams. Shown that the crime situation in the Volga Federal District in recent years was on average better than in Russia. Most indicators of criminal or exceeds the threshold, or were close to him.

Key words: economic security, economic security indicators, thresholds, crime situation, the region's economy.

УДК 338.24.01

М.Д. Крохоняткин

**СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
В РАМКАХ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены теоретические аспекты инновационного менеджмента, связанные с взаимодействием субъектов и объектов инновационной деятельности. Предложены и даны общие характеристики четырех вариантов различных соотношений взаимодействия между субъектами и объектами инновационной деятельности. Практическое применение предлагаемого подхода к анализу тенденций развития социально-экономических отношений позволяет разрабатывать системы количественных и качественных показателей и критериев оценки эффективности инновационного менеджмента. Появляется возможность структурировать, детализировать и содержательно наполнить такие характеристики, как «высокая и низкая активность субъектов инновационной деятельности», а также «высокая и низкая активность потребителей продуктов инновационной деятельности».

Ключевые слова: инновационный менеджмент, инновационная деятельность, экономика знаний, объекты и субъекты инновационной деятельности, инновационная экономика, социальная ответственность, социализация бизнеса.

Инновационный менеджмент предполагает совмещение систематического познавательного интереса к разработке научной проблематики с ориентацией и актуализацией научного знания на производственный сектор с учетом экономической перспективности использования этого знания для удовлетворения актуальных потребностей, как производственного сектора, так и конечного потребителя.

«Экономика знаний» за последние десятилетия стала одним из расхожих клише, популяризированным активностью как политиков, так и отдельных организаций различного уровня. Причины востребованности данного понятия носят самый различный характер: от прагматической необходимости в политическом репозиционировании, и до попыток в самых общих чертах осмыслить тренды развития глобализирующихся социетальных систем, придать этим изменениям смысл и логику.

Между тем, качественное отличие экономических отношений между традиционной индустриально развитой экономикой и «экономикой знаний» вовсе неочевидно. Макросоциологическая интерпретация функциональной нагрузки социально-экономической подсистемы наделяет ее задачей приобретения, воспроизводства и распределения ресурсов, необходимых для удовлетворения разнообразных потребностей индивидов и социальных групп. Разнообразие форм организации взаимодействия между субъектами экономической деятельности определяется значительным количеством факторов, среди которых такие, как отношения собственности, уровень технологического развития, и, наконец, культурные нормы и ценности. Изменения какого-то одного элемента системы экономических отношений неизбежно влечет за собой изменения системы в целом.

Продолжение этой линии рассуждений предполагает, что и новый тип общественных отношений, – постиндустриальный, – идущий на смену модерну, сможет продемонстрировать иные, отличные от индустриального общества, принципы организации экономической деятельности. Речь идет о том, что в XXI веке дальнейшее развитие науки, техники станет не целью, а средством дальнейшего социально-экономического развития большинства стран. Речь в данном случае идет о создании не технотронного, а гуманистического общества. Оно должно основываться на достоинстве, знаниях, свободе личности.

Инновационный менеджмент и инновационная деятельность в целом в этом смысле может рассматриваться как система создания ценности прикладного научного знания по-

средством «связывания» его с актуальными потребностями субъектов экономической деятельности и экономических отношений. Исходя из такой трактовки, одной из ключевых проблем, влияющих на особенности возникновения и динамики инновационной экономики, является отношение между субъектами и объектами инновационной активности в социально-экономическом пространстве. Под социальными субъектами инновационной активности можно понимать производителей инноваций (тех социально-экономических сил, которые иницируют и поддерживают процесс производства и распространения инноваций), а под социальными объектами – потребителей инноваций. При этом, например, сами представители индустриального сектора, не проявляющие самостоятельности и активности в производстве инноваций, также оказываются в роли объектов инновационной деятельности.

Субъектами инновационной активности могут выступать институциональные структуры и их представители, не только артикулирующие в публичном пространстве свою заинтересованность в результатах инновационной деятельности, но и предпринимающие усилия, направляющие необходимые ресурсы на организацию процесса производства инновационного продукта. К числу такого рода субъектов мы можем отнести государственно-политические институты, представителей корпоративного бизнеса и частного предпринимательства, институты академической и вузовской науки, – как научные коллективы, так и отдельные ученые. Каждый из указанных субъектов играет собственную роль в процессе производства, коммерциализации, и распространения инновации, но их совокупная и согласованная активность порождает систему экономических отношений, в которых доля инновационного сектора в производстве продукции, как на внешний, так и на внутренний рынок, удерживается на относительно высоком уровне и имеет тенденцию к росту.

К категории объектов инновационной деятельности мы можем отнести всех потребителей инновационной продукции: от технологии, средств производства и до конкретных продуктов. Потребители, как объекты инновационной деятельности, пассивны лишь в отношении функции производства. В пространстве же экономического взаимодействия потребительская активность формирует уровень активного спроса на ту или иную инновацию, обеспечивая в системе инновационной деятельности своего рода «обратную связь». К числу такого рода объектов мы можем также отнести индивидуальных потребителей инновационной продукции, а также государственно-политические институты, представителей корпоративного бизнеса и частного предпринимательства постольку, поскольку они выступают в роли конечного потребителя (а не инициатора или инвестора).

Исходя из этого, социально-экономическое взаимодействие в рамках инновационной экономики может быть представлено как балансовая модель активности субъектов и объектов инновационной экономики, в которой различное отношение уровня активности, как субъектов, так и объектов порождает специфические характеристики и эффекты, влияющие на устойчивость и продуктивность самой инновационной деятельности. Один и тот же социальный участник (например, государственно-политический институт) может одновременно играть и роль субъекта и роль объекта инновационной деятельности. Социально-экономическая философия определяет это явление как эффект «субъектно-объектного перевертывания».

Анализ различных возможных соотношений взаимодействия между субъектами и объектами инновационной деятельности позволяет выделить следующие основные варианты (рис. 1):

- ослабленная модель инновационной экономики;
- «производственная» модель инновационной экономики;
- «маркетинговая» модель инновационной экономики;
- сбалансированная модель инновационной экономики.

Ослабленная модель инновационной экономики работает в условиях относительно автономного (самодостаточного) существования субъектов и объектов инновационной деятельности. Каждый из них существует в собственном пространстве потребностей,

мотивов и действий, в котором не проявляется принципиальной взаимной заинтересованности, закрепленной институциональными обязательствами, в результатах деятельности друг друга. Элементы инноваций хотя и присутствуют в производстве и потреблении, но не носят системного, регулярного и последовательного характера. Данная модель может являться следствием:

- низких темпов развития национальной экономической модели (отставание);
- выбора «атипичного», часто тупикового, пути развития национальной экономической модели («особый путь»);
- реверсивных процессов и сопровождающего их «отката» в развитии национальной экономической модели (деградация).

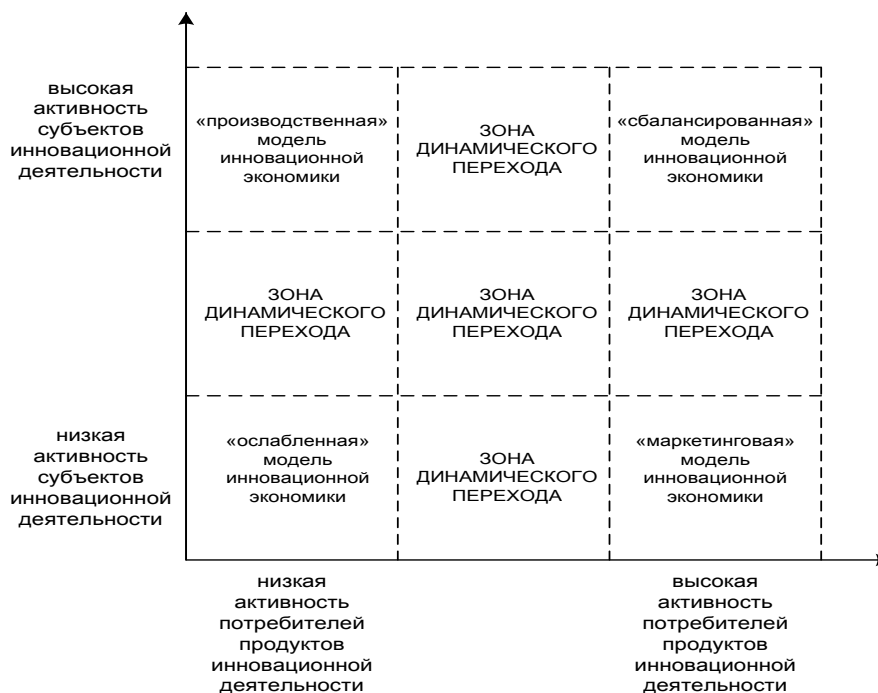


Рис. 1. Модели взаимодействия между субъектами и объектами инновационной экономической деятельности

«Производственная» модель, делающая акцент на дисбалансе в пользу субъектной активности, работает в условиях приоритетной ориентации лишь на потребности относительно небольшой части потребителей продуктов инновационной активности в роли которых, как правило, выступают государственно-политические институты или корпорации. Ее слабое место – слабая обратная связь, ориентирующая производителя инновации на конечного потребителя тиражированной инновационной продукции и объективно работающая на институционализацию внутреннего рынка инновационной продукции. В условиях централизованной, плановой (социалистического типа), когда главным заказчиком и выразителем потребностей выступало государство, такая модель показывала ограниченный уровень продуктивности по отдельным секторам производства (например, в ВПК). С приходом экономической либерализации и новых условий хозяйствования, отказом государства от львиной доли директивных функций в управлении экономическим сектором, данная модель стала стремительно терять остатки былой продуктивности и фактически дискредитировала себя. Вместе с тем, необходимо отметить, что сильной стороной данной модели является институционально закрепленная функция системного производства научного знания и связанного с ним инновационного продукта в виде технологий, усовершенствований и т.д.

Маркетинговая модель, делающая акцент на «обратной» связи, функционирующая в условиях либерального рынка, когда инновационный характер продукта является одним из

ключевых факторов рыночной успешности, отличается высокой степенью инвестиционной активности субъектов экономической деятельности, ориентированной на потребительский рынок. Сильной стороной данной модели является объем инвестиционных ресурсов, которые может предоставить в распоряжение субъектов инновационной деятельности, прежде всего, частные инвесторы. Слабой стороной модели является институциональная слабость сектора производства инноваций, и минимизация активности государственно-политических институтов как субъекта инновационного производства. Впрочем, следует отметить, что слабость эта является продолжением сильных сторон: использование проектного подхода, зависимость не столько от объективных тенденций развития научного знания, сколько от мнений и представлений «заказчика» и «инвестора».

Ну и, наконец, сбалансированная модель, отдельные элементы становления которой лишь, отчасти, проявляются в современных локальных экономических системах. В отличие от предыдущих моделей исторические аналоги, которых можно с легкостью обнаружить либо в практике развития инновационного сектора современных локальных экономик, либо в недавнем прошлом, данная модель является скорее продуктом рационального конструирования, учитывающего нормативные ориентиры развития отечественного инновационного сектора.

Процесс трансформации одной модели в другую – это процесс не только трансформации структурно-функциональной системы управления как отдельными организациями или социальными институтами, – это и процесс реорганизации информационно-коммуникативной среды, обеспечивающей субъектов инновационной деятельности информацией об актуальных потребностях субъектов экономической деятельности, а последних, в свою очередь, информацией о тенденциях и перспективах научных и технологических разработок и потенциале их использования в создании наукоемкой продукции.

Описанные модели представляют собой идеализированные состояния системы производства и потребления инновационной продукции, описанные через призму отношения уровня активности, как субъектов, так и объектов инновационной деятельности. Соотношение такой активности является характеристикой динамической и потому соотношение той или иной реальной системы социально-экономических отношений с конкретной моделью носит условный характер.

Практическая значимость рассмотренной классификации можно рассматривать в нескольких направлениях.

Во-первых, применение предлагаемого подхода к анализу тенденций развития социально-экономических отношений во многом может быть связано с дальнейшей разработкой системы количественных и качественных показателей и критериев оценки эффективности инновационного менеджмента, позволяющих структурировать, детализировать и содержательно наполнить такие характеристики, как «высокая и низкая активность субъектов инновационной деятельности», а также «высокая и низкая активность потребителей продуктов инновационной деятельности».

Во-вторых, анализ с применением предложенных подходов может вывести инновационно-ориентированную экономику на новый вектор развития – создание социально-ориентированной экономики, повышение социальной ответственности бизнеса. В настоящее время среди европейских социал-демократов популярен термин «социально-ориентированная рыночная экономика». Двести лет прошло с того времени, когда жил и творил французский ученый, мыслитель Ш. Фурье. Одна из его идей стала сегодня особенно актуальна: на смену рыночному анархическому хозяйству неминуемо придет «строй социального гарантирования» или «строй социального гарантизма» [1].

Социализация бизнеса является одной из главных тенденций современного социально-экономического развития. Международная конференция по устойчивому развитию, состоявшаяся в 1992 г. в Рио-де-Жанейро, стала поворотным пунктом, зафиксировавшим новые требования со стороны мирового сообщества к корпорациям по повышению их социаль-

ной ответственности [2]. Рост внимания к развитию социальных функций предпринимательского сообщества привел к пересмотру традиционных взглядов на управление социально-трудовой сферой и на роль субъектов рынка труда в ее рамках. В частности, уже сегодня в политической и научной среде сформировалось мнение о том, что бизнес должен стать равноправным участником социального развития.

В-третьих, в рамках инновационного управления предприятием появляется возможность реализовать политику ориентации на потребителя. Остановимся на этом положении более подробно.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения значения инноваций для повышения конкурентоспособности предприятия. В связи со стратегической направленностью инновационного менеджмента в будущем будут интенсивно обсуждаться такие вопросы, как «технологический толчок» (*technology push*) и «рыночная тяга» (*market pull*). Идея (концепция нового продукта) – это способность приносить доходы в будущем. На этой стадии необходимо определить сложившуюся инновационную ситуацию. Например, если при принятии решения об освоении инновации отталкиваются от факта наличия научно-технического задела, делая акцент не на выявленном спросе, а на формировании нового рынка, то ситуация определяется как «технологический толчок» (*technology push*). Такая ситуация вызывается поисковыми и фундаментальными исследованиями, причём в этом случае внешняя среда во внимание не принимается. В противовес этой ситуации другая получила название «рыночная тяга» (*market pull*) – инициатор опирается на выявленный спрос (имеющийся или прогнозируемый), что характеризуется стабильным течением. Технологический толчок для инноваций может происходить либо потребителями, либо технологиями. В то время как технологические инновации базируются на абсолютно автономном технологическом развитии предприятия, потребности покупателей при рыночных инновациях в первую очередь представляют исходный пункт развития нового предложения. Таким образом, открытым остается вопрос о том, какое из этих двух принципиально различающихся направлений является для предприятия наиболее привлекательным.

Принимая во внимание чисто технологический и соответственно продуктовый тип действий в рамках инновационного менеджмента как типичные рассматриваются следующие проблемы:

- внедрение предложений (продуктов), которые по своим свойствам не соответствуют потребностям покупателей;
- внедрение продуктов, которые не сочетаются с конкурентной ситуацией, складывающейся на рынке;
- ошибочное позиционирование, в результате которого обращение минует целевую аудиторию;
- неверная концепция маркетинга, результатом которой является невозможность эффективно способствовать преимуществам предложения (продукта) на рынке.

В то время как односторонняя ориентация на технологические факторы означает опасность, что предложение не соответствует рыночным требованиям, при сильной рыночной ориентации необходимо оградить организацию от контрпроизводительных эффектов.

Многие авторы указывают на то, что первоначально клиенты ориентируются на существующие предложения, и по всем правилам критически обсуждают инновации с неизвестными до сих пор качествами. Скорее всего, односторонняя ориентация на потребителя ведёт в этом отношении к ухудшению функционирования предприятия.

Необходимо также отметить, что возможные недовольства клиентов не должны давать сигнал организации к принятию поспешных выводов. Таким образом, интуиция инновационных менеджеров относительно существования рынка нового продукта основывается на обширном понимании клиентов, их скрытых потребностей изменяющимся требованиям и недовольством к современным альтернативным предложениям (продуктам).

Ввиду настоящих проблем односторонняя клиентская и технологическая ориентация

находятся рядом, поэтому оба направления можно интерпретировать не как конкурирующие, а как дополнительные элементы, обещающие успех инновационному менеджеру, т.е. преследование уравновешенной инновационной стратегии, которая охватывает ориентацию как на исследования и разработки, так и на рынок, обещает наибольший успех инновационному предприятию.

Следовательно, инновации воплощают синтез известного требования по решению новой проблемы, с одной стороны, а также возможность располагать новой технологической концепцией для решения данной проблемы, с другой.

Для достижения большего экономического успеха инновационная организация должна проводить радикальные перемены сознания потребителя на рынке несмотря на степень технологической новизны. Здесь, в первую очередь, нужно достаточно подробно рассмотреть информационную задачу предприятия, которая основывается на правилах маркетинга. В общем можно сформулировать, что успех инновационного предложения (продукта) зависит в большей степени от того, будет ли найдена предприятием адекватная маркетинговая концепция, которая достоверно и эффективно способствует преимуществу предложения (продукта) на рынке.

Это имеет значение в том случае, когда предложение располагает серьёзными преимуществами и многие сотрудники предприятия имеют представление о значимости данного товара. Следует отметить, что данная концепция мало способствует успеху предприятия, если предложение не соответствует требованиям рынка. Кроме того, требования клиентов также должны учитываться на раннем сроке инновационного процесса. Таким образом, рыночная ориентация в рамках инновационного управления предприятием меньше нацелена на поиск реализации инновационного предложения, чем на гарантию общей важности инноваций с рыночной точки зрения.

Так как клиенты в большинстве случаев не имеют возможности высказать свое мнение, соответственно их потребности не могут трактоваться однозначно, то существует принципиальная ненадёжность относительно реакции потребителя на инновационное предложение со стороны организации. В этом отношении кажется рациональным не только учитывать мнение и результаты инициативы потребителей вначале, а также на различных фазах процесса разработки нового продукта.

Поэтому, центральная проблема – ориентация на клиента – состоит в том, чтобы охватить потребности потребителей, причём, прежде всего, скрытые потребности. Однако даже если их учёт принимается как принципиально возможный, часто перевод потребностей в техническую спецификацию оказывается чрезвычайно трудным.

Это имеет значение, прежде всего тогда, когда потребности относятся не к материально-технической основной пользе, а скорее к эмоционально-психологической дополнительной пользе. Например, при решении о покупке центральную роль играют не фактические свойства предложения (продукта), а субъективно воспринятая покупателями польза. Тем не менее, между свойствами предложения (продукта) и субъективно воспринятой пользой никакой однозначно специфицируемой связи не существует. Поэтому решения о конкретной специфике продукта (предложения) всегда обременены значительной ненадежностью.

Попытки приобщить эмоционально-психологические потребности к рассмотрению поставленного вопроса оказываются весьма трудными, поскольку, с одной стороны, их нужно регистрировать, а с другой стороны, что существенно тяжелее с точки зрения их оценивания, потребности могут подлежать в течение времени значительным изменениям.

Библиографический список

1. Дзарасов, С.С. Судьба политической экономии и ее советского классика / С.С. Дзарасов, С.М.Меньшиков, Г.Х. Попов. – М.: Издательство «Альпина Бизнес Букс», 2004. – 454 с.
2. Корпоративная социальная ответственность: управленческий аспект: монография / под общ. ред. И.Ю. Беляевой, М.А. Эскиндарова. – М.: КНОРУС, 2012. – 367 с.

