

УДК 624.074.432(539.374)

С.В. Кожевников, С.А. Пименов

**ПРИМЕНЕНИЕ ПО АРКОН RELIABILITY SOLVER ДЛЯ ОЦЕНКИ
ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» г. Нижний Новгород
(филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова»)

Рассматриваются методы оценки вероятности безотказной работы программно-технических средств автоматизированных систем управления технологическими процессами атомных электростанций, в том числе конструкций радиоэлектронной аппаратуры. Приведена методология оценки вероятности безотказной работы с использованием современного отечественного программного обеспечения АРКОН Reliability Solver. Сделан вывод о его применимости для решения как квазистатических задач, так и задач с динамическими случайными нагрузками. Ввиду общности принципа построения большого числа радио-электронной аппаратуры возможно применение разработанного программного обеспечения для широкого круга конструкций. Приведен алгоритм расчета и общая последовательность действий, необходимых для проведения анализа конструкций для определения вероятности безотказной работы. Предоставлены геометрические и расчетные модели тестовой конструкции. Построены графики откликов конструкции на эксплуатационные механические воздействия.

С применением программного обеспечения АРКОН Reliability Solver проведена отработка рабочего процесса расчета вероятности безотказной работы для конструкций программно-технических средств, разработанных для действующих и вводимых в эксплуатацию атомных электростанций.

Ключевые слова: надежность, метод конечных элементов, долговечность, вероятность безотказной работы, радиоэлектронная аппаратура.

Введение

Определение прочности, вероятности безотказной работы, долговечности конструкций является важным элементом современного этапа развития техники и технологии.

Сложный характер взаимодействия различных составляющих конструкций, в том числе конструкций радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), с окружающей средой, между собой, случайная природа прочности материалов и условий эксплуатации, неточность сведений о характере напряженного состояния и условий разрушения (отказа) элементов конструкции требуют в расчетах на прочность и долговечность применения вероятностных методов анализа и использования в качестве критериев показателей надежности.

В отличие от расчетных задач на прочность, задачи оценки вероятности безотказной работы конструкций – принципиально другой класс. Данный класс задач появляется тогда, когда необходимо учесть стохастичность механических свойств материалов конструкции, случайность геометрических характеристик, нагрузки вероятностного характера.

На текущий момент достаточно хорошо разработаны методы и подходы к оценке вероятности безотказной работы на основе модели «нагрузка-прочность» [1, 3, 4, 8]. Одной из программных реализаций метода оценки вероятности безотказной работы на основе указанной модели является программное обеспечение (ПО) АРКОН Reliability Solver, которое интегрируется в САПР NX.

Основная область применения ПО АРКОН Reliability Solver – это решение квазистатических задач надежности, задач, в которых случайные факторы описываются при помощи

конечного числа случайных величин. Область применения не ограничивается случаями, когда нагрузки изменяются медленно (квазистатически). Допускается применение ПО и при случайных динамических нагрузках, представленных в виде детерминированных функций, зависящих от конечного числа случайных величин. Например: ударные воздействия, форма импульса которых неизменна, а амплитуда и длительность представлены как случайные величины; синусоидальная вибрация, где амплитуда и частота – случайные величины. Решатель ПО АРКОН Reliability Solver применим также, когда случайные процессы можно заменить одномерными случайными величинами, образованными из «сечений» случайного процесса. Возможно также решить классическую задачу статистической механики с точки зрения теории надежности, т.е. вычислить вероятность безотказной работы с учетом случайного нагружения (например, заданного в виде широкополосной случайной вибрации) и случайных факторов на уровне геометрии и свойств материалов конструкции.

ПО АРКОН Reliability Solver достаточно универсальное и может быть использовано для проведения расчетов для оценки вероятности безотказной работы достаточно широкого ряда конструкций. Отдельно следует остановиться на ряде специфических задач оценки вероятности безотказной работы применительно к конструкциям РЭА.

Специфика задачи здесь следующая – для достаточно большого числа РЭА, построенных по модульному принципу, допускается так называемый вариативный монтаж электронных компонентов. Например, для специализированных серверных шкафов (шкафов с сетевым оборудованием), в которых располагаются однотипные (или одинаковые) электронные модули, допускается некоторый разброс по вертикали для мест установки оборудования (рис. 2). Аналогичным образом допускается вариативный монтаж плат расширения или «модулей памяти» в РЭА (рис. 1). Все это влияет как на расположение центра тяжести (монтируемое оборудование может иметь значительный вес), собственные частоты, так и на уровень напряжений, деформаций и вероятность безотказной работы конструкции в целом.

Учитывая, что для РЭА, как правило, присутствуют требования по ударовибростойкости, ставится задача оценить вероятность безотказной работы при динамическом нагружении в случае вариативного монтажа электронных компонентов.

