

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШКАФА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АЭС

**В.В. Каверин, Е.А. Канунникова,  
Н.А. Красова, А.Ю. Рузаков  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)**

*Предложен метод определения динамических характеристик каркаса нового типа шкафа электрооборудования АЭС. Изучено влияние способа крепления каркаса на резонансные частоты. Представлены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных.*

**Ключевые слова:** сейсмостойкость электрооборудования, динамические характеристики, собственные частоты, резонансные частоты, конечно-элементная модель.

ФГУП «НПП ВНИИЭМ» более 40 лет разрабатывает и поставляет на АЭС электрооборудование систем управления и защиты (СУЗ).

Оборудование СУЗ размещается в типовых шкафах на основе каркаса фирмы Rittal. В новых проектах применяется новый тип каркасов этой же фирмы, отличающийся профилем несущей рамы. Новая модель каркаса шкафа TS8 существенно отличается от несущей конструкции шкафов PS4600, ранее используемых. В связи с этим возникла необходимость изучить механические свойства новых конструкций и их способность выдерживать динамические нагрузки (в том числе сейсмические).

Для подтверждения сейсмостойкости оборудования во ВНИИЭМ используется расчетно-экспериментальный метод [1 – 3], включающий:

- математическое моделирование поведения конструкции при динамических воздействиях;
- использование результатов ранее проведенных испытаний прототипов оборудования;
- анализ проведенных ранее испытаний.

Математическое моделирование динамического поведения конструкций, основанное на конечно-элементном представлении конструкции, активно применяется на предприятии для подтверждения сейсмостойкости оборудования АЭС и элементов космических аппаратов [4 – 6].

В работе излагается расчетно-экспериментальное определение динамических характеристик шкафа электрооборудования СУЗ АЭС.

В конструкции шкафа имеется много крепежных деталей, на реальные динамические свойства которых существенно влияют момент затяжки, зазоры, демпфирование.

Не только расчетное, но и экспериментальное определение динамических характеристик представляет определенные трудности, так как наблюдается большой разброс их значений в

зависимости от места установки, качества сборки и т. п.

Отметим, что и расчеты, и эксперименты проводились поэтапно: от пустой рамы до полной сборки (на каждом этапе добавлялись элементы конструкции). На каждом этапе сравнивались собственные частоты и формы колебаний, полученные в результате расчета и эксперимента. Это позволило выявить степень влияния различных элементов конструкции и уменьшить погрешность расчетов на каждом этапе.

*Конструкция шкафа.* Шкаф электрооборудования (рис. 1) состоит из несущей рамы, укосин, нижних усилителей цоколя, крышки, боковых стенок и двери. Основой каркаса шкафа является несущая рама. Вертикальные балки рамы имеют сложное перфорированное сечение, полученное путем сгиба стального листа толщиной 1,5 мм. Диагональные укосины и нижние усилители расположены вдоль задней и боковых стенок для повышения жесткости. Крышка, двери и боковые стенки крепятся посредством винтовых креплений к несущей раме каркаса. Силовая рама устанавливается на цоколе из профиля П-образного сечения.

На рис. 1 показано направление осей координат: ось  $X$  направлена вдоль короткой стороны шкафа;  $Y$  – вдоль длинной стороны;  $Z$  – вдоль вертикальной стороны.

*Конечно-элементная модель шкафа.* Для выполнения расчетов была составлена математическая модель с использованием программного комплекса MSC Nastran, основанного на применении метода конечных элементов.

Определяющим моментом при моделировании является выбор типа конечных элементов (стержни, оболочки, объемные тела), которые наилучшим образом представляют реальную конструкцию. Для моделирования каркаса шкафа

был выбран балочный тип элементов, модель из которых обладает значительно меньшей размерностью в сравнении с оболочечной моделью. Определение свойств поперечного сечения, так как оно имеет сложную тонкостенную форму и в значительной степени перфорировано (рис. 2), достаточно трудно.

Для более точного определения этих свойств был проведен расчет отрезка профиля длиной 2 м

двумя способами: с использованием балочной и оболочечной моделей. В балочной модели была учтена перфорация путем уменьшения сечения.

Всего балочная модель содержит 120 элементов и 116 узлов, а оболочечная 155 001 элементов и 170 842 узлов.