3. Туркин, С. Зачем бизнесу социальная ответственность // Управление компанией. 2012. № 7. С. 50–53.
4. Философия экономической науки: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 384 с.
5. Яшин, С.Н. Анализ эффективности инновационной деятельности / С.Н. Яшин, Е.В. Кошелев, С.А. Макаров. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 288 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.12.2014*

M.D. Krokhonyatkin

**SOCIO-ECONOMIC INTERACTION
IN THE FRAMEWORK OF THE INNOVATIVE ECONOMY**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The article considers the theoretical aspects of innovation management associated with the interaction of subjects and objects of innovation. Proposed and given the General characteristics of the four options for different ratios of interaction between the subjects and objects of innovation. Practical application of the proposed approach to the analysis of trends in socio-economic relations allows to develop a system of quantitative and qualitative indicators and criteria for evaluating the effectiveness of innovation management. The opportunity to structure, detail and content to fill characteristics such as high and low activity of subjects of innovative activity", and "high and low involvement consumers of products of innovative activity".

Key words: innovation management, innovation, knowledge economy, objects and subjects of innovative activity, innovative economy social responsibility, socialization business.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.768

А.А. Грязев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ¹ МИКРОДАТЧИКА

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

Рассмотрено моделирование схемы емкостного преобразователя перемещений с целью анализа её работы. Даны рекомендации по выбору некоторых параметров, влияющих на выходной сигнал.

Ключевые слова: моделирование, емкостной преобразователь перемещений, микромеханические датчики.

В настоящее время накоплен большой опыт в разработке и применении схемотехнических решений для выработки сигналов микромеханических датчиков. Существенным препятствием на этом пути являются крайне малые размеры первичных преобразователей. Наиболее простые и технологичные емкостные преобразователи, вследствие малости размеров, обладают небольшой емкостью, что усложняет измерение.

Моделирование синтезированных схем позволяет, при небольших затратах времени (в сравнении с изготовлением и испытаниями макета), проанализировать их работу, найти основные влияющие параметры и подобрать оптимальные значения для них.

1. Описание работы схемы

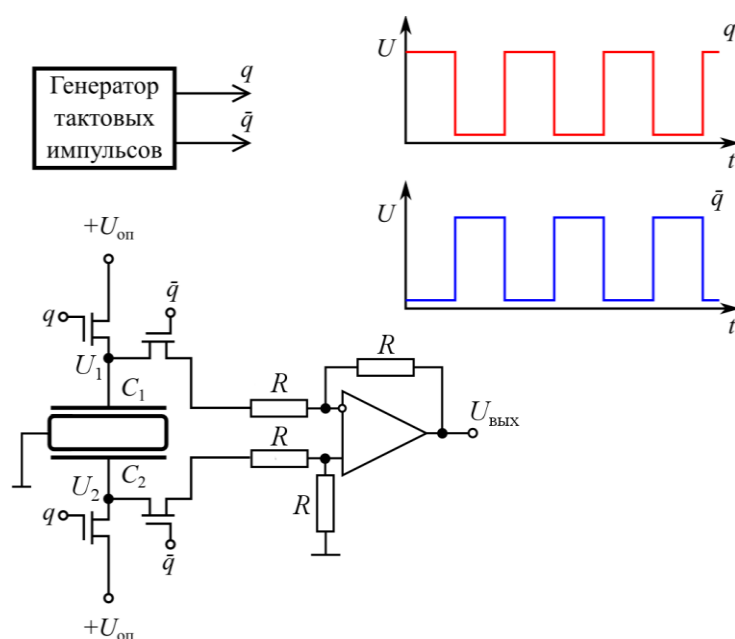


Рис. 1. К описанию принципа работы преобразователя

¹ Автор признателен А.Н. Долгову за ценное обсуждение содержания статьи.
© Грязев А.А., 2015.

В работе [1] был приведён синтез схемы ёмкостного преобразователя перемещений для микромеханических датчиков. Работа данной схемы (рис. 1) основывается на измерении разности величин измерительных емкостей C_1 и C_2 , зависящих от изменения зазора между электродами:

$$C_i = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{h_0 \pm \Delta h},$$

где C_i – емкость i -го конденсатора; ε – диэлектрическая проницаемость среды; ε_0 – диэлектрическая постоянная; S – площадь обкладок; h_0 – начальный зазор между обкладками емкостного датчика; Δh – изменение зазора при перемещении центральной обкладки.

Величина разности измерительных ёмкостей в этом случае составит:

$$\Delta C = C_1 - C_2 = \varepsilon\varepsilon_0 S \frac{2\Delta h}{h_0^2 - \Delta h^2}.$$

При этом на выходе электрометрического вычитателя имеем сигнал, изображенный на рис. 2 и описываемый следующим выражением:

$$U_{\text{раз}}(t) = U_{\text{он}} \left(e^{-\frac{t}{RC_1}} - e^{-\frac{t}{RC_2}} \right),$$

величина максимума (минимума для «отрицательного» положения подвижного электрода) которого зависит от разности измерительных емкостей. Следует отметить, что время наблюдения максимума (минимума) зависит от значений сопротивлений R , через которые идёт разряд измерительных конденсаторов C_1 и C_2 на входы вычитателя, и их суммарной ёмкости $C_1 + C_2$, но не зависит от их разности.

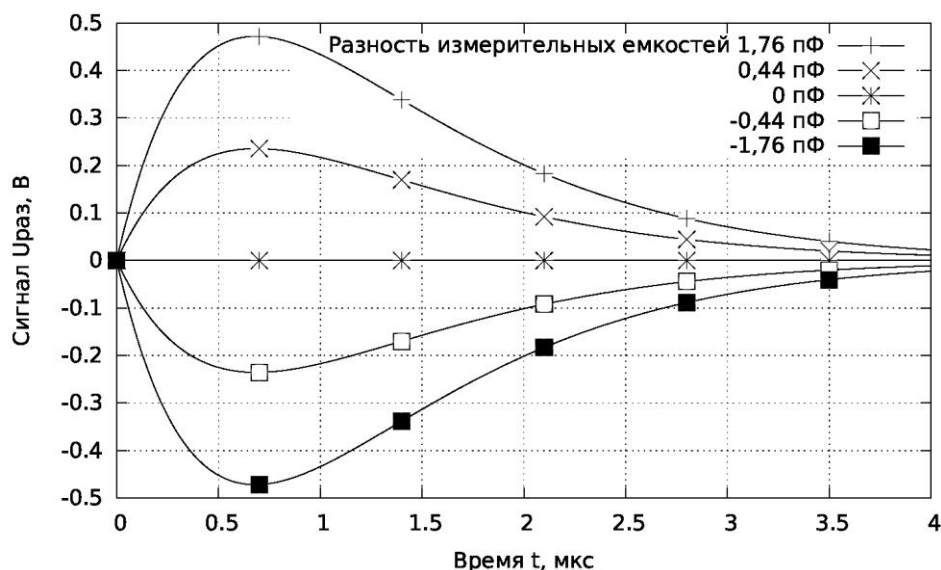


Рис. 2. Теоретический сигнал на выходе электрометрического вычитателя при номинале сопротивления $R = 100$ кОм

Выходной сигнал данного преобразователя описывается следующим выражением:

$$U_{\text{вых}}(\Delta C) = U_{\text{он}} \frac{\Delta C}{C_1} \left(\frac{C_1}{C_2} \right)^{\frac{C_2}{\Delta C}}.$$

2. Моделирование преобразователя

Моделирование работы схемы проводится в программе NGSPICE, часто используемой при разработке интегральных схем и печатных плат для анализа их поведения.

В качестве электрометрического вычитателя используется обычный дифференциальный усилитель, построенный на макромоделе операционного усилителя общего назначения LM358 [2], уменьшающей время моделирования без потери точности. В связи с тем, что зависимость выходного сигнала от перемещения центрального электрода имеет нелинейность (около одного процента при перемещении электрода на 10% от величины начального зазора), для уменьшения нелинейности применим в датчике силовую компенсацию, в этом случае изменение емкостей составит не более одного процента от номинального значения.

При моделировании рассмотрим изменение выходного сигнала в зависимости от разности измерительных емкостей, а также влияние величины сопротивления резисторов R (на входах дифференциального усилителя) на выходной сигнал.

Преобразователь перемещений разрабатывается для уже существующего макета интегрального датчика линейных ускорений, ёмкость каждого из измерительных конденсаторов которого известна и составляет 6,88 пФ. Полоса пропускания частот синусоидального сигнала с единичным усилением применённого усилителя 1 МГц [3]. При таком малом значении емкостей, и для того, чтобы не происходило их разряда для усилителя мгновенно, необходимо задать значение сопротивления R порядка сотен килоом. В таком случае время разряда измерительного конденсатора до одного процента составит:

$$t_{\text{раз}} = 5RC = 3,44\text{м},44.$$

Время заряда от источника опорного напряжения ничтожно мало в сравнении со временем разряда, так как сопротивление ключей составляет несколько десятков Ом. С учётом изложенного, зададим период колебаний генератора тактовых импульсов в шесть микросекунд.

Далее приведено описание схемы в программе NGSPICE. Отметим, что схема генератора тактовых импульсов здесь не представлена — вместо этого заданы импульсные сигналы Vtg1 и Vtg2.

* Component Definitions

C1 2 0 6.88p *Величины измерительных

C2 3 0 6.88p *ёмкостей

R1 5 7 100K

R2 6 8 100K

R3 7 0 100K

R4 8 9 100K

S1 1 2 11 0 switch1 OFF

S2 1 3 11 0 switch1 OFF

S3 2 5 22 0 switch1 ON

S4 3 6 22 0 switch1 ON

Vop 1 0 DC 5

Vpm vm 0 DC -5V

Vpp vp 0 DC 5V

*Сигнал на выходе генератора тактовых импульсов

Vtg1 11 0 dc=0 pulse(0 5 0 10p 10p 2.4u 6u)

Vtg2 22 0 dc=0 pulse(0 5 2.4u 10p 10p 3.6u 6u)

XU1 7 8 9 vp vm T4221

.model switch1 sw vt=4.5 ron=80 roff=1T

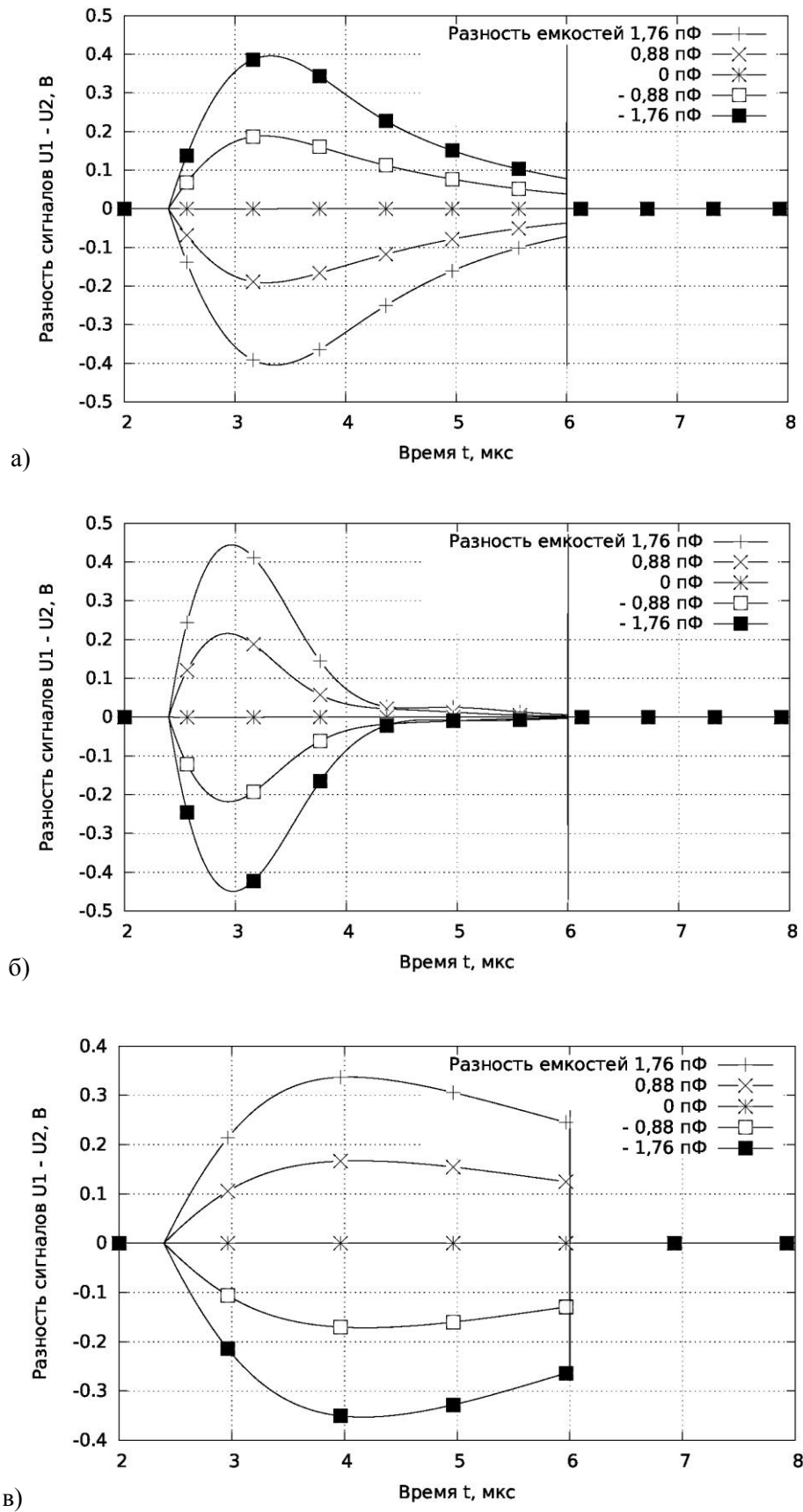


Рис. 3. Результат моделирования, разность напряжений на измерительных конденсаторах при сопротивлении:
 а – $R = 100$ кОм; б – $R = 50$ кОм; в – $R = 200$ кОм

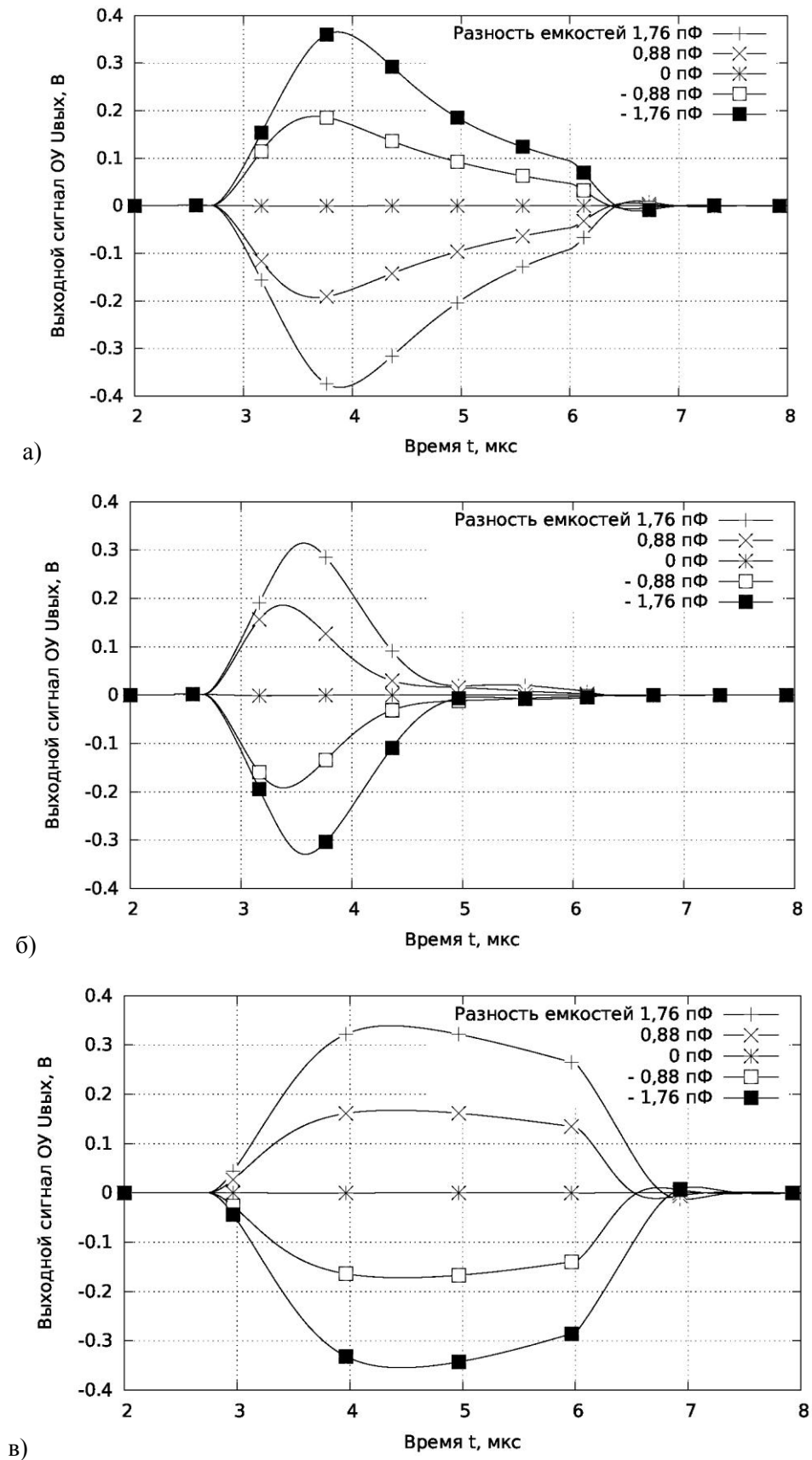


Рис. 4. Результат моделирования, выходной сигнал дифференциального усилителя при величине сопротивления:
 $a - R = 100 \text{ кОм}$; $б - R = 50 \text{ кОм}$; $в - R = 200 \text{ кОм}$

3. Результаты моделирования

Результаты анализа работы схемы отражаются графиками (рис. 3 и 4). На рис. 3 представлена разность напряжений разряда $U_1(t) - U_2(t)$ измерительных емкостей. Они совпадают с результатами теоретических расчетов (рис. 2). Однако следует отметить, что величина сопротивления R влияет на максимум и, чем она меньше, тем выше наблюдаемый пик. Так, при сопротивлении R , равном пятидесяти килоомам, значение пика для максимальной исследуемой разности емкостей равно 444 мВ. Для R номиналом в сто и двести килоом величина пиков составила 395 и 337 мВ соответственно.

На рис. 4 представлены графики сигнала, получаемого на выходе дифференциального усилителя. На них видно, что усилитель не обеспечивает достаточную скорость усиления входного сигнала, и при значении R 50 кОм пик уменьшен усилителем на 29 % и составляет 314 мВ. В случае применения сопротивления в 100 кОм сигнал ослабляется на 7,6 % и составляет 365 мВ. Однако следует отметить, что при применении сопротивления R номиналом 200 кОм происходит незначительное усиление амплитуды пика – всего лишь на 0,5 %, и составляет 339 мВ.