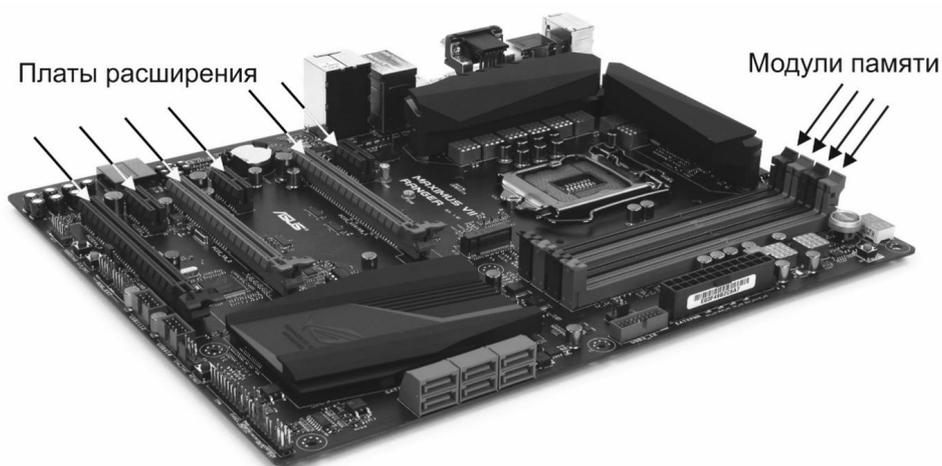


Рис. 1. Расположение плат расширения и «модулей памяти»

Такая задача решается в ПО АРКОН Reliability Solver путем ввода определяющего параметра в виде случайной координаты установки КЭМ сборочной единицы в общей КЭМ сборке. Случайная координата задаётся в виде вариационного ряда. Далее производится итерационный расчет с учетом всех возможных вариантов событий (вариантов установки электронных компонентов). Кроме этого, могут быть учтены и другие случайные факторы (стохастичность механических свойств материалов конструкции, случайность геометрических характеристик, нагрузки вероятностного характера).

Пример расчета

В данном разделе рассматривается пример оценки вероятности безотказной работы секции УСУ-НВ из состава программно-технических средств (ПТС) автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомных электростанций (АЭС). Разработчиком является филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седатова». Оценка вероятности безотказной работы производится с применением ПО ARKON Reliability Solver на базе расчетного процессора NX Nastran [7].

Постановка задачи и исходные данные

Секция УСУ-НВ представляет собой шкаф с установленными в нем электронными блоками. Масса секции УСУ-НВ составляет 350 кг.

Шкаф состоит из элементов несущей конструкции: прямоугольного каркаса, сваренного из особо жесткого профиля, передней вибростойкой двери с замком, задней вибростойкой двери с замком, верхней съемной крышки, комплекта сейсмостойкого усиления. Дно шкафа состоит из съемных панелей. Внизу каркаса шкафа расположены вводные кабельные панели с гермовводами для подводки внешних соединительных кабелей. Над вводными кабельными панелями установлены шины с кабельными зажимами для закрепления внешних кабелей.

Внутри шкафа установлены 19" адаптеры, на которые монтируется оборудование – электронные модули (рис. 2). Конструктивно это оборудование установлено друг над другом так, чтобы расположенные на их лицевой панели элементы индикации, управления и подключения были видны и доступны при открытой двери. При монтаже допускается некоторый разброс по вертикали для мест установки оборудования. Таким образом, имеет место вариативный монтаж электронных модулей оборудования. Секция УСУ-НВ приведена на рис. 2.