Модель на основе оболочечных элементов позволяет более точно учесть геометрию изделия и условия закрепления.

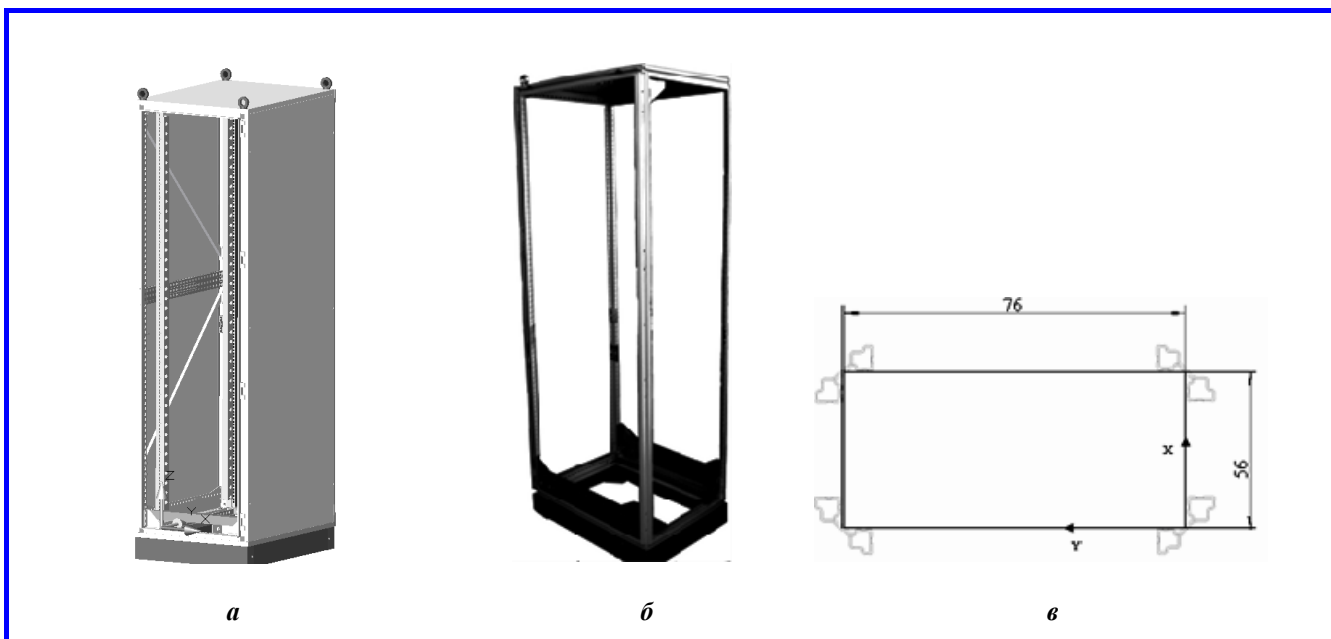


Рис. 1. Конструкция шкафа: а – общий вид; б – рама; в – ориентация сечений вертикальных балок рамы