Заключение

Результаты моделирования (рис. 3) совпадают с результатами теоретических расчетов (рис. 2). Вследствие неидеальности используемого операционного усилителя, полученный сигнал ослаблен по сравнению с исходным, кроме случая использования сопротивлений номиналом в 200 кОм. Данный недостаток возможно устранить использованием операционных усилителей с большей полосой пропускания частот; а также необходим оптимальный выбор номиналов сопротивлений для обеспечения максимально возможной крутизны статической характеристики.

Библиографический список

1. Грязев, А.А. Емкостной преобразователь микромеханических датчиков // Приволжский научный вестник. 2014. № 12 (3).
2. Лозицкий, С. Эволюция SPICE-совместимых макромоделей операционных усилителей: Ч. 1 // Современная электроника, 2009. №4. С. 58–67.
3. Texas Instruments, LMX58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf> (дата обращения 20.11.2013)

Дата поступления
в редакцию 28.01.2015

A. A. GRYAZEV

MODELLING THE DISPLACEMENT CONVERTOR OF MICROSENSOR

Arzamasskiy pollytechnic institute (branch) NGTU n.a. R.E. Alexeev

Purpose Research and analysis of the capacitive displacement convertor.

Design/methodology/approach The article in question dwells on analyzing the work of the capacitive displacement converter. In order to carry out the analysis the circuit of the modelling of the capacitive displacement converter is analyzed. The mixed-level and mixed-signal circuit simulator ngspice was used as a tool of modelling.

Findings The result of the modelling are presented graphically. The diagram contains the signals which occur at the leaving the differential amplifier and the difference between the discharge voltage of measuring capacitors.

Research limitations/implications The use of the circuit simulator for research and analysis produces a result which completely coincides with the theoretical calculations.

Originality/value After analyzing the results of the modelling of the displacement convertor the recommendations for the selection of its preferable characteristics were established.

Key words: modelling, capacitive displacement convertor, micromechanical sensors.

УДК 681.2; 681.51

Р.А. Денисов¹, В.И. Обухов²**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА НА ЕГО МАСШТАБНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ**ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро»¹,
Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева²

Предмет, тема, цель работы: проведение анализа принципов работы твердотельных волновых гироскопов (ТВГ), состояния их производства, их точностных возможностей, выявление возможностей повышения их точности с целью использования в системах ориентации и навигации летательных аппаратов.

Методология проведения работы: проведены исследования технических характеристик промышленно выпускаемых ТВГ отечественными и зарубежными предприятиями и анализ их погрешностей.

Результаты: выработаны рекомендации по увеличению масштабного коэффициента ТВГ.

Значение исследования: состоит в возможности применения предложений авторов при проектировании ТВГ, пригодных для систем ориентации и навигации летательных аппаратов.

Новизна/ценность: состоит в повышении точности ТВГ за счет увеличения значения масштабного коэффициента.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, навигационный гироскоп, чувствительность, масштабный коэффициент, технические характеристики.

Введение

Одним из перспективных направлений в развитии гироскопии считаются твердотельные волновые гироскопы (ТВГ). Принцип работы ТВГ и математический аппарат подробно описаны [1-3]. Источником инерциальной информации является стоячая волна упругих колебаний. При этом измерения производятся в режиме свободных колебаний чувствительного элемента (ЧЭ). Вращение основания, на котором установлен ЧЭ, вызывает поворот волны на меньший, но известный, угол, т.е. упругая волна, как целое, прецессирует [1]. Точность вычисления угла поворота (угловой скорости) зависит от точности масштабного коэффициента ТВГ, который в свою очередь определяется конструктивными характеристиками ЧЭ: геометрическими параметрами, используемым материалом.

Целью работы является исследование влияния геометрических параметров ЧЭ на изменение масштабного коэффициента ТВГ.

Анализ масштабного коэффициента ТВГ

Конструкция ЧЭ может быть реализована в виде осесимметричного тела, имеющего форму полусферы, цилиндра, кольца, диска, полутороида, сферы и др. Для ЧЭ, выполняемых в виде полусферы, чаще всего в качестве конструктивного материала применяется кварцевое стекло, обладающее высокими термостабильными упругими свойствами, либо сапфир - неметаллический материал с высокой добротностью. Для изготовления цилиндрических ЧЭ используются металлические сплавы, чаще всего прецизионные, с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Такие сплавы обладают стабильными упруго-пластичными свойствами и не склонны к накоплению внутренних напряжений, обладают хорошими технологическими свойствами. Для колец и дисков в основном используется полупроводниковый кремний.

При изготовлении цилиндрических ЧЭ механические и геометрические параметры (соосность, округлость, различные дислокации кристаллической решетки) могут иметь

большие разбросы. Это приводит к зависимости поведения стоячей волны от ее ориентации в ЧЭ. Данный эффект, называемый динамической неоднородностью ЧЭ, способствует распаду волновой картины и, как следствие, увеличению погрешности измерения датчика в целом [4]. Для уменьшения влияния технологических дефектов, возникающих при изготовлении ЧЭ, используют различные способы балансировки: формируют зубцы, круглые отверстия в основании и утолщения в теле его конструкции (см. рис. 1).

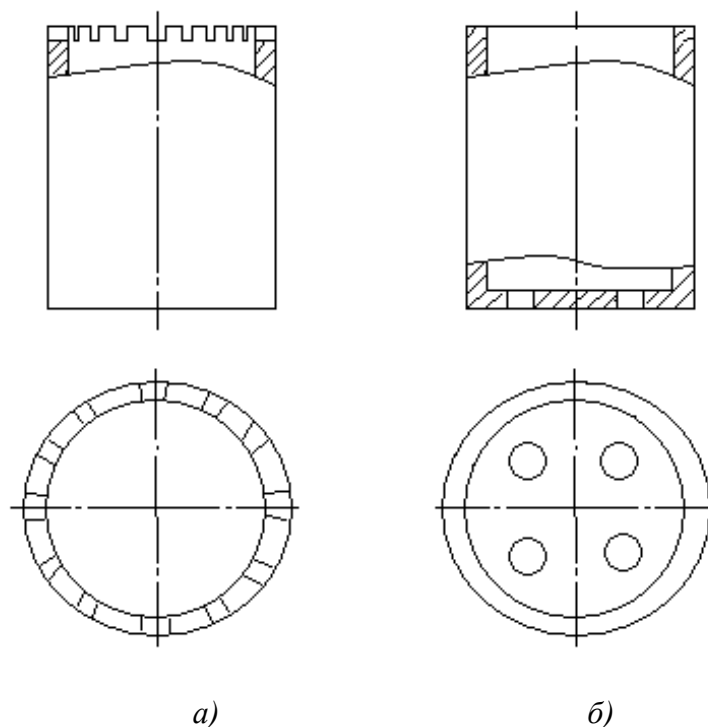


Рис. 1. Возможные варианты конструктивного исполнения ЧЭ:

a – с зубцами по верхнему торцу;

б – с цилиндрическими отверстиями в основании

Применение конкретной конструкции ЧЭ ТВГ с учетом его геометрических характеристик, используемого материала и способа балансировки определяется требованиями к тактико-техническим характеристикам датчика, степенью освоения технологий на предприятии-изготовителе и из экономических соображений.

Функционирование системы съема колебаний ЧЭ может быть основано на электростатическом, электромагнитном, пьезоэлектрическом и фотоэлектронном принципах. В некоторых случаях применяются комбинированные методы. Например, предварительная раскочка осуществляется электромагнитным способом, а поддержание упругой стоячей волны обеспечивается электростатическим или пьезоэлектрическим способами.

Обработка результатов и формирование управляющего и/или корректирующего воздействия осуществляются с помощью электроники обработки сигнала (предусилитель, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), микропроцессоры и др.).

При всей сложности измерительного устройства (ТВГ) следует отметить, что наиболее ответственным элементом его конструкции является ЧЭ, так как, первоначально, именно от его конструктивных параметров в большей степени зависят параметры волновой картины колебаний и, как следствие, точность измерения входного сигнала.

В настоящее время в научно-технических источниках встречается большое количество разнообразных конструкций ТВГ. Наиболее распространенными из них являются ТВГ с

ЧЭ в виде полусферы и цилиндра. Нами в настоящее время изучаются возможности использования в качестве ЧЭ цилиндрических резонаторов, как наиболее технологичных, невысоких по стоимости, способных обеспечить достаточную стабильность. В частности, исследуется влияние утолщения в теле конструкции ЧЭ.

Для достижения поставленной цели рассмотрим более подробно принцип работы ТВГ и установим основные геометрические параметры, влияющие на масштабный коэффициент цилиндрического ЧЭ.

В сечении осесимметричного ЧЭ возбуждается стоячая волна. При повороте ЧЭ вокруг входной оси с угловой скоростью Ω волновая картина отстает от ЧЭ на угол прецессии $\varphi(t)$, определяемый соотношением [2]:

$$\varphi(t) = -k \int_0^t \Omega(t) dt, \quad (1)$$

где k – масштабный коэффициент, зависящий от конструктивных параметров ЧЭ.

При рассмотрении (1) в качестве максимизируемой целевой функции выберем масштабный коэффициент гироскопа k , связывающий измеряемый угол прецессии волновой картины колебаний ЧЭ с интегралом от угловой скорости основания.

Наличие угловой скорости основания приводит к расщеплению частот колебаний ЧЭ по основной рабочей форме колебаний на две близкие частоты. Расщепление частот прямо пропорционально угловой скорости основания с коэффициентом $2k$ [1, с. 27].

Масштабный коэффициент k гироскопа для основной низкочастотной формы колебаний ЧЭ вычисляется следующим образом [1, с. 126]:

$$K = \frac{\int_0^{\alpha_1} V_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha}{2n \int_0^{\alpha_1} (U_n^2(\alpha) + V_n^2(\alpha) + W_n^2(\alpha)) d\alpha}, \quad (2)$$

где U_n, V_n, W_n – решения краевой задачи для заданной геометрии резонатора.

В случае шарнирного способа закрепления ЧЭ в форме цилиндра (цилиндрическая оболочка с нерастяжимой срединной поверхностью) в составе ТВГ, масштабный коэффициент принимает значение:

$$K = \frac{8\alpha_1^2}{20\alpha_1^2 + \pi^2}, \quad \alpha_1 = l/R. \quad (3)$$

При увеличении длины оболочки l по отношению к радиусу R масштабный коэффициент стремится к максимальному значению 0,4.

Для случая консольного закрепления рассмотрим вопрос о целесообразности создания ЧЭ с утолщением в виде кольца (см. рис. 2, а). Учитывая исходные положения теории тонких упругих оболочек, будем считать утолщение достаточно малым и не превосходящим удвоенной толщины оболочки. Утолщение в виде кольца может быть выполнено в трех вариантах, как показано на рис. 2, б, при этом отношение максимальной толщины оболочки к ее радиусу должно быть не более 1/10.

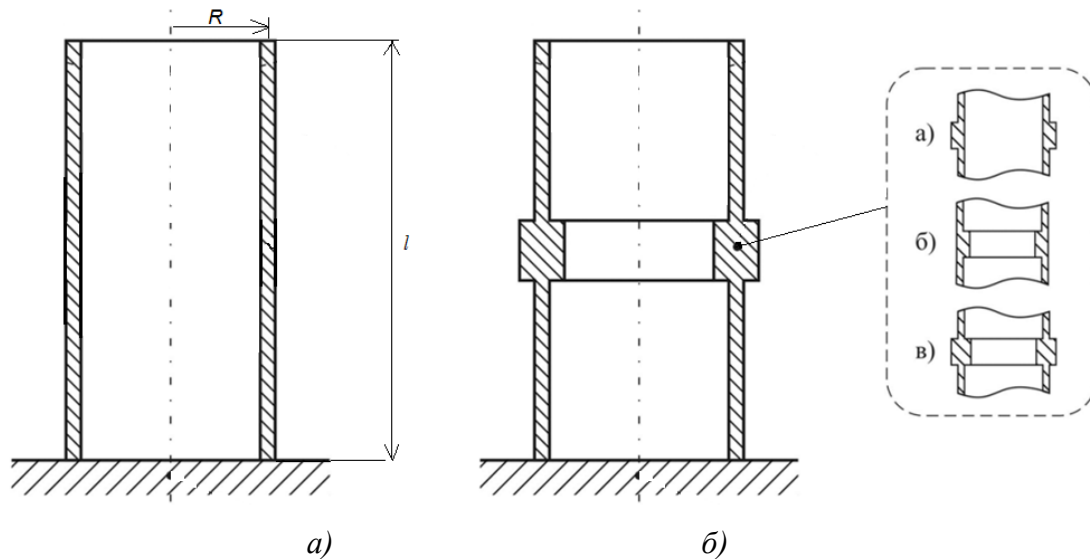


Рис. 2. Возможные варианты конструктивного исполнения ЧЭ с утолщение в виде кольца:

a – утолщение с внешней стороны; *б* – утолщение с внутренней стороны;
в – утолщение с внешней и внутренней сторон

Рассмотрим возможные вариации более подробно. Учитывая, что формы колебаний ЧЭ с постоянной толщиной известны, применим методику Бубнова-Галеркина для уточнения параметров математической модели ЧЭ – приведенной массы, жесткости и коэффициентов гироскопических сил [1]. Будем считать, что радиус срединной поверхности ЧЭ изменяется незначительно при добавлении утолщения. Величину утолщения зададим в долях от номинальной толщины ЧЭ, т.е. в виде ζh , для примера зададим величину утолщения, равную двум толщинам ЧЭ $\zeta = 2$. Высоту l_1 , на которой располагается нижний край кольцевого утолщения, будем отсчитывать от основания ЧЭ (см. рис. 3).

Таким образом, масштабный коэффициент зависит от различных вариантов геометрии и расположения дополнительного кольца (дополнительных колец) жесткости на образующей ЧЭ. Зависимость масштабного коэффициента от этих факторов может быть записана в следующем виде:

$$K = \frac{h \int_0^{l_1} V_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha + \zeta h \int_{l_1}^{l_1+l_2} V_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha + h \int_{l_1+l_2}^{\alpha_1} V_n(\alpha) W_n(\alpha) d\alpha}{2n \left(h \int_0^{l_1} I d\alpha + \zeta h \int_{l_1}^{l_1+l_2} I d\alpha + h \int_{l_1+l_2}^{\alpha_1} I d\alpha \right)}$$

где $I = U_n^2(\alpha) + V_n^2(\alpha) + W_n^2(\alpha)$

Результаты вычисления интегралов для ЧЭ, высота которого равна пяти радиусам ($\alpha_1 = 5$), отображены на рис. 4. При построении графика необходимо учитывать ограничения, накладываемые на геометрические параметры ЧЭ: $l_1 + l_2 \leq \alpha_1$.

Используя полученные аналитические зависимости масштабного коэффициента от геометрических параметров ЧЭ, определим экстремальные значения масштабного коэффициента при ограничениях: $l_1 + l_2 \leq \alpha_1$, $\zeta \leq 2$.

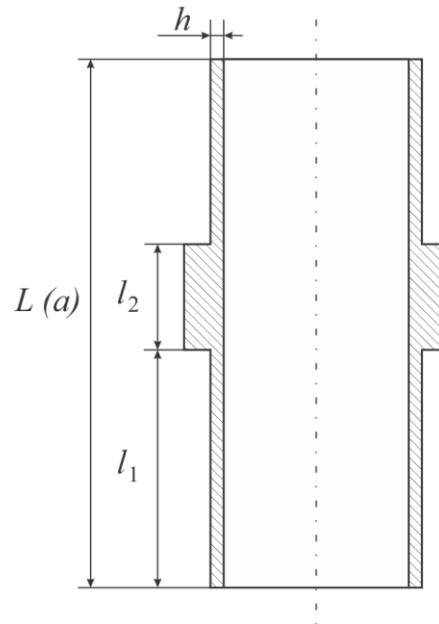


Рис. 3. Геометрические параметры ЧЭ ТВГ

Максимальное значение $K=0,398$ достигается на границе допустимой области при $l_1=3,686$ мм, $l_2=1,314$ мм, $\zeta = 2$, т.е. при максимальном утолщении, удаленном от неподвижно жестко закрепленного края ЧЭ на максимальное расстояние. Полученное решение согласуется с результатами работ [1], согласно которым, большая часть кинетической энергии ЧЭ создается вблизи его свободного края.

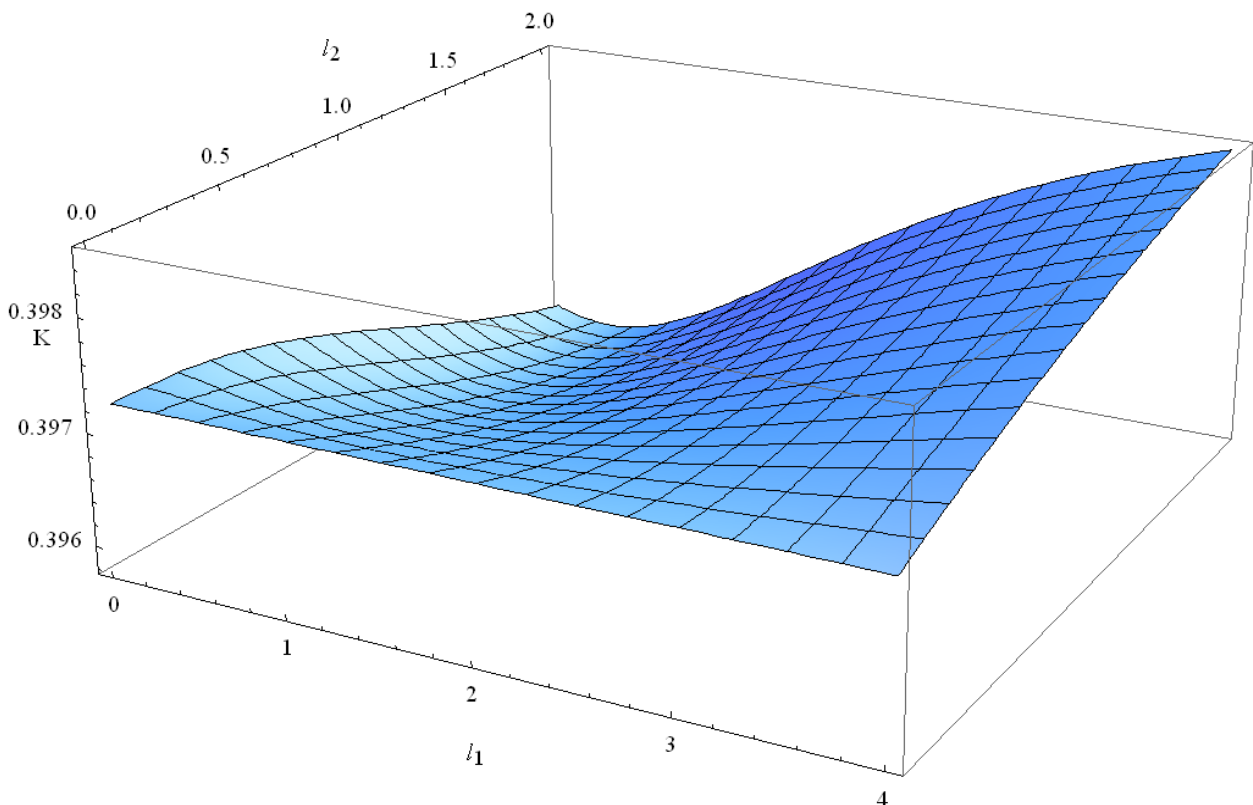


Рис. 4. Зависимость масштабного коэффициента от геометрических параметров ЧЭ

Заключение

В результате наших исследований можно сделать следующие выводы:

1) за счет конструктивного изменения ЧЭ (введение дополнительного кольца жесткости) масштабный коэффициент увеличивается на 0,58%, что существенно для гироскопов навигационного применения;

2) дополнительное утолщение ЧЭ за счет кольца увеличивает его жесткость, и соответственно, увеличивается собственная частота колебаний ЧЭ. Полученный эффект может быть использован для корректировки собственных частот работы ТВГ в составе БИНС, с целью исключения возникновения резонансных явлений.