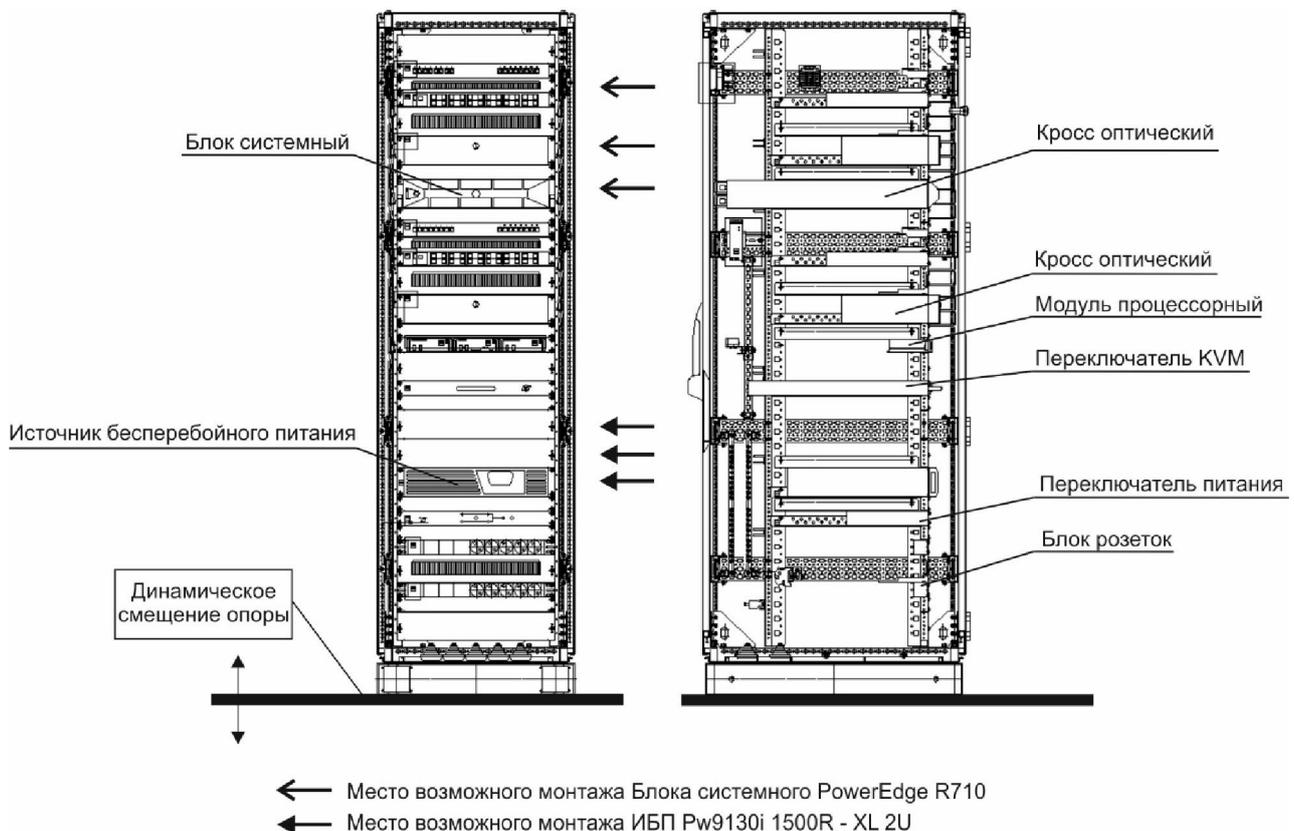


Рис. 2. Расположение оборудования в секции УСУ-НВ

Наиболее тяжелое монтируемое оборудование: блок системный PowerEdge R710 – масса 17,7 кг; источник бесперебойного питания ИБП PW9130i 1500R – XL 2U (ф. POWERWARE) – масса 19,5 кг. При монтаже допускается любое (вариативное) положение установки данного оборудования в рамках заданного диапазона высот (рис. 2). Учитывая, что 19" адаптеры имеют специальные отверстия для крепления по всей длине и расстояние между отверстиями достаточно мало по сравнению с размерами монтируемого оборудования, примем случайную величину в виде координаты установки КЭМ сборочной единицы как непрерывную. При этом расчетные исследования проводятся только для трех положений установки оборудования, остальные положения учитываются путем выравнивания статистического распределения нагрузки исходя из того, что координата установки принята непрерывной случайной величиной. Все возможные состояния приняты равновероятными.

Основная задача – оценить вероятности безотказной работы конструкции ПТС УСУ-НВ при динамическом нагружении в случае вариативного монтажа электронных модулей.

При оценке вероятности безотказной работы речь идет о нарушении работоспособного состояния ПТС как системы (нарушение функционирования приборов, работы электросети, возможные разъединения электрических разъемов, локальные отключения приборов в составе ПТС и т.п., которые расположены на несущей конструкции, в том числе и в местах возможных пластических деформаций). Для несущей конструкции, согласно ГОСТ 25804.3-83, в ТЗ на разработку ПТС вводится критерий работоспособности по достижению уровня предела текучести, а также вводится нижняя граница вероятности безотказной работы.

Материал несущей конструкции импортный, по своим характеристикам соответствует отечественной стали 20 с учетом химико-термической обработки (табл. 1).

Вариационный ряд параметра σ_T определяется по результатам статистических данных входного контроля.

Таблица 1

Физические характеристики конструкционного материала

Е, Па	σ_T , МПа	σ_B , МПа	μ	ρ , кг/м ³
$2 \cdot 10^{11}$	290-340	490-590	0,28	7820

В табл. 1 основные обозначения: Е – модуль Юнга; σ_T – предел текучести; σ_B – предел прочности; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность.

Условия динамического нагружения (воздействие в вертикальном направлении, динамическое смещение опоры, рис. 1) представлены в виде обобщенного спектра отклика от сейсмического воздействия уровня ПЗ на отметке 0.00 м и до отметки +20.00 м включительно (рис. 3).

Оценка вероятности безотказной работы конструкции ПТС методом статистического моделирования с вычислением НДС на основе МКЭ [2, 7] проводилась на ЭВМ с применением ПО АРКОН Reliability Solver – расчетный модуль для САПР NX версии 7 или более. Вычислительная технология и общий алгоритм действий представлены в [4, 5].

На первом этапе в САПР NX строится параметрическая трехмерная модель (рис. 2) с учетом определяющих параметров: предел текучести; вариативные координаты установки блока системного PowerEdge R710 и источника бесперебойного питания ИБП PW9130i 1500R – XL 2U. Итого 9 рассматриваемых вариантов событий (event 1-9).