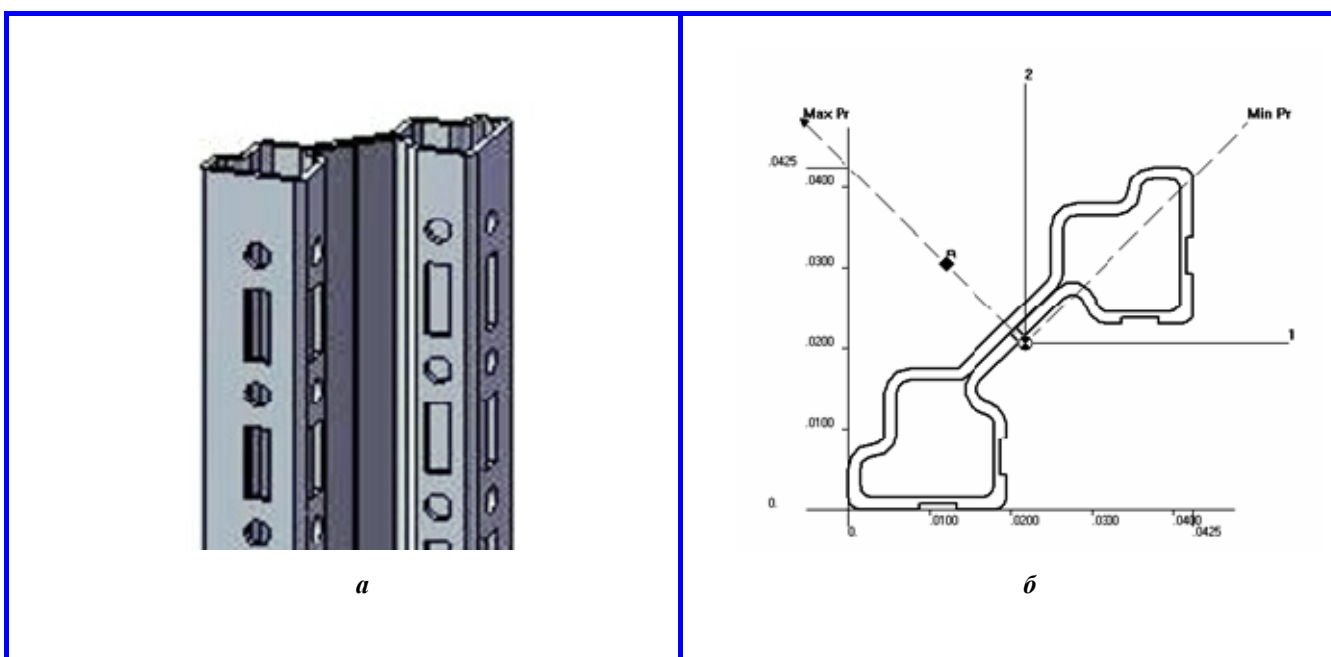


Рис. 2. Профиль несущей рамы: а – твердотельная модель; б – поперечное сечение

Сравнение расчетных значений собственных частот, полученных для оболочечной и балочной модели (табл. 1), показало, что результаты качественно совпадают, т. е. в рассмотренном диапазоне частот отсутствуют оболочечные формы, а значения частот отличаются не более чем на 10%, что не превышает разброса исходных параметров.

Таким образом, подтверждена возможность применения балочной модели для анализа сейсмостойкости рассматриваемой конструкции (частотный диапазон сейсмических воздействий от 0 до 50 Гц).

Конечно-элементная модель для различных стадий сборки каркаса показана на рис. 3.

Элементы усиления каркаса (укосины и поперечные перекладки), показанные на рис. 3, б, также как и рама, моделировались с помощью элементов балочного типа.

Для моделирования цоколя шкафа, а также нижних усиления и мест крепления укосин к раме (рис. 3, в), использовались оболочечные элементы.

Стенки и двери шкафа электрооборудования изготовлены из стального листа толщиной 1,5 мм и моделировались оболочечными элементами.

Места соединений элементов соответствуют реальной конструкции. Изначально соединения деталей шкафа считались абсолютно жесткими и моделировались с помощью интерполяционных элементов RBE2. Например, на рис. 3, в кружочками показаны элементы RBE, соединяющие стенки шкафа с рамой.

Болтовое соединение рамы с цоколем (4 болта) и цоколя с полом (4 болта) моделировалось балочными элементами, что позволило выбрать жесткость соединения, соответствующую реальным условиям закрепления.

Объектом исследования в данной работе являлся типовой каркас шкафа, поэтому само электрооборудование, устанавливаемое в нем, не рассматривалось. Однако для грубой оценки влияния загрузки шкафа на значения резонансных частот был рассмотрен вариант каркаса с размещенной в верхней части сосредоточенной массой 100 кг.

Таблица 1

Номер собственной частоты	Собственные частоты модели профиля, Гц		Форма
	Балочная	Оболочечная	
1	25,4	25,6	Изгибная по оси X
2	69	70	Изгибная по оси X
3	78	71	Изгибная по Y
4	134	136	Изгибная по X