Библиографический список

1. Меркурьев, И.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов / И.В. Меркурьев, В.В. Подалков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 228 с.
2. Матвеев, В.А. Проектирование волнового твердотельного гироскопа / В.А. Матвеев, В.И. Липатников, А.В. Алехин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 168 с.
3. Матвеев, В.А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах / В.А. Матвеев, Б.С. Лунин, М.А. Басараб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 240 с.
4. Денисов, Р.А. Неоднородность распределения массы резонатора твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) // Инновационные технологии организации обучения на пути к новому качеству образования: сб. матер. VIII Всероссийской научно-практической конференции. – М.: Изд-во СГУ, 2011. – 524 с.

Дата поступления
в редакцию 28.01.2015

R.A. Denisov¹, V.I. Obukhov²

THE STUDY BLAINE GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE SENSING ELEMENT WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE ON ITS SCALE FACTOR

LLC «Arzamas instrument-making design Bureau»¹,
Arzamasskiy polytechnic institute (branch) NGTU n.a. R.E. Alexeev²

Purpose: analysis of the principles of solid-state wave gyroscope (SWG), their production, their accuracy capabilities, identification of the main directions of improving their accuracy for use in the systems of orientation and navigation of aircraft.

Design/methodology/approach: studies of the technical characteristics of industrially produced wave solid-state gyroscopes domestic and foreign enterprises and the analysis of their errors.

Findings: made recommendations to increase the scale factor of SWG.

Research limitations/implications: consists in the possibility of applying the proposals of the authors in designing solid-state wave gyroscopes suitable for orientation and navigation of aircraft.

Originality/value: consists in increasing accuracy of SWG by increasing the scale factor.

Key words: solid-state wave gyroscope, gyroscope for navigation, sensitivity, scale factor, specifications.

УДК 681.2; 681.51

Н.Н. Желтова, В.И. Обухов

**ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ
В НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

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

Предмет, тема, цель работы: проведение анализа принципов работы, состояния производства микромеханических гироскопов, их точностных возможностей, выявление основных направлений использования микромеханических гироскопов в системах ориентации и навигации летательных аппаратов.

Методология проведения работы: проведены исследования технических характеристик промышленно-выпускаемых микрогироскопов отечественными и зарубежными предприятиями и анализ их погрешностей.

Результаты: выработаны рекомендации по повышению чувствительности микромеханических гироскопов.

Значение исследования: состоит в возможности применения предложений авторов при проектировании микромеханических гироскопов пригодных для систем ориентации и навигации летательных аппаратов.

Новизна/ценность: состоит в постановке задачи использования микромеханических гироскопов в системах ориентации и навигации летательных аппаратов с целью минимизации их массогабаритных характеристик и определения направления их модернизации для решения поставленных задач.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, навигационные системы, чувствительность, точность, технические характеристики.

Введение

Инерциальные навигационные системы (ИНС), чувствительные элементы которых, измеряя приращения углов и линейной скорости, позволяют определить все параметры ориентации и навигации. Навигационные системы используются на подвижных объектах, в частности, на летательных аппаратах (ЛА), которые во многом определяются совершенством акселерометров, гироскопических датчиков первичной информации. В настоящее время существует большое многообразие различных типов гироскопов, которые обеспечивают необходимые эксплуатационные характеристики ЛА.

Каждому типу гироскопа можно найти оптимальную нишу применения. При их выборе учитываются следующие основные характеристики: точность, надежность работы, энергопотребление, габаритные размеры и стоимость. В зависимости от требований, предъявляемых к системам управления и навигационным системам, выбирается соответствующий тип гироскопического датчика.

Постановка задачи

Одними из наиболее применяемых систем ориентации и управления в различных областях техники являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), которые имеют малые размеры, массу и энергопотребление. Использование микромеханических гироскопов дает возможность создавать миниатюрные БИНС.

В настоящее время большое количество современных высокоточных навигационных систем используют данные спутниковой системы GPS. Тем не менее, имеется опасность выхода спутниковой системы из строя, что приведет к нарушению работы навигационных систем. Поэтому уделяется серьезное внимание разработкам, не зависящим от спутниковой системы [2].

Из всего многообразия гироскопов можно выделить наиболее перспективные: лазерные гироскопы (ЛГ), волоконно-оптические (ВОГ), волновые твердотельные (ВТГ) и микромеханические гироскопы (ММГ).

Основным их преимуществом является повышенная надежность работы из-за отсутствия быстро вращающихся роторов и карданных подвесов, минимальное потребление электроэнергии за счет реализации основных функциональных узлов на базе сервисной микроэлектроники и возможность повышения точностных характеристик путем математической обработки первичных сигналов датчиков в микропроцессорах [1].

Тем не менее, современная российская база ММГ на данный момент уступает по основным техническим характеристикам импортным образцам. Поэтому российские БИНС имеют худшие массогабаритные характеристики по сравнению с западными аналогами, а также высокую стоимость [2].

Таким образом, задача создания БИНС на микромеханических элементах и разработка ММГ в России является важной.

Однако все отечественные и зарубежные ММГ все еще отстают по точности и шумовым характеристикам традиционным гироскопам. Следовательно, актуальной является задача исследования и разработка путей улучшения точностных характеристик МГ.

Технические характеристики

Разработку ММГ ведут ряд ведущих зарубежных фирм. В США это корпорации Analog Devices, Boeing North American, Rockwell International Corporation, Northrop Grumman Corporation, Litton Systems и Motorola. Фирмами, специализирующимися на создании навигационных систем на основе микромеханических датчиков и приборов, являются Integrated Micro Instruments и Charles Stark Draper Laboratory. В Японии разработкой микромеханических устройств занимаются корпорации: Murata Manufacturing, Fujitsu, Nippon Soken, Toyota, Matsushita Electric Industrial. В Великобритании ведущей корпорацией по микродатчикам является British Aerospace, в Южной Корее - корпорация Samsung, в Германии - корпорации Robert Bosch и Siemens, во Франции - корпорация SAGEM. В России проектированием и изготовлением ММГ занимаются в ЦНИИ «Электроприбор», Раменском проектно-конструкторском бюро (РПКБ), НИИ "Полюс", НИИ "Астрофизика", ЗАО «Гирооптика», в Санкт-Петербургском государственном университете аэрокосмического приборостроения (СПб ГУАП), Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПб ГПУ), Московском государственном институте электронной техники (МИЭТ), Таганрогском государственном радиотехническом университете (ТРТУ) и других [3].

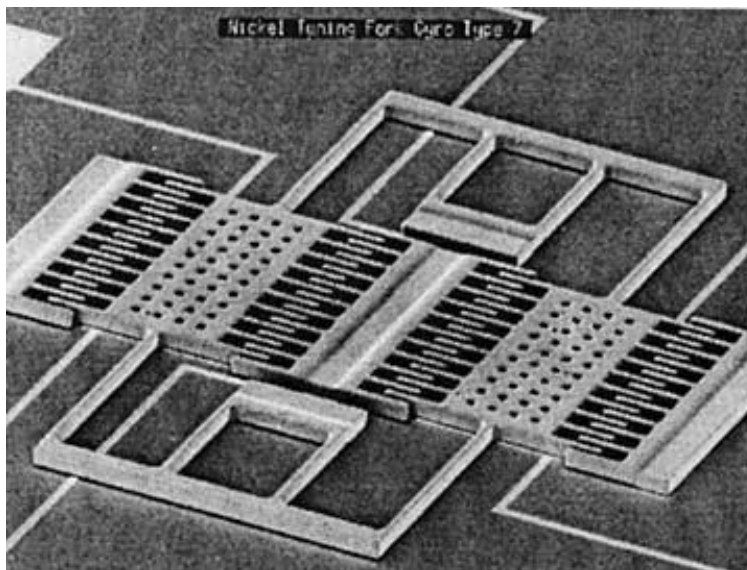


Рис. 1. Микроструктура LR-гироскопа Draper Laboratory

Каждая отдельная фирма-производитель создает и использует собственную концепцию производства МЭМС. Переход от классических схем с вращающимся ротором позволяет устранить из схемы измерительных устройств подвижные узлы, обладающие наименьшей надежностью. Упрощение конструкции обеспечивает полную ее совместимость с технологиями микроэлектроники [3].

На рис. 1 представлен один из первых ММГ *LR*-типа, спроектированный компанией *Draper Laboratory* [4].

ЧЭ ММГ состоит из двух инерционных масс (ИМ). Эти ИМ прикреплены упругими элементами подвеса к анкерам, в свою очередь крепящимся к подложке. На ней размещены статоры электростатических гребенчатых датчиков силы (ДС) и неподвижные электроды емкостных датчиков положения (ДП). Подвижные электроды ДП располагаются на ЧЭ. ИМ противофазно линейно колеблются вдоль ее плоскости. При возникновении угловой скорости Ω перпендикулярно плоскости ИМ на нее будут действовать Кориолисовы силы. Вызываемые данными силами угловые колебания рамки и ИМ измеряются емкостными ДП [4].

Все разнообразие ММГ подразделяются на *LL* -, *LR* - и *RR* – типа: в зависимости от характера движения ИМ. В ММГ *LL* – типа ИМ совершает плоскопараллельное движение, в *LR* – типа плоскопараллельное и угловое движения и в *RR* – типа – угловые движения. ММГ *RR* – типа имеют ИМ в виде круглого диска, который совершает крутильные колебания вокруг своей оси симметрии, в результате, при наличии угловой скорости возникают Кориолисовы силы, вызывающие крутильные колебания относительно оси, перпендикулярной основному движению ИМ.

Для сравнения технических характеристик ММГ различных типов в табл. 1 приведены технические характеристики ММГ *LL* – и *LR* – типа, а в табл. 2 – *RR* – типа.

Таблица 1

Технические характеристики гироскопа ADXRS

Марка	ADXRS150	ADXRS300	ADXR16100
Рабочий диапазон скорости вращения, град/с	150	300	300
Чувствительность, мВ/град/с	12,5±10%	5,08%	4,1LSB ⁰ /с
Полоса частот, кГц	0-2	0-2	0-2
Плотность шума, град/с/√Гц	0,05	0,10	0,10
Нелинейность, % от всей шкалы	0,1	0,1	0,15
Напряжение питания, В	4,75-5,25	4,75-5,25	4,75-5,25
Потребляемый ток, мА	6	6	8
Рабочий температурный диапазон, °С	-40...85	-40...85	-40...85
Цена, \$	30	30	41

Таблица 2

Технические характеристики ММГ-2, разработанного в ЦНИИ «Электроприбор»

Количество осей	1
Диапазон измерения	$\pm 150^{\circ}/с$
Нелинейность градуировочной характеристики (в диапазоне)	<1 %
Нестабильность коэффициента преобразования	<1 %
Плотность мощности шума (при цифровой передаче данных)	<0,05 ⁰ /с/ Гц
Полоса пропускания	40 Гц
Диапазон рабочих температур	-40...+600 С
Напряжение питания, однополярное	+5 В
Потребляемая мощность	<1 Вт
Время готовности	<5 с
Масса	<50 г
Габаритные размеры	50x18x50 мм
Интерфейсы передачи данных: аналоговый	0...2,5 В
цифровой	RS-232, CAN

Выводы

Известно, что ММГ, в отличие от лазерных гироскопов или ВОГ, имеют не высокую точность.

При рассмотрении разных конструкций ММГ можно выделить их существенные недостатки:

1) чрезмерная минимизация размеров датчиков приводит к значительной потере их чувствительности к входному воздействию, повышению влияния помех, к уменьшению точности измерения;

2) применение электростатических преобразователей силы, которые имеют небольшие силовые характеристики, как правило, требуют обязательного использования резонансного режима работы ММГ;

3) нелинейность характеристик преобразования, которые имеют емкостные датчики положения, требует подключение дополнительных корректирующих устройств линеаризации их характеристик.

Улучшение технических характеристик ММГ позволит создавать ИНС с уменьшенными массогабаритными характеристиками, с автономной и более точной организацией получения полезных сигналов управления подвижными объектами. Обеспечение этой задачи - поиск новых проектных и конструктивных решений ММГ с улучшенными точностными характеристиками. Одно из таких направлений мы видим в повышении чувствительности ММГ к входному сигналу и его стабильность.

В настоящее время мы ставим перед собой задачу провести исследование новых конструкторских и технологических решений по созданию микромеханических структур с необходимыми размерами и системой съема показаний, которая фиксирует перемещения ЧЭ на уровне микрометров.

Библиографический список

1. Бесплатформенные системы ориентации и навигации на микромеханических чувствительных элементах / В.Я. Распопов, В.В. Матвеев [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mr.rtc.ru/doc/report/doc22.pdf>
2. **Иванов, Ю.В.** Анализ возможностей применения микромеханических датчиков для построения систем ориентации аэростатов / Ю.В. Иванов, В.А. Орлов // Известия ТулГУ. Сер. Проблемы специального машиностроения. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. Вып. 8. С. 211–215.

3. **Тыртычный, А. А.** Анализ характеристик компенсирующих преобразователей микромеханических инерциальных датчиков / А.А. Тыртычный, А.А. Скалон // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 21–23.
4. **Тыртычный, А. А.** Инерциальные чувствительные элементы на основе МЭМС-технологий // Шестдесят первая студенческая научно-техническая конференция ГУАП: сб. докл.: в 2 ч. Ч. 1. Технические науки / СПбГУАП. – СПб., 2008. С. 44–48.
5. **Шахнович, И.** МЭМС-гироскопы – единство выбора // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 1. С. 76–85.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2015*

N. N. Zheltova, V.I. Obuchov

THE APPLICATION OF MICROMECHANICAL GYROSCOPES FOR NAVIGATION SYSTEMS

Arzamasskiy polytechnic institute (branch) NGTU n.a. R.E. Alexeev

Purpose: the analysis of the principles of operation, production of micromechanical gyroscopes, their accuracy capabilities, identification of the main directions of the use of micromechanical gyroscopes in systems of orientation and navigation of aircraft.

Design/methodology/approach: studies of the technical characteristics of industrially produced microgyroscopes domestic and foreign enterprises and the analysis of their errors.

Findings: recommendations for improving the sensitivity of a micromechanical gyroscopes.

Research limitations/implications: consists in the possibility of applying the proposals of the authors in the design of micromechanical gyroscopes suitable for systems of orientation and navigation of aircraft.

Originality/value: formulation of the problem is the use of micromechanical gyroscopes systems orientation and navigation of aircraft in order to minimize their weight and size characteristics and determine the direction of their modernization for the task.

Key words: micromechanical gyroscope, navigation system, sensitivity, precision, technical specifications.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 577.113.3:51-76

А.Н. Мошкова¹, Е.И. Ерлыкина², Е.М. Хватова², Н.П. Тежикова¹

ИСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОДЕРЖАНИЯ АДЕНИНОВЫХ НУКЛЕОТИДОВ В УСЛОВИЯХ ОСТРОГО КИСЛОРОДНОГО ГОЛОДАНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородская государственная медицинская академия Минздрава России²

Цель работы: Анализ экспериментальных концентраций аденозинтрифосфата (АТФ), аденозинмонофосфата (АМФ) и интегрального коэффициента $K = [АТФ]/[АМФ]$ в ткани мозга интактных животных и в условиях нарушения кислородного режима методами математического анализа. Выявление некоторой закономерности в характере их изменения под влиянием гипоксии для оценки и прогнозирования направленности обменных процессов, генерирующих и использующих энергию.

Методология: В работе использованы эмпирические зависимости и статистические критерии значимости результатов математического моделирования количественной зависимости между выбранными показателями нуклеотидного фонда мозга для оценки и прогнозирования энергетического состояния мозга в экстремальных условиях жизнедеятельности.

Результаты и область их применения: Использование методов эмпирических зависимостей позволило построить модели множественной регрессии, достаточно точно объединяющие экспериментальные показатели АТФ и АМФ в условиях гипобарической гипоксии и ишемии с разной экспозицией. Полученные модели можно использовать для прогнозирования концентраций АМФ и АТФ в условиях нарушения кислородного режима в короткие и более длительные сроки, а также получать информацию об изменении показателя $K = [АТФ]/[АМФ]$ в зависимости от гипоксического состояния мозга.

Вывод: Представленные в работе функциональные зависимости позволяют анализировать форму, тесноту и устойчивость связи между адениновыми нуклеотидами, характеризующими сопряженность процессов, генерирующих и использующих энергию, а также прогнозировать направленность этих процессов под влиянием гипоксического воздействия.

Ключевые слова: аденозинтрифосфат, аденозинмонофосфат, интегральный коэффициент, гипоксия, ишемия, модель множественной регрессии.

Введение

Согласно современным представлениям о влиянии гипоксии на энергетический обмен, в клетке развивающаяся дисфункция митохондриальных ферментов коррелирует с изменением внутриклеточного пула макроэргов, приводящим к повышению активности широкого спектра энергозависимых функционально-метаболических систем [7, 8]. Исследования А.М. Дудченко [1] регуляторной роли аденилатного пула в механизме чувствительности клетки к дефициту кислорода на изолированных гепатоцитах печени показали, что компоненты аденилатного пула являются наиболее ранними предикторами гипоксии. При этом на разных стадиях нарушений энергетического гомеостаза меняется информативность показателей $[АТФ]/[АДФ]$, $[АТФ]/[АМФ]$, а также суммы аденилатов и значение энергетического заряда. Это снимает дискуссию по поводу того, какое из отношений $[АТФ]/[АДФ]$ или

[АТФ]/[АМФ] имеет большую прогностическую значимость в условиях дефицита кислорода, и указывает на необходимость проведения комплексных исследований всех параметров аденилатного пула для оценки степени гипоксических повреждений.

Характер изменения молярных концентраций АТФ и АМФ в экстремальных условиях жизнедеятельности организма позволяет получать информацию о направленности обменных процессов под влиянием повреждающих факторов окружающей среды.

В данной работе проведена оценка экспериментальных показателей АТФ, АМФ и коэффициента $K = [АТФ]/[АМФ]$ в ткани мозга интактных животных и в условиях нарушения кислородного режима методами математического анализа с целью выявления некоторой закономерности в характере их изменения под влиянием гипоксического воздействия.

Задачей данного исследования является определение вида количественной зависимости между уровнем АТФ, АМФ и их интегральным показателем $K = [АТФ]/[АМФ]$ при кислородном голодании, установление тесноты связи, и влияния гипоксии на ее коррекцию, разработка математических моделей, позволяющих прогнозировать энергетический потенциал мозга по уровню адениновых нуклеотидов в экстремальных условиях жизнедеятельности организма.

Результаты

В табл. 1 представлены экспериментальные значения молярных концентраций АТФ, АМФ и интегрального коэффициента $K = [АТФ]/[АМФ]$ в мозге животных при разных нарушениях кислородного режима: гипобарической гипоксии разной степени тяжести и продолжительности и ишемии разной экспозиции.