На втором этапе строится КЭМ и РМ конструкции (рис. 4).

На третьем этапе производится итерационный расчет на динамическое воздействие с

учетом рассматриваемых вариантов событий (event 1-9). Динамический расчет производится в два расчетных шага для варианта события:

- 1 - расчет собственных частот;
- 2 - расчет для контрольного узла динамического отклика модели конструкции на нагрузку в частотной области.

В качестве контрольного узла рассматривается один из узлов вместе с максимальными напряжениями (это место принято в качестве слабейшего звена конструкции).

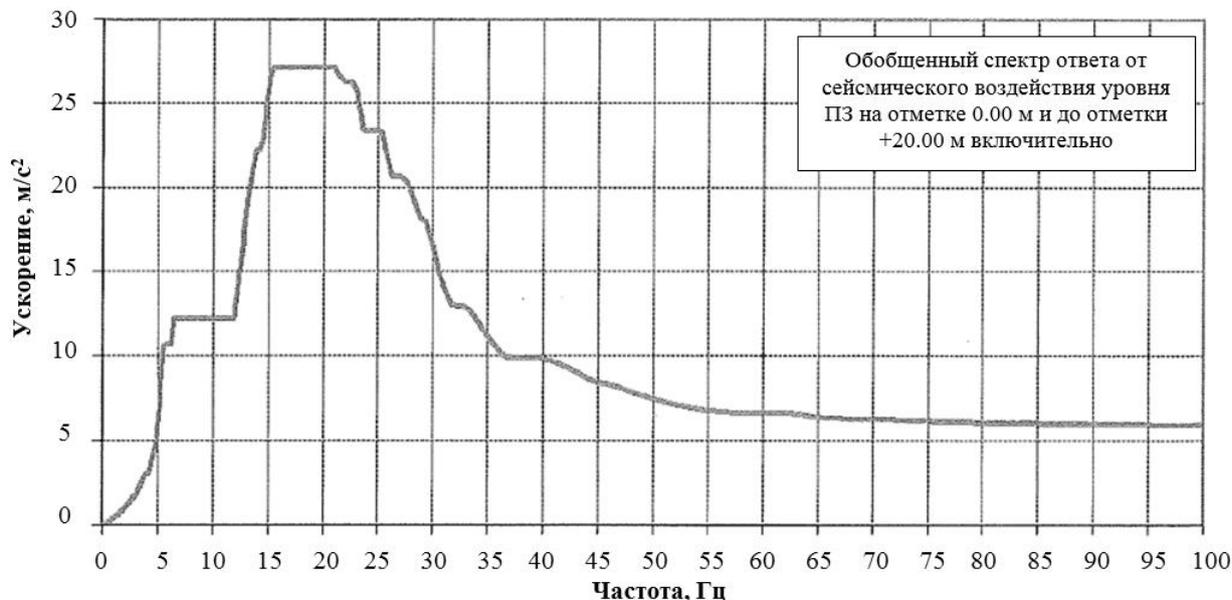


Рис. 3. Обобщенный спектр отклика от сейсмического воздействия уровня ПЗ на отметке 0.00 м и до отметки +20.00 м включительно
Проведение оценки вероятности безотказной работы конструкции ПТС

Результат расчета собственных частот для одного из вариантов событий представлен на рис. 5. Положение контрольного узла (узел № 48326) показано на рис. 6. Графики откликов в контрольном узле с учетом рассматриваемых вариантов событий (event 1-9) представлены на рис. 7. На основе графиков откликов в контрольном узле формируется вариационный ряд нагрузки для алгоритмов ПО АРКОН Reliability Solver. Вариационный ряд нагрузки с учетом рассматриваемых вариантов событий (event 1-9) представлен в табл. 2.

На четвертом этапе с учетом вариационных рядов нагрузки и несущей способности производится расчет оценки вероятности безотказной работы с применением ПО АРКОН Reliability Solver. Результаты расчета приведены на рис. 8, 9.

На рис. 8 приведены выравненные статистические распределения нагрузки и несущей способности. Для выравнивания в ПО АРКОН Reliability Solve используются специальные аппроксимирующие технологии. Выравнивание статистических данных производится автоматизировано с применением полиномиальных функций, полученные функции проверяются по критерию Пирсона [6] и критерию Колмогорова [6].

Следует заметить, что всегда имеет место наличие некоторых расхождений между теоретической кривой (как бы она хорошо подобрана не была) и статистическим распределением. Является ли это расхождение приемлемым с учетом ограниченного объема наблюдений (выборки) или расхождение значительное, связанное с тем, что подобранная кривая плохо выравнивает данное статистическое распределение? Для ответа на этот вопрос служат критерии согласия, и в данном случае, как ранее было заявлено, это критерий Пирсона [6] и критерий Колмогорова [6]. В данном расчете оба критерия показали, что расхождение незначительное.

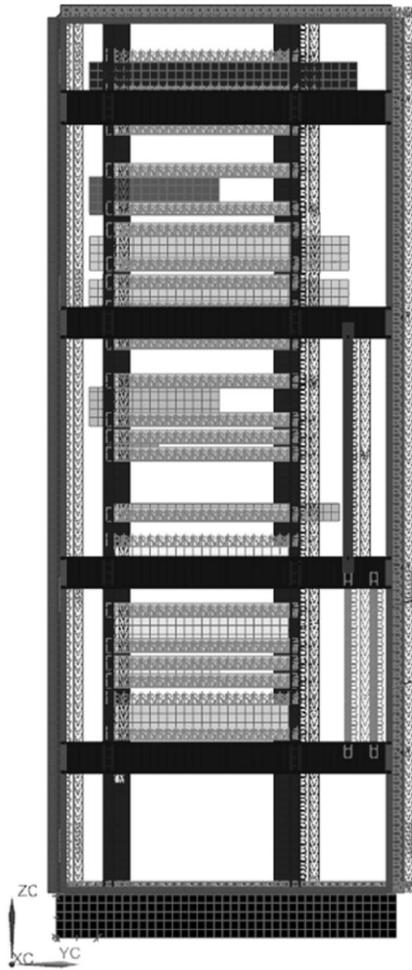


Рис. 4. Конечно-элементная модель конструкции

assembly1_sim1 : Solution 1 Результат
 Subcase - Dynamics, Режим 34, 3.448e+001 Гц
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.000, Макс. : 0.694, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

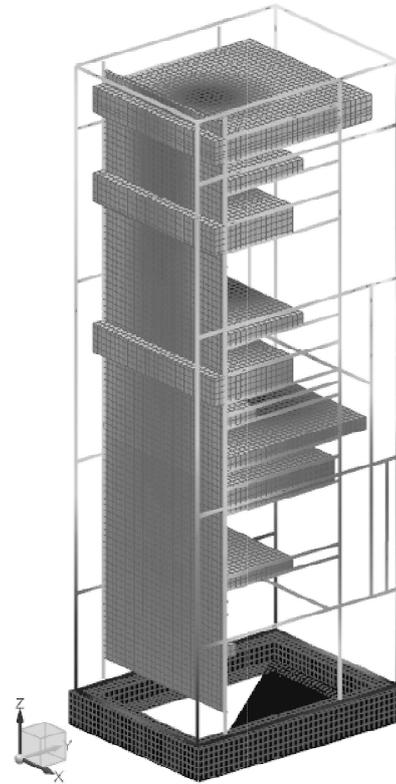


Рис. 5. Результат расчета собственных частот

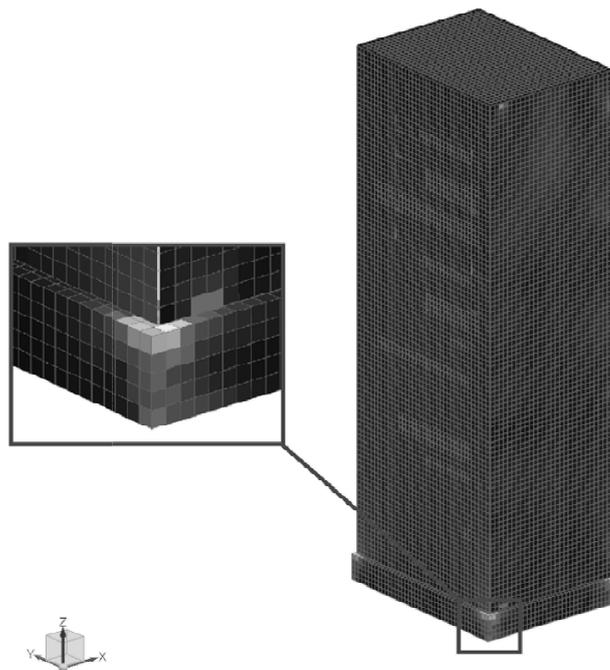


Рис. 6. Положение контрольного узла (узел № 48326)