Гипобарическая гипоксия создавалась разрежением атмосферного давления в барокамере проточного типа. В опытную группу входили кролики с нормальной температурой тела, которые находились в атмосфере с разной степенью дефицита кислорода: 310 мм рт. ст. и 270 мм рт. ст. продолжительностью 30 мин, 1 ч, 4 ч.

Таблица 1

Содержание адениновых нуклеотидов и отношений их молярных концентраций в мозге животных в разных условиях гипоксии

Условия эксперимента	Экспозиция	Концентрация АТФ мкмоль/г. ткани	Концентрация АМФ мкмоль/г. ткани	Коэффициент $K = \frac{АТФ}{АМФ}$
Интактные кролики	–	1,76 ± 0,06	0,22 ± 0,019	8,0
Атм. давл. 310 мм рт.ст.	30 мин	1,71 ± 0,056	0,22 ± 0,009	7,77
	1 ч	1,85 ± 0,08	0,19 ± 0,027	9,74
	4 ч	1,94 ± 0,05	0,17 ± 0,029	11,4
Атм. давл. 270 мм рт.ст.	30 мин	1,63 ± 0,08	0,25 ± 0,02	6,52
	1 ч	*1,49 ± 0,09 $p < 0,001$	0,28 ± 0,02	5,32
	4 ч	1,70 ± 0,066	0,21 ± 0,040	8,09
Интактные крысы	–	2,08 ± 0,07	0,27 ± 0,02	7,7
Ишемия	30 мин	*1,40 ± 0,13 $p < 0,001$	0,26 ± 0,04	5,38
	1,5 ч	2,08 ± 0,07	0,27 ± 0,03	7,7
	4 ч	2,13 ± 0,09	0,25 ± 0,04	8,52
	18 ч	*0,79 ± 0,10 $p < 0,001$	*0,55 ± 0,05 $p < 0,001$	1,44

* – Статистически значимые отклонения в сравнении с интактными животными.

Моделирование острой неполной ишемии головного мозга крыс создавалось путем билатерального двойного лигирования общих сонных артерий. Продолжительность опера-

ции 7–10 мин. Ткань мозга исследовали через 30 мин, 1, 5, 4, 18 ч после оперативного нарушения мозгового кровообращения.

Использованная модель острой неполной ишемии головного мозга отличается от гипоксии нарушением кровообращения в органе и снижением доставки у него не только кислорода, но и субстратов окисления при редуцированном сохранении оттока из него метаболитов.

Согласно результатам исследования, при умеренной форме гипобарической гипоксии (атм. давл. 310 мм рт. ст.) 30-минутная экспозиция не меняет относительно нормы выбранные показатели. С увеличением сроков нарушения кислородного режима от 1 до 4-х часов молярная концентрация АТФ соизмерима с нормой, а содержание АМФ незначительно уменьшается по сравнению с контролем. Это приводит к возрастанию коэффициента $K = [АТФ]/[АМФ]$ в 1,2 раза при 1-часовой экспозиции и в 1,5 раза при экспозиции 4 часа.

В условиях тяжелой формы гипоксического воздействия с удлинением экспозиции изменяется содержание обоих нуклеотидов. 30-минутное пребывание животных в условиях атмосферного давления 270 мм рт. ст. несколько снижает концентрацию АТФ, в то время как уровень АМФ остается соизмеримым с нормой, а коэффициент $K = [АТФ]/[АМФ]$ ниже нормы в 1,2 раза. Часовая экспозиция в этом случае приводит к дальнейшему достоверному уменьшению количества АТФ и не достоверному увеличению АМФ, что существенно уменьшает в 1,5 раза величину K . При удлинении гипоксического периода до 4-х часов содержание всех показателей восстанавливается, приближаясь к исходному уровню (табл. 1).

В условиях нарушения гемодинамики мозга, вызванной двусторонней перевязкой сонных артерий у крыс, при 30-минутной экспозиции после операции выявлено уменьшение содержания АТФ, хотя уровень АМФ остается без изменений. Это приводит к существенно уменьшению в 1,5 раза величины $K = [АТФ]/[АМФ]$ относительно нормы. При 1,5 и 4-часовой ишемии все показатели восстанавливаются, приближаясь к исходному уровню (табл. 1). 18-часовая ишемия достоверно изменяет уровень адениновых нуклеотидов и отношение их молярных концентраций по сравнению с контролем: АТФ достоверно уменьшается в 2,63 раза, АМФ достоверно увеличивается в 2 раза. Это приводит к резкому в 5,35 раза падению величины $K = [АТФ]/[АМФ]$ (табл. 1).

Таким образом, в зависимости от тяжести и формы гипоксического воздействия значение коэффициента $K = [АТФ]/[АМФ]$ коррелирует с характером изменения уровней АТФ и АМФ.

Таблица 2

Значения показателей $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в разных условиях нарушения кислородного режима

Условия эксперимента	Экспозиция	$\lambda_1 = \frac{[АТФ]_{Э}}{[АТФ]_N}$	$\lambda_2 = \frac{[АМФ]_{Э}}{[АМФ]_N}$	$\lambda_3 = \frac{K_{Э}}{K_N}$	$K = \frac{АТФ}{АМФ}$
Интактные	–	–	–	–	8,0
Атмосф. давл. 310 мм рт.ст.	30 мин	1,0	1,0	1,0	7,77
	1 ч	1,0	0,86↓	1,22↑	9,74
	4 ч	1,0	0,77↓	1,43↑	11,4
Атмосф. давл. 270 мм рт.ст.	30 мин	1,0	1,13↑	0,82↓	6,52
	1 ч	0,85↓	1,27↑	0,67↓	5,32
	4 ч	~1,0	~1,0	~1,0	8,09
Интактные	–	–	–	–	7,7
Ишемия	30 мин	0,67↓	1,0	0,70↓	5,38
	1,5 ч	1,0	1,0	1,0	7,7
	4 ч	1,0	1,0	1,1	8,52
	18 ч	0,38↓	2,04↑	0,19↓	1,44

Проведен анализ влияния содержаний АТФ и АМФ на направленность изменения коэффициента K при нарушении кислородного режима. С этой целью использовались параметры $\lambda_1 = [АТФ]_{Э}/[АТФ]_N$; $\lambda_2 = [АМФ]_{Э}/[АМФ]_N$; $\lambda_3 = K_{Э}/K_N$, представляющие собой отноше-

ния экспериментальных уровней выбранных нуклеотидов и коэффициентов K к значениям этих показателей у контрольных животных: $[АТФ]_{Э}$, $[АМФ]_{Э}$, $K_{Э} = [АТФ]_{Э}/[АМФ]_{Э}$ – экспериментальные значения; $[АТФ]_{N}$, $[АМФ]_{N}$, $K_N = [АТФ]_{N}/[АМФ]_{N}$ – норма.

Колебания $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ относительно 1,0 (меньше 1,0 ↓ или больше 1,0 ↑) отражали изменение экспериментальных характеристик энергетических процессов в мозге по сравнению с нормой, и степень влияния концентраций выбранных нуклеотидов на величину $K = [АТФ]/[АМФ]$. Значения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ в разных условиях гипоксического воздействия представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что при гипоксии разной тяжести и продолжительности отношение $K = [АТФ]/[АМФ]$ в большей степени изменяется от содержания АМФ и связано с ним противоположнонаправленной зависимостью, так как λ_2, λ_3 меняются относительно 1,0, а коэффициент $\lambda_1 \approx 1,0$ независимо от экспериментальных условий.

При нарушении гемодинамики мозга с разным интервалом времени после операции не наблюдается четкой корреляции изменения коэффициента $K = [АТФ]/[АМФ]$ от концентрации какого-то одного нуклеотида. Так, при 30-минутной ишемии показатель K в большей степени зависит от содержания АТФ и их изменение носит сонаправленный характер (λ_1, λ_3 изменяются относительно 1,0, а $\lambda_2 \approx 1,0$) (табл. 2).

1,5 и 4-часовая ишемия не вносят существенных отклонений в показателях $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, они стремятся к 1,0, и $K = [АТФ]/[АМФ]$ соизмерим с нормой. Длительное до 18 часов нарушение гемодинамики мозга изменяет все параметры $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ и коэффициент $K = [АТФ]/[АМФ]$ зависит от содержания обоих нуклеотидов. Следовательно, при ишемии разной продолжительности характер изменения $K = [АТФ]/[АМФ]$ от уровней АТФ и АМФ более сложный. Таким образом, математический анализ характеристик нуклеотидного фонда мозга животных в разных условиях гипоксического воздействия показали существование некоторой направленности изменений АТФ, АМФ, $K = [АТФ]/[АМФ]$, которая зависит от вида и степени тяжести гипоксии, а потому может иметь количественное описание.

Предпринята попытка причинно-следственную связь между концентрациями АТФ и АМФ моделировать математически элементарными гладкими функциями. В качестве независимой (объясняющей, факторной) переменной x рассматривались показатели АТФ, зависимой переменной y являлись значения АМФ. По программе MS Excel подбирались корреляционные тренды для каждого массива экспериментальных данных $x_i \rightarrow y_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Коэффициенты функций регрессии в каждом рассматриваемом опыте находились методом наименьших квадратов. Мерой приближения регрессионной модели к экспериментальным показателям служил коэффициент детерминации. Из всех рассматриваемых функций (полиномиальная, степенная, экспоненциальная, логарифмическая) была выбрана полиномиальная $y = a_0x^m + a_1x^{m-1} + \dots + a_n$ ($m = 1, 2, 3, 4$). После математической обработки результатов исследования показано, что гипобарическая гипоксия и ишемия оказывают разное влияние на вид корреляционной зависимости между $АТФ(x) \rightarrow АМФ(y)$ в мозге животных.

Согласно статистическим критериям значимости (t -критерий Стьюдента, F -критерий Фишера-Снедекора, критерий равенства квадрата коэффициента корреляции и коэффициента детерминации $r^2 = R^2$), установлено, что линейная $y = a_0x + a_1$ аппроксимация хорошо объединяет экспериментальные показатели $АТФ(x)$ и $АМФ(y)$ в условиях гипобарической гипоксии. Близкое к 1,0, значение коэффициента корреляции r и равенство $r^2 = R^2$ отражают очень тесную (даже функциональную) форму линейной связи зависимых показателей, которая не меняется ни от степени тяжести гипоксического воздействия, ни от длительности пребывания животных в состоянии гипоксии.

Ишемия усложняет вид корреляционной зависимости между выбранными нуклеотидами до кубической $y = a_0x^3 + a_1x^2 + a_2x + a_3$. Близкое к 1,0 значение коэффициента детерминации R^2 показывает, что экспериментальные значения $АТФ(x)$ и $АМФ(y)$ достаточно тесно связаны между собой, и их форма зависимости не меняется при нарушении гемодинамики мозга разной продолжительности.

Вид аппроксимирующих функций зависимости между АТФ(x) и АМФ(y) в мозге животных в условиях гипобарической гипоксии и ишемии разной продолжительности представлен в табл. 3.

Таблица 3

Вид функций, аппроксимирующих корреляционную зависимость между АТФ(x) и АМФ(y) в мозге животных в условиях гипобарической гипоксии и ишемии разной продолжительности

Условия эксперимента	Экспозиция	Функции регрессии	Коэффициент корреляции r_{xy}	Коэффициент детерминации R^2
Интактные кролики	–	$y = 0,444x - 0,553$	0,989718236	0,979542187
Атмосферное давление 310 мм рт.ст.	30 мин	$y = -1,6908x + 3,1184$	-0,98216024	0,964638744
	1 ч	$y = -0,25x + 0,6325$	-1	1
	4 ч	$y = -0,5x + 1,135$	-1	1
Атмосферное давление 270 мм рт.ст.	30 мин	$y = -0,25x + 0,6325$	-1	1
	1 ч	$y = -0,5342x + 1,0452$	-0,996	0,99217221
	4 ч	$y = 0,9856x - 1,46$	1	1
Интактные крысы	–	$y = 0,034149x^3 - 0,432814x^2 + 1,660693x - 1,627649$		0,997951
Ишемия	30 мин	$y = -0,625582x^3 + 2,871046x^2 - 3,918680x + 1,789307$		0,890686
	4 ч	$y = 0,076043x^3 - 0,633835x^2 + 2,103157x - 2,078924$		0,946041
	18 ч (резистентная)	$y = 0,098741x^3 + 0,083524x^2 - 0,120818x + 0,119724$		0,976326

Проведена попытка построить модель множественной регрессии, аппроксимирующей зависимость АТФ(x) → АМФ(y), где x – содержанию АТФ добавлена переменная t – время пребывания животных в состоянии нарушения кислородного режима (барометрической гипоксии и ишемии). В этом случае коэффициенты a_i линейной функции $y = a_0x + a_1$ ($i = 0, 1$) и кубического многочлена $y = a_0x^3 + a_1x^2 + a_2x + a_3$ ($i = 0, 1, 2, 3$) считали функциями переменной t – времени пребывания животных в условиях гипоксического воздействия $a_i = \varphi_i(t)$. Вид $\varphi_i(t) = (A2)_j + (A0)_j \cdot \cos \frac{(A1)_j}{t}$ определялся расположением экспериментальных показателей (x_i, y_i), влияющих на изменение a_i в разных условиях гипоксии.

Полученная модель множественной регрессии, аппроксимирующая зависимость между выбранными нуклеотидами в мозге животных в условиях гипоксии разной экспозиции, имела вид:

$$y(x, t) = \varphi_0(t)x + \varphi_1(t) \text{ – при гипобарической гипоксии;}$$

$$y(x, t) = \varphi_0(t)x^3 + \varphi_1(t)x^2 + \varphi_2(t)x + \varphi_3(t) \text{ – при ишемии,}$$

где x – молярная концентрация АТФ, выраженная в мкМолях/г сырой ткани; t – время пребывания животных в состоянии гипоксии, выраженное в минутах;

$$\varphi_i(t) = (A2)_j + (A0)_j \cdot \cos \frac{(A1)_j}{t} \text{ (} i = 0, 1 \text{ или } i = 0, 1, 2, 3; j = 0, 1, 2) \text{ – функция времени } t;$$

$(A0)_j, (A1)_j, (A2)_j$ – значимые показатели функций $\varphi_i(t)$, найденные методом последовательных приближений, отражающие состояние организма в разных экспериментальных условиях; $y(x, t)$ – содержание АМФ, выраженное в мкМолях/г сырой ткани, соотнесенное к минутам. Значения коэффициентов $(A0)_j, (A1)_j, (A2)_j$ представлены в табл. 4.

Прогностическая способность предлагаемых математических моделей $y(x, t) = \varphi_0(t)x + \varphi_1(t)$ и $y(x, t) = \varphi_0(t)x^3 + \varphi_1(t)x^2 + \varphi_2(t)x + \varphi_3(t)$ проверялась расчетом концентрации АМФ и показателя $K = [АТФ]/[АМФ]$ с последующей оценкой результата и подтверждением его достоверности дополнительным экспериментом либо литературными данными.

Таблица 4

Значения коэффициентов $(A0)_j, (A1)_j, (A2)_j$ функций $\varphi_i(t) = (A2)_j + (A0)_j \cdot \cos \frac{(A1)_j}{t}$ ($i = 0,1; j = 0,1,2$) зависимости АТФ(x)→АМФ(y) в условиях гипобарической гипоксии

Условия эксперимента	$\varphi_i(t)$ / $(AI)_j$	$(A0)_j$	$(A1)_j$	$(A2)_j$
Атмосферное давление 310 мм рт.ст.	$\varphi_0(t)$	1,540094	318,2468	-1,10905
	$\varphi_1(t)$	-2,79558	320,856	2,291251
Атмосферное давление 270 мм рт.ст.	$\varphi_0(t)$	1,035154	508,8446	0,072944
	$\varphi_1(t)$	-1,68638	507,9199	0,077262
Ишемия	$\varphi_0(t)$	-0,5686278	2477,9	-0,2775826
	$\varphi_1(t)$	-4,8439768	1266,69	1,9613424
	$\varphi_2(t)$	12,230367	1274,47	-4,7790863
	$\varphi_3(t)$	3,9562274	1119,78	-1,8941859

Сравнение аналитического расчета с экспериментальными показателями нуклеотидного фонда мозга указывало на соответствие предлагаемых моделей объекту исследования, так как относительная ошибка формул соответствовала интервалу допустимых погрешностей расчета (меньше 20%) [2]. В табл. 5 представлены некоторые примеры проверки прогностической способности представленных моделей, подтвержденные экспериментальными данными, полученными в лаборатории кафедры «Биохимия им. Г.Я. Городисской» НГМА.

Таким образом, использование методов математического анализа при оценке показателей нуклеотидного фонда мозга АТФ, АМФ и $K = [АТФ]/[АМФ]$ в условиях гипоксии разной тяжести и продолжительности дало возможность:

1) установить характер изменения выбранных показателей с усилением тяжести гипоксического воздействия;

2) проследить влияние каждого из нуклеотидов АТФ и АМФ на величину $K = [АТФ]/[АМФ]$: при гипобарической гипоксии разной продолжительности изменения интегрального коэффициента K в большей степени зависят от концентрации АМФ, а при ишемии с разным интервалом времени после операции не просматривается четкой корреляции величины K от уровня какого-то одного нуклеотида;

3) установить, что под влиянием формы гипоксического воздействия усложняется вид количественной зависимости между адениновыми нуклеотидами АТФ и АМФ: от простого – при разрежении атмосферного давления к более сложному – при нарушении гемодинамики мозга;

4) построить модели множественной регрессии, достаточно точно объединяющие экспериментальные показатели АТФ(x) и АМФ(y) в условиях кислородного голодания с разной экспозицией t : $y(x, t) = \varphi_0(t)x + \varphi_1(t)$ – в условиях гипобарической гипоксии, $y(x, t) = \varphi_0(t)x^3 + \varphi_1(t)x^2 + \varphi_2(t)x + \varphi_3(t)$ – при ишемии;

5) расчетным способом прогнозировать содержание АМФ и АТФ в мозге интактных животных в условиях нарушения кислородного режима с разной экспозицией, а также получать информацию об изменении показателя $K = [АТФ]/[АМФ]$, характеризующего сопряженность процессов, генерирующих и использующих энергию.