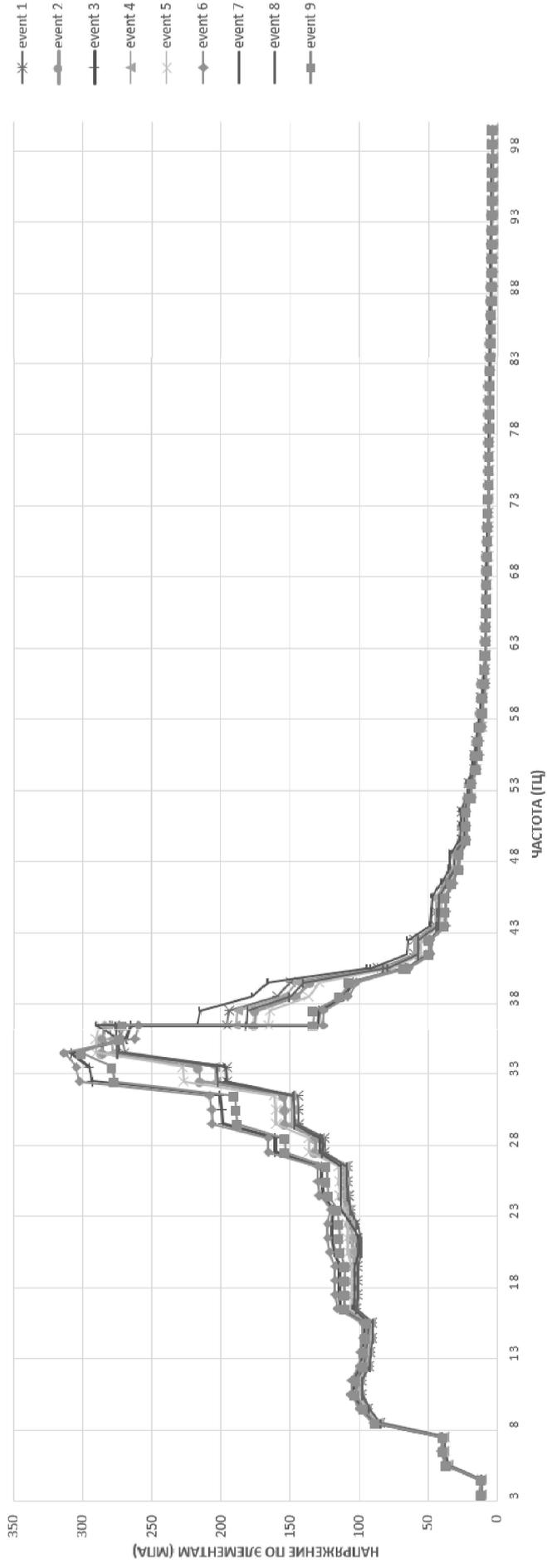


Рис. 7. Графики откликов в контрольном узле с учетом возможных вариантов событий (event 1-9)