Таблица 5

Экспериментальные и расчетные содержания адениновых нуклеотидов и показателя $K = [АТФ]/[АМФ]$ в мозге животных в разных условиях гипоксического воздействия

Условия эксперимента	Экспозиция (мин)	Метод определения	Виды животных	Эксперим. АТФ, мкмоль/г сырой ткани	Эксперим. АМФ, мкмоль/г сырой ткани	Расчетное АМФ	Ошибка расчета	Экспериментальное K	Аналитическое K	Относительная ошибка расчета, %
Атмосферное давление 310 мм рт.ст	250-480	Хроматографический на целлюлозе	Кролики	$191 \pm 0,065$	$0,23 \pm 0,02$	0,224028 0,244234 <u>0,297419</u> ср. 0,255227	ср. 8,0	8,3	ср. 7,48	ср. 6,0
Атмосферное давление 2700 мм рт.ст	240-285	Хроматографический на целлюлозе	Кролики	$170 \pm 0,006$	$0,21 \pm 0,04$	0,203456 0,223563 <u>0,243760</u> ср. 0,223599	ср. 4,0	8,09	ср. 7,6	ср. 6,0
Ишемия	90	Хроматографический на целлюлозе	Крысы	$2,08 \pm 0,07$	$0,27 \pm 0,03$	0,202476 0,242905 <u>0,283883</u> ср. 0,243087	ср. 7,0	7,7	ср. 8,55	ср. 11
	18 часов (резистентные)	Хроматографический на целлюлозе	Крысы	$1,52 \pm 0,10$	$0,20 \pm 0,04$	0,161846 0,222441 <u>0,214502</u> ср. 0,199596	ср. 0,2	7,6	ср. 7,62	ср. 0,2

Список сокращений

АТФ – аденозинтрифосфат

АМФ – аденозинмонофосфат

$K = [\text{АТФ}]/[\text{АМФ}]$ – интегральный коэффициент отношения молярных концентраций аденозинтрифосфата и аденозинмонофосфата

Библиографический список

1. Дудченко, А.М. Регуляторная роль аденилатного пула в механизме чувствительности клетки к дефициту кислорода // Патогенез. 2008. Т. 6. № 3 С. 57–58.
2. Дж. Марри. Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии – лекции о моделях // Москва: Мир, 1983. С. 383–390.
3. Мошкова, А.Н. Оценка степени тяжести ишемии по активности изоферментов креатинфосфокиназы мозга методом эмпирических зависимостей / А.Н. Мошкова, Т.Ф. Сергеева, Е.М. Хватова, Н.П. Тежикова // Труды НГТУ. 2013. № 3 (102). С. 362–366.
4. Мошкова, А.Н. Выбор эмпирических зависимостей для оценки и прогнозирования функционального состояния ферментных комплексов дыхательной цепи в условиях гипоксии / А.Н. Мошкова, Е.И. Ерлыкина, Е.М. Хватова, Н.П. Тежикова // Труды НГТУ. 2014. № 1 (103). С. 311–316.
5. Самарский, А.А. Математическое моделирование в информационную эпоху / А.А. Самарский, А.П. Михайлов // Вестник РАН. 2004. Т. 74. № 12. С. 781–784.
6. Сиднев, Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных // Москва, Юрайт. 2011. С. 31–139.
7. Лукьянова, Л.Д. Регуляторная роль митохондрий при гипоксии и их взаимодействие с транскрипционной активностью / Л.Д. Лукьянова, А.М. Дудченко, Т.А. Цибина // Вести РАМН. 2007. № 2. С. 3–13.
8. Лукьянова, Л.Д. Новое о сигнальных механизмах адаптации к гипоксии и их роли в системной регуляции / Л.Д. Лукьянова, Ю.И. Кирова, Г.В. Сукоян // Патогенез. 2011. Т. 9. № 3. С. 4–14.
9. Moshkova, A.N. Mathematical Analysis of Kinetic Characteristics of Oxidative Phosphorylation in the Animal Brain under Hypoxic Conditions ISSN 1819–7124 / A.N. Moshkova, E.M. Khvatova, I.A. Rusakova // Neurochemical Journal. 2007. V. 3. No 3. P. 240–243.
10. Moshkova, A.N. Analysis and predictions of ATP Concentration in the Animal Brain under Hypoxic Conditions ISSN 1819–7124 / A.N. Moshkova, E.M. Khvatova, I.A. Rusakova // Neurochemical Journal. 2009. V. 3. No 1. P. 44–48.
11. Moshkova, A.N. Approach to Prediction of Adaptive State of Brain Energetic System under Conditions of Hypoxia / A.N. Moshkova [et al.] // Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2010. V. 149. No. 3. P. 91–92.
12. Ye, J. Regulation of energy metabolism by inflammation: A feedback response in obesity and caloric restriction / J. Ye, J.N. Keller // Cytokine. 2010. V. 85. P. 56–60.
13. Zinkernagel, A.S. Hypoxia unducible. 2007. V. 85. P. 1339–1346.

Дата поступления
в редакцию 09.02.2015

A.N. Moshkova, E.I. Erlykina, E.M. Khvatova, N.P. Tezhikova

BASELINE CHARACTERISTICS OF ADENINE NUCLEOTIDES CONTENT IN ACUTE HYPOXIA BY MATHEMATICAL ANALYSIS METHODS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹
Nizhny Novgorod State Medical Academy²

Aim of the study: the aim of our study was analysis of adenosine triphosphate (ATP) and adenosine monophosphate (AMP) experimental concentrations and integral coefficient $K = \frac{[ATP]}{[AMP]}$ in intact animals brain tissue and in disturbances of the oxygen regime by methods of mathematical analysis; as well as detection of some regularity in the character of their changes under the impact of hypoxia for the assessment and prediction of direction of production and utilization energy in metabolic pathways.

Methodology: in this study empirical dependencies and criteria of statistical significance of mathematical modeling of quantitative relation between specified brain nucleotide stock indicators for the assessment and prognostication of brain energy state in extreme conditions were used.

Results and area of their application: The use of empirical dependencies methods allowed to create multiregression models, subtly enough to unite experimental indicators ATP and AMP in hypobaric hypoxia and ischemia with different-term exposure. Obtained models can be used for prognostication of ATP and AMP concentrations in disturbances of the oxygen regime in a short or over a long period of time, as well as to receive information of indicator $K = \frac{[ATP]}{[AMP]}$ changing depending on brain hypoxia.

Conclusion: functional dependencies are presented in this study to analyze shape, closeness and stability of relations between adenine nucleotides characterizing coupling of production and utilization energy processes, and also to predict the direction of these processes under hypoxic condition.

Key words: adenosine triphosphate, adenosine monophosphate, integral coefficient, hypoxia, ischemia, multiregression model.

УДК 51-77

А.С. Ивлева, О.Е. Ошмарина, Е.В. Шадрина

АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХНациональный исследовательский университет Высшая Школа Экономики,
Нижний Новгород

Цель работы. Стремительно развивающиеся технологии поддерживают развитие онлайн социальных сетей. На данный момент все больше исследований посвящены взаимодействию между агентами социальных сетей. Методы программирования приложений (API методы) значительно упрощают проведение исследований в социальных сетях и позволяют автоматизировать сбор информации.

Научный подход. Для исследования было построено компьютерное приложение, которое собирает информацию о студентах трех крупных нижегородских вузов, а также представлен результат сетевого анализа.

Результат. В результате работы были исследованы возможности API разных онлайн социальных сетей; разработано приложение по сбору и анализу данных; представлены результаты сбора и общего анализа данных для 1500 пользователей.

Новизна. Возможность динамично изменять параметры разработанного приложения позволяет собрать информацию по совершенно иным характеристикам агентов, например место работы, хобби, музыка, использование других социальных сетей, занятие спортом, знание иностранных языков. Таким образом, появляется возможность провести иное социальное исследование.

Ключевые слова: api, онлайн социальная сеть, ВКонтакте, социальная структура, разработка приложения.

Введение

С развитием информационных технологий, поддерживающих удалённое взаимодействие, стремительно развиваются онлайн социальные сети. Ежегодно популярность и влияние онлайн социальных сетей растёт. Данный процесс связан с использованием виртуальных сетей, которые являются возможностью общения с людьми, удалёнными на тысячи километров. Взаимодействие с социальными сетями стало неотъемлемой частью жизни современного человека. Вследствие этого онлайн сети оказывают определенное воздействие на жизнь человека и его отношения с окружающими. Сейчас проводится все больше и больше исследований, связанных с созданием алгоритмов и приложений для изучения взаимоотношений между агентами социальных сетей.

Цель данного исследования – разработать приложение для автоматического сбора данных о пользователях онлайн социальной сети для последующего сетевого анализа.

В ходе работы были исследованы возможности API разных онлайн социальных сетей; разработано приложение по сбору и анализу данных; представлены результаты сбора и общего сетевого анализа данных для не менее 1500 пользователей.

Анализ социальных сетей - активно развивающееся направление западной и российской социологии. Исследования, направленные на изучение социальных сетей, используют различные подходы по оценки зрелости онлайн сообществ [9]. Также изучается вопрос автоматизации жизни современного человека при помощи онлайн социальных сетей. Рассматриваются два направления автоматизации - информатизация бизнеса и государственной деятельности и расширение спектра общения с друзьями, бывшими коллегами и однокашниками. Автоматизация позволяет более полно удовлетворять потребности в информации и в самовыражении, существенно увеличивает число инструментов самообслуживания [8, 10].

Интерес исследователей к этому направлению связан с тем, что оно предоставляет новый набор объяснительных моделей и аналитических инструментальных средств, которые находятся вне рамок обычных количественных методов. При этом в данной области накоплен богатый математический аппарат, позволяющий строить весьма сложные модели социальных взаимодействий, описывающие практически любые социальные системы [3, 5]. Социальные сети потенциально могут стать инструментом преобразования общества, распро-

странения научного и технического знания, формирования коллективов и общественных движений. В текущем положении они используются в основном для общения [9], маркетинговых исследований и продвижения продукции и услуг [4].

Интернет социальные сети также являются невероятно богатым источником данных о развивающихся социальных связях [7]. Экономическая теория формирования сети порождает гипотезы о том, какими правилами связей и экономических стимулов может быть сформирована архитектура сети, а также помогает определить их эффективность. Эти гипотезы можно эмпирически протестировать с данными из социальных сетей в Интернете [8].

Социальная сеть Facebook так же является обширной платформой для исследований [6]. Активно изучается влияние Facebook на формирование социальных групп среди студентов [3]. Также рассматриваются связи между социальной сетью и психологическим состоянием агента [5].

Помимо социальных сетей в настоящее время изучаются инструменты, с помощью которых можно работать с сетями и собирать информацию об агентах [7]. Прикладные API методы также активно используются в современных исследованиях. Опираясь на API методы разработчики могут создавать приложения, которые совместимы в контексте различных социальных сетей [4].

Анализ существующих платформ для разработки приложений онлайн социальных сетей Facebook и Вконтакте

В процессе исследования было необходимо создать приложение, которое бы собирало открытую информацию о пользователях из социальных сетей. Приложение может быть сделано по технологии Flash или IFrame [1]. Сайт Вконтакте изначально предоставляет разработчикам возможность работать с API методами. Наличие готовых функций значительно облегчает сбор данных и упрощает взаимодействие приложения с социальной сетью.

ВКонтакте и Facebook — основные онлайн социальные сети, на которые было ориентировано исследование.

С 2011 г. политика социальной сети Facebook требует наличия удаленного сервера для создания приложения. Руководство уточняет, что данное изменение не затронет работу популярных приложений, но создаст определенные препятствия для студентов и небольших групп [9]. Так как в процессе исследования не предполагалось создание собственного стороннего сервера, приложение для Facebook было не осуществимо в рамках настоящей работы.

Поэтому работа продолжалась только с социальной сетью ВКонтакте. Специфика ВКонтакте состоит в том, что в браузерах активной аудитории ресурса уже установлены последние версии Flash-плагинов, так как основные сервисы ВКонтакте (видеозаписи, аудиозаписи, загрузка фотографий, графики) уже построены на этой технологии. Технология Adobe Flash позволяет реализовать все, что может быть реализовано другими средствами, однако позволяет обойти кроссдоменные ограничения браузеров, а также решить проблемы безопасности старых версий Internet Explorer [2]. Поэтому для дальнейшей работы было выбрано Flash-приложение.

Программа Adobe Flash Professional CS5.5 является многофункциональной и позволяет разрабатывать Flash-приложения, поэтому для дальнейшей работы была выбрана именно она.

При создании приложения использованы стандартные API методы социальной интернет-сети ВКонтакте. Помимо них была задействована библиотека APIConnection, которая упрощает процесс запроса к методам.

Для обращения к ВКонтакте API необходимо использовать функцию объекта:

```
VK - VK.api(methodName: String, params: Object, [onComplete: Function, OnError: Function])
```

В случае удачного завершения запроса, функция `onComplete()` вернет объект, который содержит необходимые результаты. В случае неудачного завершения запроса, функция `OnError()` вернет объект, который содержит данные об ошибке.

При создании приложения были задействованы два API метода: `users.get()` и `friends.get()`. Параметры данных методов можно увидеть в табл. 1.

Таблица 1

Значения основных параметров для методов `users.get()` и `friends.get()`

Параметр	Описание
Uids	Для <code>users.get()</code> : Список id пользователей. Максимальное число – 1000. Для <code>friends.get()</code> : идентификатор пользователя, для которого необходимо получить список друзей. Если параметр не задан, он равен идентификатору текущего пользователя.
Fields: uid, first_name, last_name, nickname, sex, bdate, city, country, timezone, photo, photo_medium, photo_big, online, lists, contacts, education.	Поля анкет, которые необходимо получить.
name_case	Падеж для склонения имени и фамилии пользователя.
Count	Количество друзей, которое нужно вернуть (по умолчанию – все друзья).
Offset	смещение, необходимое для выборки определенного подмножества друзей.

Анализ полученных результатов

Интерфейс приложения и результат работы программы можно увидеть на рис. 1. Существует поле для ввода индивидуального номера пользователя ID. При нажатии кнопки “Get ID” в левом поле отобразятся индивидуальные номера всех друзей пользователя. При нажатии кнопки “Get INFO” в правом поле отобразится информация о друзьях пользователя.

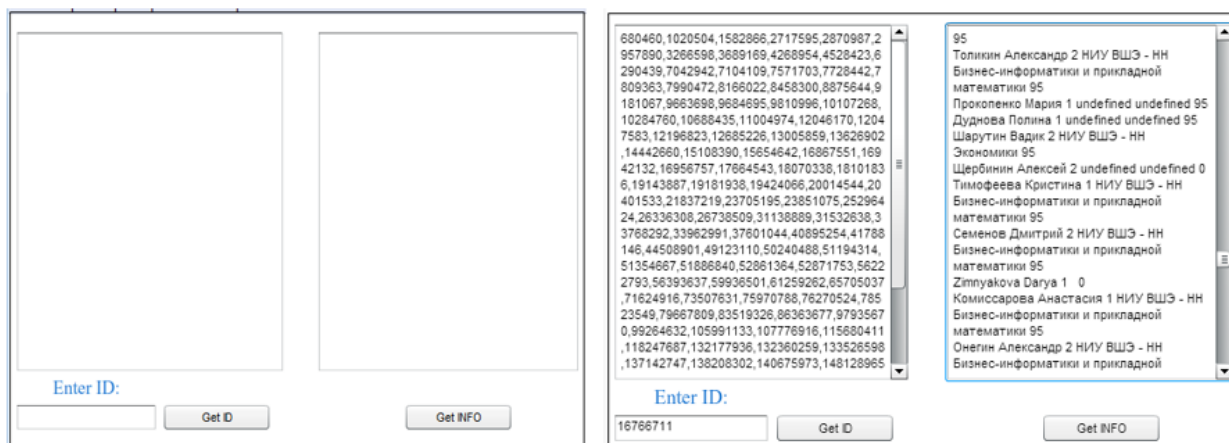


Рис. 1. Интерфейс приложения

В ходе работы с приложением были собраны данные о студентах в количестве 1500 человек с трёх учебных учреждений Нижнего Новгорода: НИУ ВШЭ – Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижегородская государственная медицинская академия (НиЖГМА).

В приложении были заданы параметры, которые собирали информацию об уникальном номере пользователя, имени и фамилии пользователя социальной сети, названии учебного учреждения и факультета, пол и город, в котором пользователь проживает. Все полученные данные экспортировались в Microsoft Office Excel.

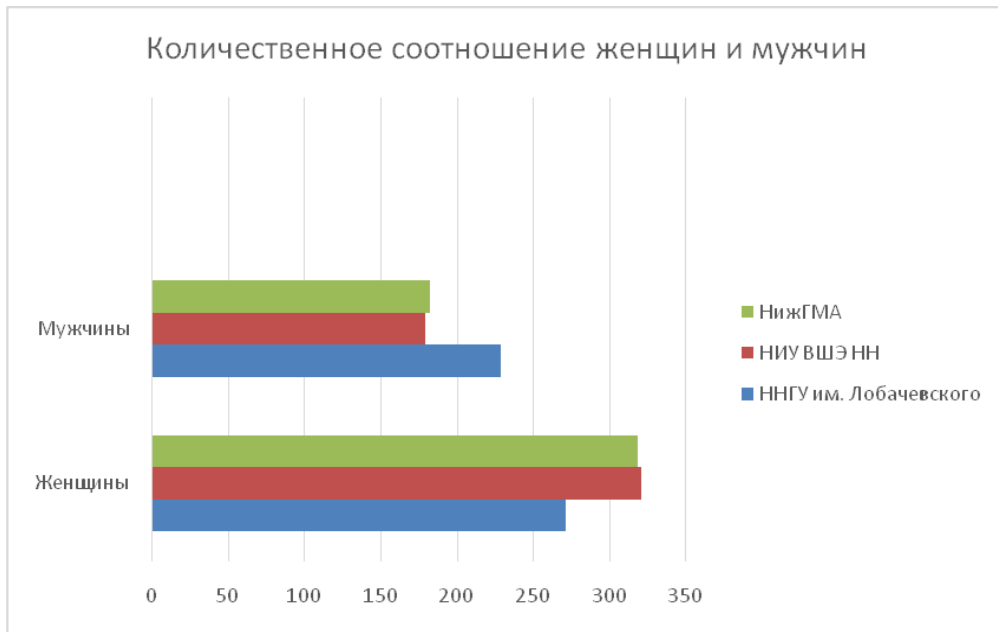


Рис. 2. Количественное соотношение женщин и мужчин

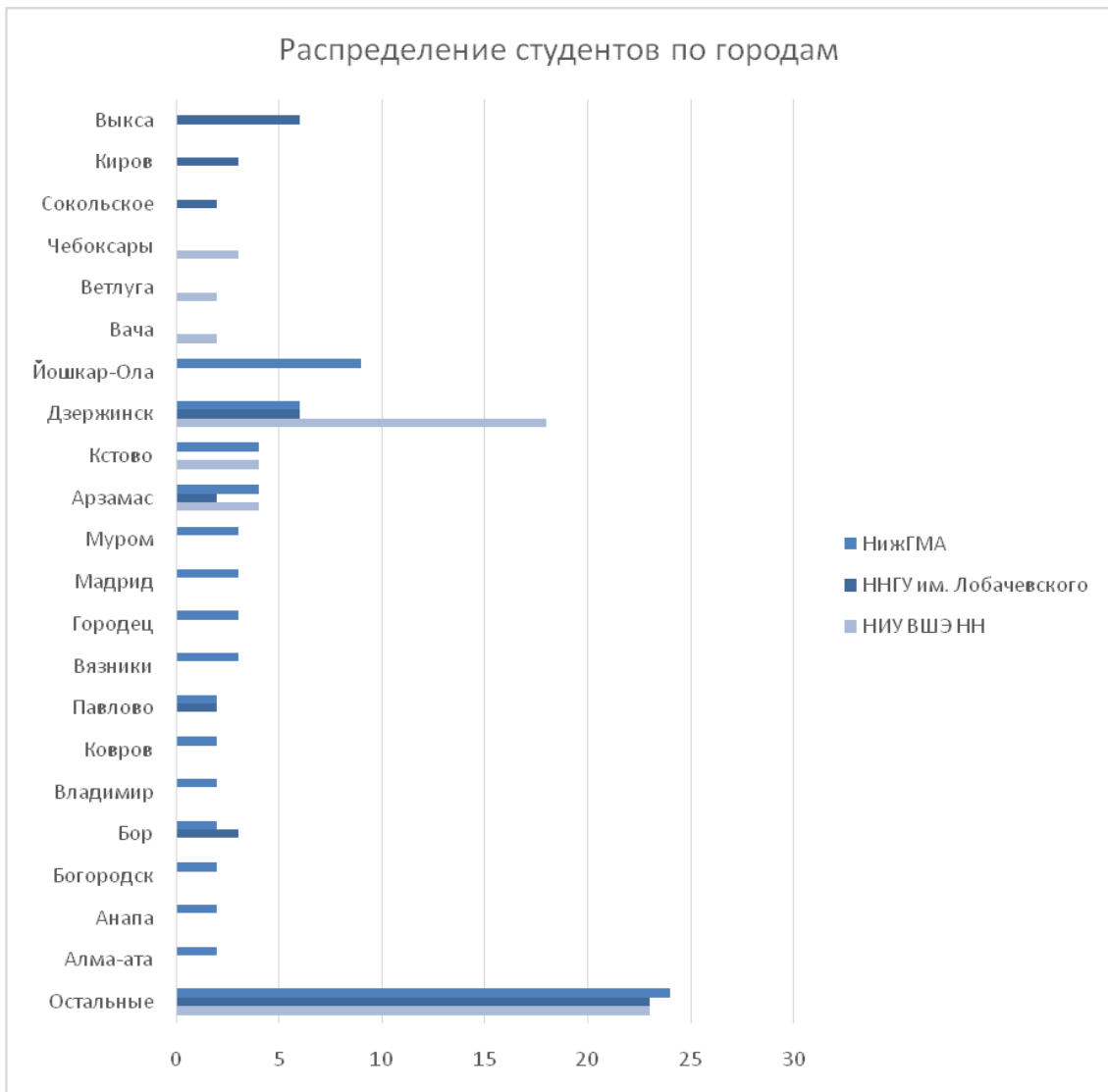


Рис. 3. Распределение по городам

В ходе сбора и обработки информации обнаружилось следующие погрешности: пользователь может указать в поле «город» место, где находится его учебное заведение, а не город, откуда пользователь приехал. В настоящей работе эти погрешности не устранялись, поскольку данные были собраны в тестовом режиме.

Также в ходе сбора информации были обнаружены некоторые особенности данных в онлайн-социальной сети: не все пользователи делают информацию на своей персональной странице доступной для просмотра, не все пользователи заполняют информацию о себе. Такие пользователи не включены в итоговую выборку.

Полученные данные были проанализированы по нескольким параметрам:

- количественное соотношение мужчин и женщин в каждом учебном заведении;
- количество приезжих студентов в каждом учебном заведении.

Как видно на диаграммах, представленных на рис. 2, девушек больше во всех трех учебных заведениях, причем в ННГУ им. Н.И. Лобачевского разница минимальна.

Данные позволяют рассмотреть распределение студентов по городам (рис. 3). Оказалось, что в ННГУ им. Н.И. Лобачевского в основном учатся из Выксы и Дзержинска. В НИУ ВШЭ – Нижний Новгород – из Дзержинска и Арзамаса. В НижГМА наибольшее число иногородних студентов и, что интуитивно понятно, большое число иностранных студентов. Наибольшее число студентов из Дзержинска и Йошкар-Олы.

Данные, собранные в процессе работы с приложением, можно представить в виде таблицы с булевыми значениями (рис. 4). Подобный формат удобно использовать далее для построения матриц и графов. Все это дает возможности для дальнейших исследований взаимоотношений агентов социальной сети и сбора статистических данных.

	Экономики	БИ	Права	Менежмента
Жен	94	55	48	88
Муж	53	54	22	35

Рис. 4. Соотношение мужчин и женщин по факультетам

Заключение

Данное исследование предполагало разработку приложения для автоматического сбора данных о пользователях онлайн социальных сетей с целью дальнейшего анализа структуры. В результате работы были исследованы возможности API разных онлайн социальных сетей; разработано приложение по сбору и анализу данных; представлены результаты сбора и общего анализа данных для 1500 пользователей.

Возможность динамично изменять параметры разработанного приложения позволяет собрать информацию о студентах других учебных заведений, собрать информацию по совершенно иным характеристикам агентов, например, место работы, хобби, музыка, использование других социальных сетей, занятие спортом, знание иностранных языков. Таким образом, появляется возможность провести иное социальное исследование.

Библиографический список

1. **Reimers, S.** Adobe Flash as a medium for online experimentation: A test of reaction time measurement capabilities / S. Reimers, N. Stewart // Behavior Research Methods. 2007. Т. 39. №. 3. С. 365–370. URL: <http://link.springer.com/article/10.3758/BF03193004>
2. Internet Exploer Standarts Support Documentation: [Электронный ресурс]. URL: [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ff410218\(v=vs.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ff410218(v=vs.85).aspx)
3. **Greenhow, C.** Online social networks and learning //On the Horizon. 2011. Т. 19. №. 1. С. 4–12. URL: <http://www.igi-global.com/article/online-social-networking-learning/51563>
4. **Häsel, M.** Opensocial: an enabler for social applications on the web //Communications of the ACM. 2011. Т. 54. №. 1. С. 139–144. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1866765>

5. **Goyal, S.** Social networks on the Web //The Oxford Handbook of the Digital Economy. 2012. С. 434. URL: <http://www.oxfordhandbooks.com/view/10.1093/oxfordhb/9780195397840.001.0001/oxfordhb-9780195397840-e-16>
6. **Ellison, N. B.** The benefits of Facebook “friends:” Social capital and college students’ use of online social network sites/ N. B. Ellison, C. Steinfield, C. Lampe //J ournal of Computer-Mediated Communication. 2007. Т. 12. №. 4. С. 1143–1168. URL: http://www.academia.edu/4982860/Social_capital_the_benefit_of_Facebook_friends
7. **Ackland, R.** Using Facebook as a data source and platform for e-researching social networks // refereed paper presented at the Fourth International Conference on e-Social Science. 2008. С. 18–20. URL: <http://www.opensourceintelligence.eu/ric/doc/Using%20Facebook%20as%20a%20Data%20Source.pdf>
8. **Чураков, А. Н.** Анализ социальных сетей // Социологические исследования. 2001. №. 1. С. 109-121. URL: <http://www.twirpx.com/file/194725/>
9. **Краснов, Ф.** Измерение уровня зрелости профессионального сообщества / Ф. Краснов, Р. Яворский // Принята к публикации в журнале «Бизнес-информатика», 2013. URL: <http://bijournal.hse.ru/data/2013/06/17/1287071381/9.pdf>
10. **Славин, Б.Б.** Конвергенция архитектур социальной и корпоративной информационной среды человека // Бизнес-информатика 2012. № 2(20). С. 3–9. URL: <http://bijournal.hse.ru/data/2012/06/28/1255711514/1.pdf>

*Дата поступления
в редакцию 18.02.2015*

A.S. Ivleva, O.E. Oshmarina, E.V. Shadrina

AUTOMATE THE COLLECTION AND ANALYSIS OF DATA SOCIAL NETWORKS

National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod

Research focus: Rapidly developing technologies support the development of online social networks. At the moment, more and more studies are devoted to interaction between agents of social networks. Methods of application programming (API methods) greatly simplify the research in social networks and allow you to automate the collection of information.

Research methods: For the study was to construct a computer application that collects information about students three major universities in Nizhny Novgorod, as well as provides results of network analysis.

Results: As a result of API features were investigated various online social networks; application designed to collect and analyze data; the results of collection and analysis of data for the total 1500 users.

Novelty: Opportunity to dynamically change the parameters of the developed application allows you to gather information on the characteristics of completely different agents, such as jobs, hobbies, music, the use of other social networks, sports, knowledge of foreign languages. Thus, it is possible to carry out other social sciences.

Key words: api, online social network, VKontakte, social structure, application development.

УДК. 515.126

В.М. Галкин, И.Н. Толкачев, Н.В. Юрова

ОДНА ЗАДАЧА ИЗ ФУРЬЕ-АНАЛИЗА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается задача восстановления комплекснозначной функции действительного переменного по известным модулям функции и ее преобразования Фурье. Разбирается случай конечного преобразования Фурье, где показывается неоднозначность восстановления.

Ключевые слова: волновая функция, конечное преобразование Фурье, дифференцируемые отображения, соотношение неопределенности Гейзенберга.

Задача, рассматриваемая в этой работе, связана с обсуждением понятия волновой функции в квантовой механике. Для простоты ограничимся одномерным движением квантовой частицы. Это движение описывается комплекснозначной функцией $\psi(x)$, называемой

волновой [1]. При нормировке $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1$ плотности распределений вероятностей координаты и скорости частицы есть $|\psi(x)|^2$ и $|\psi^*(x)|^2$, где $\psi^*(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\omega x} \psi(x) dx$ – преобразование

Фурье волновой функции.

Общепринято, что волновая функция не имеет физического смысла, а лишь является математической абстракцией, позволяющей вычислить различные вероятности физических процессов. Естественно все же поставить вопрос о восстановлении волновой функции по данным эксперимента, хотя бы и мысленно. Таковыми являются описанные ранее плотности вероятностей. Математически проблема формулируется следующим образом: с какой точностью восстанавливается комплекснозначная функция $f(x)$, если известны $|f(x)|$ и $|f^*(x)|$, где $f^*(x)$ – образ Фурье функции $f(x)$.

Очевидно, что вместе с решением $f(x)$ таковым будет и $e^{i\alpha} f(x)$, где α – действительная константа. «Фазовый» множитель $e^{i\alpha}$ несущественен при вычислениях в квантовой механике и весьма заманчивым является предложение, что этой неопределенностью в определении $f(x)$ дело и ограничивается. Если бы это было так, то в теории передачи сигналов сигнал $f(t)$ ($f(t)$ – действительная функция времени t) определялся бы по $|f(t)|$ и амплитудному спектру с точностью до знака. Авторам неизвестны какие-либо упоминания по поставленной задаче в литературе. Сама задача представляется достаточно трудной, повидимому более трудной, чем известная обратная задача теории рассеяния. Поэтому в этой работе рассматриваются более простой случай **конечного** преобразования Фурье, хотя и здесь задача представляется нетривиальной.

1. Конечное преобразование Фурье [2].

Пусть $z = (z_0, z_1, \dots, z_{n-1})$ – вектор из n -мерного комплексного линейного пространства V . Его преобразованием служит вектор $Z = (Z_0, Z_1, \dots, Z_{n-1})$, чьи компоненты определяются формулами:

$$\begin{aligned}
 Z_0 &= z_0 + z_1 + z_2 + \dots + z_{n-1}, \\
 Z_1 &= z_0 + \zeta z_1 + \zeta^2 z_2 + \dots + \zeta^{n-1} z_{n-1}, \\
 Z_2 &= z_0 + \zeta^2 z_1 + \zeta^4 z_2 + \dots + \zeta^{2(n-1)} z_{n-1}, \\
 &\dots\dots\dots \\
 Z_{n-1} &= z_0 + \zeta^{n-1} z_1 + \zeta^{2(n-1)} z_2 + \dots + \zeta^{(n-1)(n-1)} z_{n-1},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $\zeta = e^{2\pi i/n}$.

Обратное преобразование Фурье имеет вид

$$\begin{aligned}
 z_0 &= \frac{1}{n}(Z_0 + Z_1 + \dots + Z_{n-1}), \\
 z_1 &= \frac{1}{n}(Z_0 + \zeta^{-1}Z_1 + \dots + \zeta^{-(n-1)}Z_{n-1}), \\
 &\dots\dots\dots \\
 z_{n-1} &= \frac{1}{n}(Z_0 + \zeta^{-(n-1)}Z_1 + \dots + \zeta^{-(n-1)(n-1)}Z_{n-1}).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Имеет место равенство Парсеваля

$$|Z_0|^2 + |Z_1|^2 + \dots + |Z_{n-1}|^2 = n(|z_0|^2 + |z_1|^2 + \dots + |z_{n-1}|^2).
 \tag{3}$$

Поставленная ранее задача теперь формулируется так: по данным $|z_k|^2$ и $|Z_k|^2$ ($k = 0, 1, 2, \dots, n-1$) восстановить векторы z и Z .

Как обычно в математике, возникают вопросы существования и единственности решения. Необходимое условие существования решения можно указать сразу: модули изначально задаваемых векторов z и Z должны быть связаны равенством Парсеваля. Как мы увидим далее, оно не является достаточным. Единственность решения, если таковые существуют, также не выполняется: допустимо преобразование $z \rightarrow ze^{i\alpha}$ с фазовым множителем $e^{i\alpha}$. Решения, получающиеся друг из друга таким преобразованием, мы не будем считать различными. В частности, всегда можно считать z_0 – действительным при $z_0 \neq 0$.

2. Случай $n = 2$.

Он достаточно тривиален. Если комплексные числа интерпретировать как векторы на плоскости, то с $z = (z_0, z_1)$ и $Z = (Z_0, Z_1)$ связывается параллелограмм со сторонами z_0 и z_1 и диагоналями Z_0 и Z_1 . Решение существует, если можно построить треугольники со сторонами $|z_0|, |z_1|, |Z_0|$ и $|z_0|, |z_1|, |Z_1|$. Решение определяется с точностью до поворота параллелограмма вокруг начала координат, т.е. с точностью до фазового множителя и отражения его относительно одной из сторон.

3. Случай $n = 3$.

Здесь задаются величины $|z_0| = a, |z_1| = b, |z_2| = c$ и $|Z_0| = A, |Z_1| = B, |Z_2| = C$ и нужно установить условия, при которых эти величины определяют векторы $z = (z_0, z_1, z_2)$ и $Z = (Z_0, Z_1, Z_2)$. Без ограничения общности можно считать $a \geq b \geq c$ и $z_0 = a$ – действительным. Равенство Парсеваля позволяет выразить C через остальные величины. Рассмотрим сначала случай, когда среди a, b, c есть нулевые значения:

а) пусть $a = b = c = 0$, тогда $Z_0 = Z_1 = Z_2$. Решение единственно и существует при $A = B = C = 0$;

б) пусть $b = c = 0, a > 0$, тогда $Z_0 = Z_1 = Z_2 = a$. Вновь решение существует и единственно лишь при $A = B = C = a$;

в) пусть $c = 0, a$ и $b > 0$. Если положить $z_1 = be^{i\varphi}$, то уравнение $Z_0 = z_0 + z_1 + z_2$ дает $A^2 = a^2 + 2ab \cos \varphi + b^2$, т.е. A должно быть таким, чтобы из a, b, A можно построить треугольник. Если же треугольник вырожден, то $\varphi = 0$ или π , $A = a + b$ или $a - b$. Если же треугольник невырожден, то z_1 определяется с точностью до комплексного сопряжения. При этом B не может быть произвольным и однозначно определено по A, a и b .

Далее предполагается, что $a \geq b \geq c > 0$. Если положить $z_1 = be^{i\varphi_1}, z_2 = ce^{i\varphi_2}$, то уравнения (1) переписываются в виде

$$\begin{aligned} Z_0 &= a + be^{i\varphi_1} + ce^{i\varphi_2}, \\ Z_1 &= a + be^{i(\varphi_1 + 2\pi/3)} + ce^{i(\varphi_2 - 2\pi/3)}, \\ Z_2 &= a + be^{i(\varphi_1 - 2\pi/3)} + ce^{i(\varphi_2 + 2\pi/3)}. \end{aligned} \tag{4}$$

Подсчет модулей комплексных чисел в левых частях этих уравнений дает уравнения для φ_1, φ_2 :

$$\begin{aligned} A^2 &= a^2 + b^2 + c^2 + 2ab \cos \varphi_1 + 2ac \cos \varphi_2 + 2bc \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \\ B^2 &= a^2 + b^2 + c^2 + 2ab \cos(\varphi_1 + 2\pi/3) + 2ac \cos(\varphi_2 - 2\pi/3) + 2bc \cos(\varphi_1 - \varphi_2 - 2\pi/3). \end{aligned} \tag{5}$$

Значения φ_1 и φ_2 позволяют восстановить z_0, z_1, z_2 и Z_0, Z_1, Z_2 .

Поэтому достаточно исследовать систему уравнений (5), т.е. установить ее разрешимость относительно φ_1, φ_2 при подходящих значениях a, b, c и A, B, C .

Рассмотрим отображение

$$(\varphi_1, \varphi_2) \rightarrow (x, y), \tag{6}$$

где $x = A$ и $y = B$ из (5). Это отображение тора $T = \{(\varphi_1, \varphi_2) \mid \varphi_1, \varphi_2 \bmod 2\pi\}$ на плоскость R^2 . При заданных a, b, c необходимые и достаточные условия разрешимости (5) заключаются в принадлежности точки (A, B) образу этого отображения. Поскольку тор компактен, а отображение (6) гладкое, то образ T также компактен и его граница состоит из особых точек

отображения. Последние обращают в ноль якобиан $J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial x}{\partial \varphi_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial y}{\partial \varphi_2} \end{vmatrix}$.

После несложных преобразований условие $J = 0$ переписется в виде

$$-a \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + b \sin(2\varphi_1 - \varphi_2) + c \sin(2\varphi_2 - \varphi_1) = 0. \tag{7}$$

Несколько неожиданно, но (7) допускает явное решение, правда в параметрической форме. Оно получается следующим образом. Полагая $u = 2\varphi_1 - \varphi_2, v = 2\varphi_2 - \varphi_1$, перепишем

(7) в виде $\sin u(b - a \cos v) + \sin v(c - a \cos u) = 0$, откуда $\frac{\sin u}{c - a \cos u} = -\frac{\sin v}{b - a \cos v}$. Если ввести

параметр α так, чтобы обе части равенства были равны $\frac{\text{ctg } \alpha}{a}$, то получим

$$\cos(u - \alpha) = \frac{c}{a} \cos \alpha, \quad \cos(v + \alpha) = \frac{b}{a} \quad \text{и} \quad u = \alpha \neq \arccos\left(\frac{c}{a} \cos \alpha\right), \quad v = -\alpha \neq \arccos\left(\frac{b}{a} \cos \alpha\right).$$

При этом $\varphi_1 = \frac{1}{3}(2u + v), \varphi_2 = \frac{1}{3}(u + 2v)$.

Приведенные формулы (5)–(8) использовались при компьютерном счете, результаты которого некоторыми графиками.

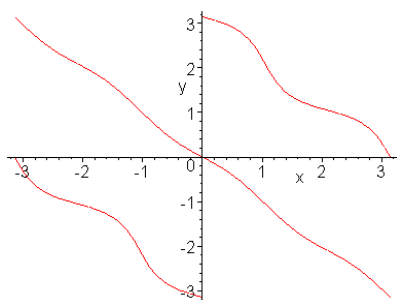


Рис. 1

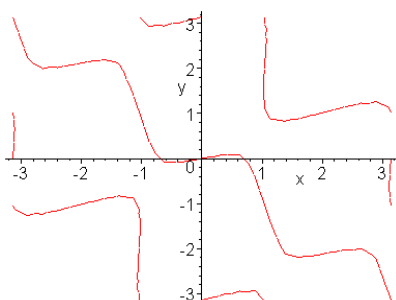


Рис. 2

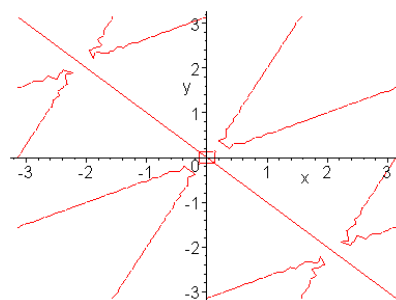


Рис. 3

Графики рис. 1–3 ($x = \varphi_1, y = \varphi_2$) изображают особые точки отображения (6), т.е. точки на торе, для которых $J = 0$. Значение a, b, c равны соответственно, 10, 4, 1; 5, 4, 1; 4, 4, 4.