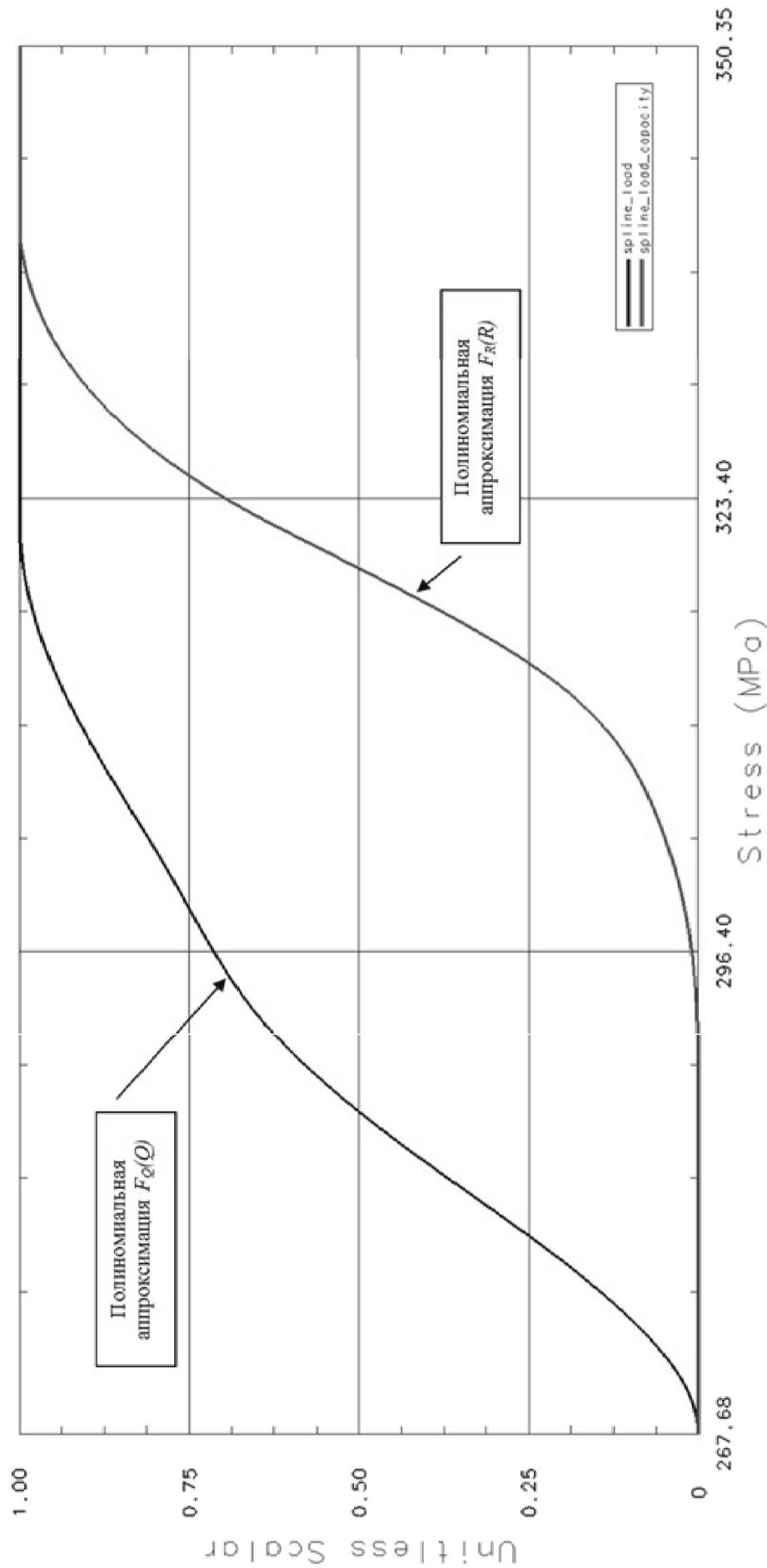


Рис. 8. Эмпирическая функция распределения нагрузки $F_Q(Q)$ - полиномиальная аппроксимация, полученная с применением метода статистического моделирования на основе расчетов напряжений МКЭ, и эмпирическая функция распределения несущей способности $F_R(R)$ - полиномиальная аппроксимация

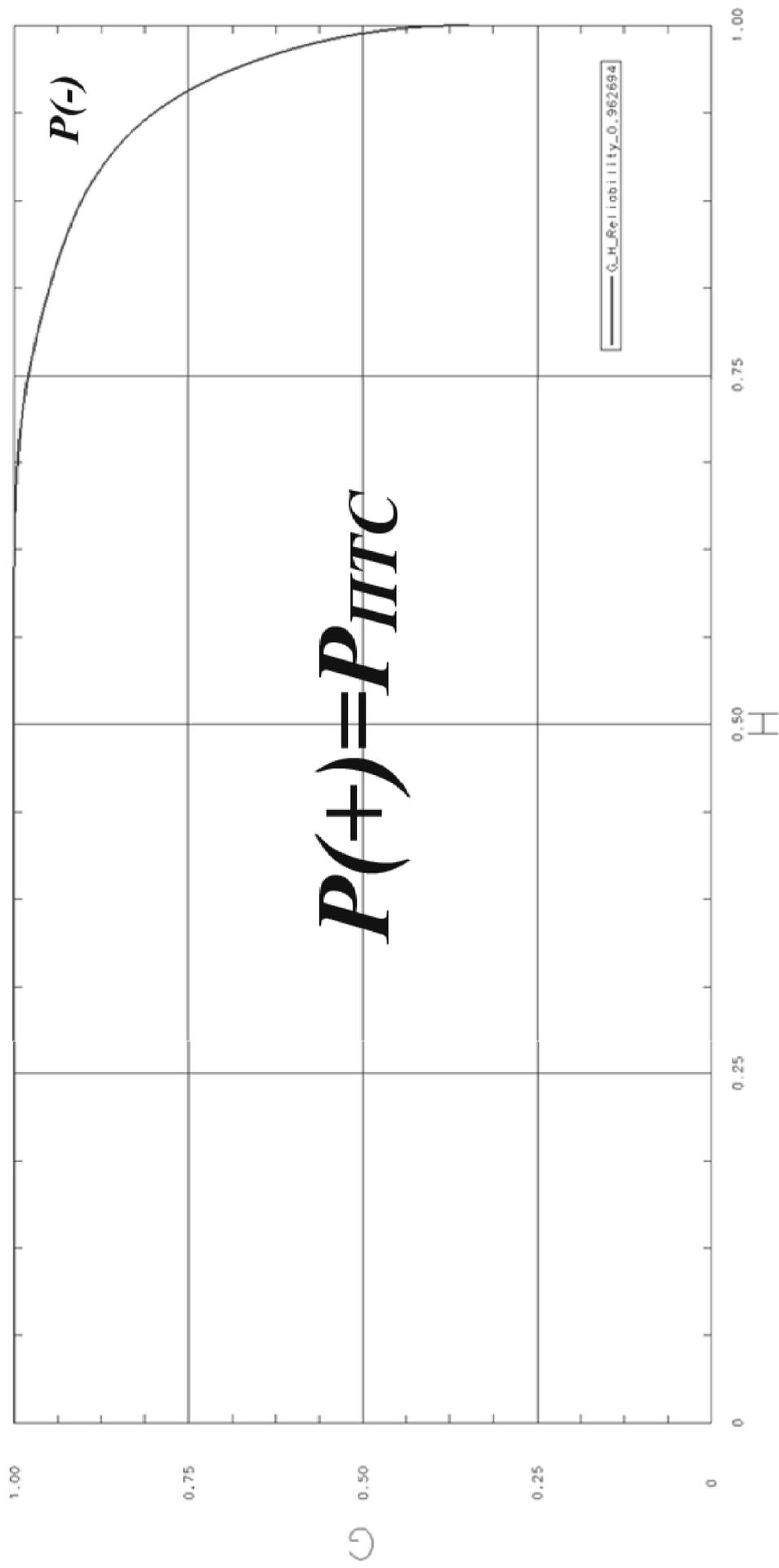


Рис. 9. Графики зависимости G от H , полученные для функций $F_R(R)$ и $F_Q(Q)$ при их полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов с алгоритмом автоматического выбора порядка полинома