При $a = b = c$ уравнения соответствующих линий допускают простую явную форму: $\varphi_2 = -\varphi_1, \varphi_2 = \frac{1}{2}\varphi_1 \pm \pi, \varphi_1 = \frac{1}{2}\varphi_2 \pm \pi$ (рис. 3 неточен из-за компьютерных погрешностей).

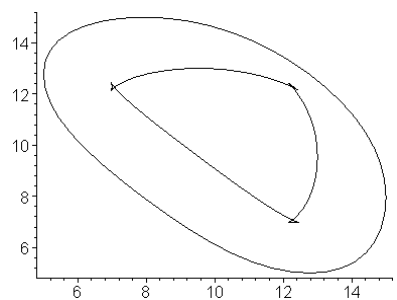


Рис. 4

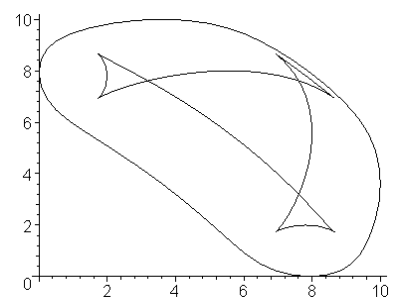


Рис. 5

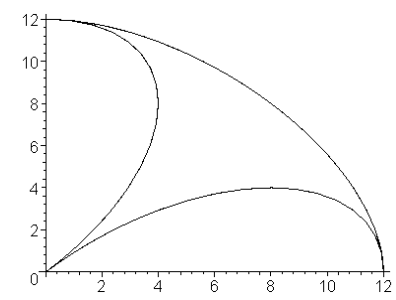


Рис. 6

Графики на рис. 4–6 изображают образы особых точек при отображении (6). Если $a = b = c$ не выполнено, то после удаления из тора особых точек он распадается на две компоненты, каждая из которых диффеоморфна внутренности кольца. При $a = b = c$ распадение уже происходит на 6 компонент. Каждая из них диффеоморфна внутренности круга.

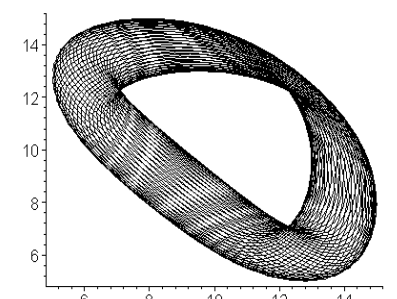


Рис. 7

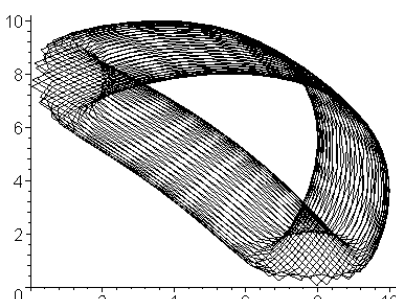


Рис. 8

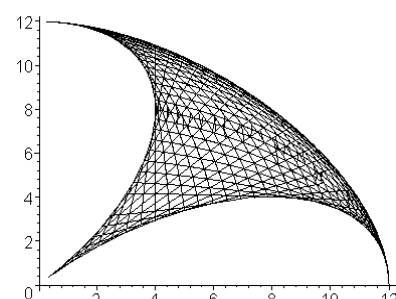


Рис. 9

Графики на рис. 7–9 изображают образы тора при отображении (6). Из них видно, что равенство Парсевалья не является достаточным условием существования решения исходной задачи. На них же можно видеть особенности отображения (6). В частности, области типа «ласточкин хвост» на рис. 7 и 8 соответствуют так называемым сборкам Уитни [3]. В обла-

стях вне особенностей число решений исходной задачи равно 2. Для рис. 9 число решений исходной задачи равно 6.

4. В заключение сделаем некоторые замечания для непрерывного случая, т.е. когда (волновая) функция $\psi(x)$ определена $(-\infty, +\infty)$. Хорошо известно, что $\psi(x)$ и $\psi^*(\omega)$ нельзя одновременно «локализовать», т.е. сделать их существенно отличными от нуля лишь в достаточно малых интервалах изменения аргументов. Это математическая интерпретация известного в квантовой механике «принципа неопределенности Гейзенберга».

Таким образом, и здесь выполнение равенства Парсеваля не является достаточным условием существования решения в задаче восстановления $\psi(x)$.

В исследовании вопроса о единственности решения, возможно, следующий пример представится достаточно поучительным. Пусть $\psi(x) = c_0\delta(x-x_0) + c_1\delta(x-x_1)$, где c_0, c_1 – комплексные константы, а $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака. Хотя говорить здесь о $|\psi(x)|$ затруднительно, но естественно считать заданным $|c_0|$ и $|c_1|$. Фурье-преобразование дает $\psi^*(\omega) = c_0e^{i\omega x_0} + c_1e^{i\omega x_1}$ и $|\psi^*(\omega)|^2 = |c_0|^2 + |c_1|^2 + 2|c_0||c_1|\cos(\omega(x_0 - x_1) + \varphi_0 - \varphi_1)$, где φ_0, φ_1 – аргументы в c_0 и c_1 .

Ясно, что задание $|\psi^*(x)|$ вполне определяет разность $\varphi_0 - \varphi_1$, откуда немедленно следует, что c_0 и c_1 определяются с точностью до «фазового» множителя. Этот результат вселяет некоторый оптимизм в отношении ситуации общего случая.

Библиографический список

1. Ландау, Л. Д. Квантовая механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М.: Наука, 1989.
2. Сергиенко, Д.Б. Цифровая обработка сигналов / Д.Б. Сергиенко. – СПб., 2006.
3. Арнольд, В. И. Особенности дифференцируемых отображений / В. И. Арнольд, Л.Н. Варченко, С.М. Гусейн-Заде. – М.: Наука, 1982. Т. 1.

Дата поступления
в редакцию 05.02.2015

V.M. Galkin, I.N. Tolkachev, N.V. Yurova

A PROBLEM FROM FOURIER ANALYSIS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The article raises the problem of reconstruction of the wave function of a quantum particle on probabilistic distributions of its coordinates and velocities.

Design/methodology/approach: We study the model associated with the discrete Fourier transform. It is established that the Parseval equality is not a sufficient condition for the existence of solutions.

Findings: It is established the solutions of the problem in the model is not unique.

Research limitations/implications: Generally speaking this article entails some new interesting questions in analysis and physics.

Originality/value All results are new.

Key words: wave function, discrete Fourier transform, differentiable mappings, uncertainty relation.

НАШИ АВТОРЫ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Абубакиров Булат Абдрахманович – ведущий инженер отд.3.2 ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова» 8-831-469-20-25

Барина Валентина Федоровна – ведущий инженер-программист НГТУ;

physics@nntu.nnov.ru

Белов Юрий Георгиевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ; trt@nntu.nnov.ru.

Богомолова Людмила Юрьевна – аспирант НГТУ; 436-82-71.

Ворошилов Борис Иванович – глав. конструктор ЭКБ «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»; 465-42-81

Есипенко Валентин Иванович – д-р физ. мат. наук, профессор НГТУ; 436-82-71.

Когтева Людмила Владимировна – канд. техн. наук, доцент НГТУ; 8-831-436-03-81

Львов Анатолий Егорович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, нач. отдела 3.2 ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова»; 8-831-469-20-25

Малахов Василий Алексеевич – д-р. техн. наук, профессор НГТУ;

physics@nntu.nnov.ru.

Нефедьев Илья Алексеевич – ассистент НГТУ; trt@nntu.nnov.ru.

Новоселова Наталия Анатольевна – канд.

техн. наук, доцент НГТУ;

physics@nntu.nnov.ru

Панков Сергей Васильевич – начальник сектора 3.2.4 ОАО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» им. А.П. Горшкова»;

8-831-469-20-25

Рудясова Людмила Григорьевна – канд. техн. наук, доцент НГТУ;

physics@nntu.nnov.ru

Шишков Глеб Иванович – канд. техн. наук, профессор НГТУ; 8-831-436-82-33

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМ

Алексеев Сергей Николаевич – д-р. физ.-мат. наук, профессор НГТУ;

sn-alekseenko@yandex.ru

Нагорных Сергей Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ; algoritm@sandy.ru

Рязанцева Ирина Прокофьевна – д-р. физ.-мат. наук, профессор НГТУ; lryazantseva@applmath.ru

Савина Ольга Николаевна – д-р физ.-мат. наук, профессор НИУ ВШЭ Нижний Новгород; ONSavina@mail.ru

Петров Кирилл Геннадьевич – аспирант НГТУ; yamasakuro@mail.ru

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Бабанов Николай Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, проректор по научной работе НГТУ; babanov@nntu.nnov.ru.

Куликов Андрей Анатольевич – аспирант НГТУ; 8-9506247343.

Ларцов Сергей Викторович – д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник УНИИИР НГТУ; sul@ggc.nnov.ru.

Самарин Валерий Павлович – канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер УНИИИР НГТУ; 436-63-12.

Никулин Евгений Александрович – канд. техн. наук, доцент НГТУ; nea@mail.nnov.ru

Ермилов Андрей Эдуардович – магистрант НГТУ; railwaythebest@rambler.ru

Мисевич Павел Валерьевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ; p_misevich@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Басова Евгения Владимировна –

канд. техн. наук, старший преподаватель Национального технического университета Харьковского политехнического института; leo_surpriz@mail.ru

Маслов Геннадий Васильевич – д-р техн. наук, профессор, старш. науч. сотрудник НГТУ; MaslovGV@gmail.com

Фролова Ирина Николаевна – канд. техн. наук, доцент, начальник бюро ОАО ПКО «Теплообменник»; fririnik@mail.ru

Поздышев Анатолий Иванович – доцент НГТУ им. П.Е. Алексеева; omd@nntu.nnov.ru

Курников Николай Александрович – главный сварщик ОАО «НАЗ «Сокол»;
ekaterina-pigalova@yandex.ru

Пигалова Екатерина Александровна – начальник конструкторско-технологического бюро сварки ОАО «НАЗ «Сокол»;
ekaterina-pigalova@yandex.ru

Гребнева Татьяна Николаевна – ст. преподаватель НГТУ;
tkm@nntu.nnov.ru

Куликова Елена Анатольевна – канд. техн. наук, доцент НГТУ;
tkm@nntu.nnov.ru

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Бирюков Владимир Валерьевич – канд. техн. наук, доцент;
physics@nntu.nnov.ru.

Захаров Сергей Юрьевич – ведущ. инженер-электроник НГТУ;
physics@nntu.nnov.ru.

Малахов Василий Алексеевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ;
physics@nntu.nnov.ru.

Раевский Алексей Сергеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор зав. кафедрой НГТУ;
raevsky@nntu.nnov.ru.

Баринов Александр Александрович – магистрант НГТУ; lxbarinov92@mail.ru

Бородина Вера Евгеньевна – магистрант НГТУ; veb91@mail.ru

Дмитриев Сергей Михайлович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ;
nntu@nntu.nnov.ru

Игнатов Евгений Дмитриевич – магистрант НГТУ; ignatov.e@mail.ru

Табекин Александр Андреевич – магистрант НГТУ; tabekin91@gmail.com

Хробостов Александр Евгеньевич – канд. техн. наук., доцент, директор ИЯЭиТФ НГТУ;
khrobostov@nntu.nnov.ru

Доронков Денис Владимирович – аспирант НГТУ; nevid000@mail.ru

Легчанов Максим Александрович – канд. техн. наук, доцент, зам. директора ИЯЭиТФ НГТУ; legchanov@mail.ru

Полозкова Екатерина Николаевна – магистрант кафедры «Атомные и тепловые станции»; polozkova-ekaterina@yandex.ru

Пронин Алексей Николаевич – аспирант НГТУ; proninaleksei@mail.ru

Безносков Александр Викторович – д-р техн. наук, профессор НГТУ;

besnosov@nntu.nnov.ru

Боков Павел Андреевич – аспирант НГТУ;
besnosov@nntu.nnov.ru

Зудин Артем Дмитриевич – аспирант НГТУ;
besnosov@nntu.nnov.ru

Львов Александр Вячеславович – аспирант НГТУ; besnosov@nntu.nnov.ru

Бокова Татьяна Александровна – к.т.н., доцент кафедры «АТС» НГТУ

Трушков Никита Владимирович – магистрант НГТУ;

besnosov@nntu.nnov.ru

Новожилова Ольга Олеговна – доцент кафедры «БИЯМ» НГТУ

besnosov@nntu.nnov.ru

Соловьев Александр Олегович – магистрант НГТУ; besnosov@nntu.nnov.ru

Бирюков Владимир Валерьевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ;

physics@nntu.nnov.ru.

Захаров Сергей Юрьевич – ведущий инженер-электроник НГТУ; physics@nntu.nnov.ru.

Малахов Василий Алексеевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ;

physics@nntu.nnov.ru.

Раевский Алексей Сергеевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ;

raevsky@nntu.nnov.ru.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Бутин Данила Александрович – инженер НГТУ; (831) 201-04-15

Беляков Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор, начальник УНИиР НГТУ;
(831) 436-56-72

Васильев Алексей Анатольевич – инженер НГТУ; (831) 201-04-15

Мошков Павел Сергеевич – инженер НГТУ;
(831) 201-04-15

Мусарский Роман Абрамович – д-р техн. наук, профессор гл. научн. сотрудник гл. научн. сотрудник НГТУ;
(831) 201-04-15

Суворов Илья Александрович – аспирант НГТУ; (831) 201-04-15

Торопов Евгений Иванович – инженер НГТУ; (831) 201-04-15

Степанов Евгений Владимирович – инженер НГТУ; (831) 201-04-15

Костин Сергей Юрьевич – заведующий лабораторией НИЛ ТИС НГТУ;
(831) 201-04-15

Гончаров Кирилл Олегович – канд. техн. наук, зам. директора ИТС НГТУ; (831) 436-63-64

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

Гуров Пётр Владиславович – канд. техн. наук, доцент НГТУ; ksf6@nntu.nnov.ru

Зуев Валерий Андреевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ; ship@nntu.nnov.ru

Костылев Константин Андреевич – ведущ. конструктор 710 отдела ИПФ РАН (центр гидроакустики), аспирант НГТУ; kostylev@appl.sci-nnov.ru.

Нгуен Чунг Ань – аспирант ФГОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет»; astrakhan.nta58@gmail.com

Лубенко Владимир Николаевич – д-р техн. наук, профессор ФГОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет» dr_lubenko@rambler.ru

Францев Михаил Эрнстович – канд. техн. наук, директор инжиниринговой компании «Нептун-Судомонтаж»; gepard629@yandex.ru

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Безменова Надежда Валерьевна – канд. техн. наук, доцент Самарского государственного технического университета; saidova_nadezhda@mail.ru

Аверьянова Ксения Сергеевна – студент Самарского государственного технического университета; aeas@rambler.ru

Соснина Елена Николаевна – д-р техн. наук, профессор НГТУ; sosnyna@yandex.ru

Шалухо Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент НГТУ; shaluhho.andrey@mail.ru

Анисимов Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, руководитель проектов ООО «Теком» (Нижний Новгород); sergey.anisimov@inbox.ru

Липужин Иван Алексеевич – аспирант НГТУ; lip90@yandex.ru

Смирнов Артем Алексеевич, магистрант НГТУ; artyosmirnov@gmail.com

Тихомиров Владимир Анатольевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ; Vat45.tikhomirov@yandex.ru

Свердлик Григорий Владимирович – канд. техн. наук, директор ООО «Экологические технологии»; Gregory@ecopapers.ru

Панфилов Иван Сергеевич – инженер ОАО «НПП «Полет»», аспирант НГТУ; mfnn@mail.ru

Чивенков Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент, профессор НГТУ; chyvenkov@mail.ru

Панфилов Сергей Юрьевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ; Yurevich.sergej@mail.ru

Вихорев Николай Николаевич – аспирант, инженер НГТУ; Rico2000@yandex.ru

Гедифа Ахмед – аспирант НГТУ; ghedifahmed@yahoo.fr.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Гончар Александр Викторович – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИПМ РАН (Н.Новгород); imndt31@mts-nn.ru

Леушин Игорь Олегович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ; igoleu@yandex.ru

Лычагов Алексей Сергеевич – инженер-технолог ОАО «НИТЕЛ», аспирант НГТУ; cskalex@rambler.ru

Руденко Александр Леонидович – главн. инженер ДП АО «Волга-СГЭМ» «Камспец-энерго»; ral-1@mail.ru

Миронов Анатолий Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой НГТУ; miran56@mail.ru

Мишакин Василий Васильевич – д-р техн. наук, зав. лабораторией ИПМ РАН (Н. Новгород); imndt31@mts-nn.ru

Трифонов Роман Владимирович – начальник литейного цеха ОАО «НИТЕЛ»; rvtrifonov@yandex.ru

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

Крохоняткин Михаил Дмитриевич – канд. экон. наук, доцент НГТУ; krom-nn@yandex.ru

Крылов Алексей Аркадьевич – д-р эконом. наук, профессор, советник генерального директора ОАО «Институт микроэкономики»; aakrylov@mail.ru

Митяков Евгений Сергеевич – канд. эконом. наук, доцент НГТУ; iyao@mail.ru

МАКРОМИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Грязев Алексей Александрович – аспирант Арзамасского политехнического института (филиала НГТУ); apu@apingtu.edu.ru
alekseygryazev@gmail.com

Денисов Роман Андреевич – ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро», начальник; romildo@yandex.ru

Обухов Василий Иванович – канд. техн. наук, доцент Арзамасского политехнического института (филиала НГТУ); obuchov@apingtu.edu.ru

Желтова Наталья Николаевна – аспирант Арзамасского политехнического института (филиала НГТУ); 2008nataly@list.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

<p>Хватова Елена Михайловна – д-р мед. наук, профессор, заслуженный деятель науки</p>
--

Ивлева Анна Сергеевна – студент НИУ ВШЭ (Нижегородский филиал); anjailveva@mail.ru

Ошмарина Ольга Евгеньевна – канд. физ.-мат. наук, доцент НИУ ВШЭ (Нижегородский филиал); oshmarina@hse.ru

Галкин Владимир Михайлович – д-р. физ.-мат. наук, профессор НГТУ; vm@nntu.nnov.ru

Толкачев Иван Николаевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ; vm@nntu.nnov.ru

Мошкова Альбина Николаевна – д-р биолог. наук, профессор; anmoshkova@mail.ru

Ерлыкина Елена Ивановна – д-р биолог. наук, профессор, зав. кафедрой НГМА; e-erlyk@yandex.ru

Тежикова Надежда Петровна – начальник отдела информационных систем НГТУ; tejikova@nntu.nnov.ru

Шадрина Елена Викторовна – старш. преподаватель кафедры НИУ ВШЭ (Нижегородский филиал); eshadrina@hse.ru

Юрова Надежда Вячеславовна – старш. преподаватель НГТУ; vm@nntu.nnov.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The name of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
Телефон: 8(920)00-37-877
E-mail: rsl@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 строго 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, подрисуночная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией 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

№ 1 (108)

Редакторы: Т.В. Третьякова, Е.В. Комарова
Технический редактор Т.П. Новикова

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@ntu.nnov.ru

Подписано в печать 12.03.2015. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 37,5. 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»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013