Таблица 2

Вариационный ряд нагрузки с учетом возможных вариантов событий (event 1-9)

Возможные варианты событий (event 1-9)	Частота, Гц	КУ № 48326, напряжения по Мизесу, МПа
1	36.21	277.1
2	35.62	286.0
3	34.48	309.2
4	36.21	281.5
5	34.48	290.4
6	34.48	313.4
7	36.21	290.7
8	36.21	276.3
9	34.48	301.0

Анализ результатов

С учетом исходных данных, вероятность безотказной работы секции УСУ-НВ в случае вариативного монтажа электронных модулей, полученная с применением метода статистического моделирования на основе вычисления напряжений МКЭ, составляет: $P_{ПТС} = 96.2694\%$ - при полиномиальной аппроксимации эмпирических функций распределения $F_R(R)$ и $F_Q(Q)$ с помощью метода наименьших квадратов с алгоритмом автоматического выбора порядка полинома (рис. 8, 9).

Учитывая, что в качестве несущей способности выбран предел текучести, полученная вероятность безотказной работы $P_{ПТС} = 96.2694\%$ секции УСУ-НВ, при динамическом нагружении (в виде обобщенного спектра отклика от сейсмического воздействия уровня ПЗ) и вариативном монтаже электронных модулей является удовлетворительной (принимаемая в ТЗ нижняя граница вероятности безотказной работы несущей конструкции ПТС при сейсмическом воздействии $[N]=95\%$).

Заключение

ПО АРКОН Reliability Solver на базе расчетного процессора NX Nastran [7] достаточно хорошо себя зарекомендовало в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» и использовалось при проведении расчетной отработки следующих конструкций ПТС: секции ОМС и СУЗ ЭБ №3 Ростовской АЭС (отчет № 199-974/42-01.03.2013); секции СНЭ, ЭЧ и СУЗ ЭБ №1,2 Ленинградской АЭС-2 (отчет № 199-801-07-85-15.11.2013); секции СНЭ, ОМС ЭБ №4 Белоярской АЭС (отчет № 199-801-07-88-29.11.2013); опытный образец секции ПБ Нововоронежской АЭС-2 (отчет № 199-801-07-12-17.02.2014).

Библиографический список

1. Волков, В.М. Надежность машин и тонкостенных конструкций: учеб. пособие / В.М. Волков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. – 365 с.
2. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. Капур, К. Надежность и проектирование систем/ К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Изд-во «Мир», 1980. – 604 с.
4. Пименов, С.А. Применение численных методов для оценки надежности конструкций [Текст]/ С.А. Пименов // Новые промышленные технологии. – 2010. – №3. – С. 55–57.
5. Пименов, С.А. Применение рекурсивных алгоритмов при оценке надежности конструкций / С.А. Пименов, И.Ю. Палкин // Научно-технические технологии. – 2011. – №4. – С. 39–43.
6. Зажигаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента / Л.С. Зажигаев, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков – М.: Атомиздат, 1978. – 231 с.

7. NX Nastran Numerical Methods User's Guide [Electronic version]/ -UGS, 2005. - From: http://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/custom/numerical/numerical.pdf
8. Probabilistic Design Methodology for Composite Aircraft Structures, National Technical Information Service (NTIS), Springfield, Virginia 22161, June 1999/ [Electronic version]/ - From: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar99-2.pdf>

*Дата поступления
в редакцию 12.04.2018*

S.V. Kozhevnikov, S.A. Pimenov

**APPLICATION SOFTWARE ARCON RELIABILITY SOLVER FOR ASSESSMENT
OF RELIABILITY OF SOFT-AND-HARDWARE AUTOMATED PROCESS CONTROL
SYSTEM OF NUCLEAR POWER PLANTS**

Branch of Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear
Center-All-Russian Research Institute of Experimental Physics»
«Research Institute of Measuring Systems named after Yu.Ye. Sedakov»,
(Branch of FSUE «RFNC-VNIIEF» «NIIS named after Yu. Ye. Sedakov»)

Purpose: Calculation of quasi-static reliability problems where random factors are described by finite numbers of random variables based on ARCON Reliability Solver software integrated in Siemens NX. Assessment of failure-free operation probability under dynamic loading in case of variable assemblage of radio-electronics electronic components.

Design/methodology/approach: The problem is solved by input of a defining parameter as a random coordinate of mounting an assembly unit in a general finite-element model of assembly unit. A random coordinate is assigned as variational series. Afterwards, iterative calculation is done taking into account all possible variants of electronic components installation. While solving the problem, an accent can be also made on the following random factors: mechanical features stochasticity of structural materials, randomness of geometrical characteristics, probabilistic loads.

Conclusions: Based on the calculation results the achieved probability of failure-free operation under dynamic loading and variable assemblage of electronic modules is considered satisfactory.

Key words: dependability, finite elements method, durability, reliability, radio-electronic equipment.