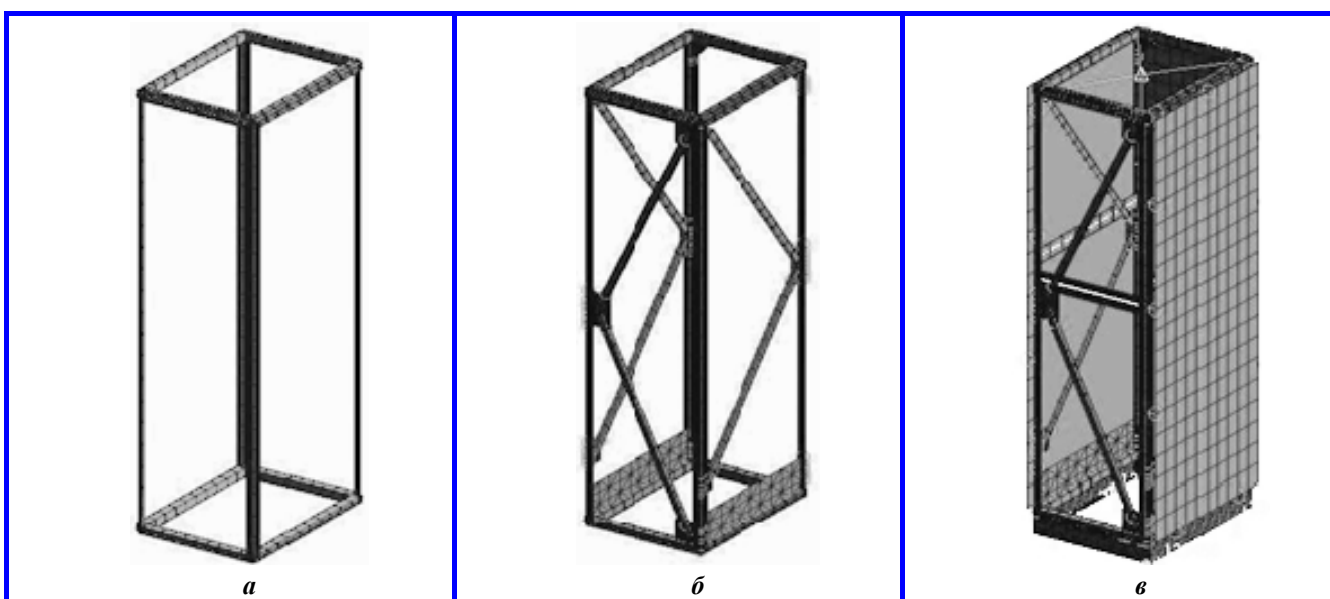


Рис. 3. Конечно-элементная модель. Стадии сборки: а – рама; б – рама с усилениями; в – каркас в сборе

На каждом этапе проводилось сравнение результатов расчета и эксперимента, и анализ их расхождения для верификации конечно-элементной модели.

*Экспериментальное определение собственных частот.* Для определения динамических характеристик каркаса проводилось несколько серий экспериментов по определению форм колебаний для различных этапов сборки каркаса шкафа. Использовалось два метода возбуждения колебаний шкафа: колебания возбуждались с помощью измерительного молотка; колебания возникали после отклонения шкафа от начального положения. Для измерения отклика использовались датчики ускорений.

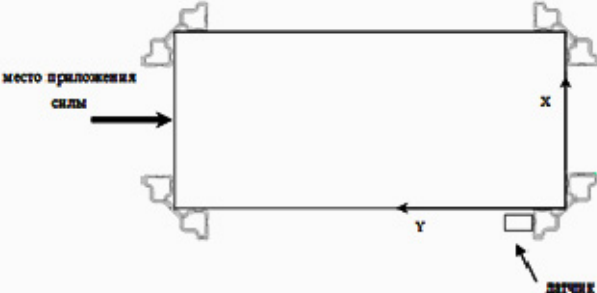

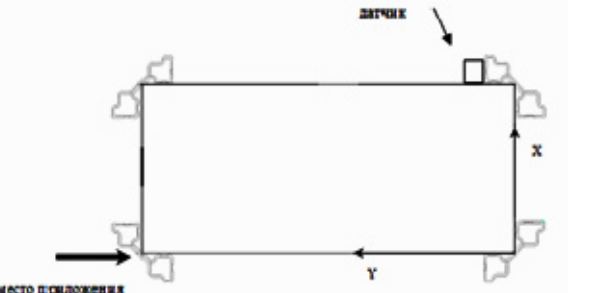
Возбуждение каркаса специальным ударным молотком со встроенным датчиком силы позволяет не только определить частоту, но и построить форму

колебаний. Для этого датчик закрепляется последовательно в нескольких точках (~10) на одной линии, а удар каждый раз наносится в одну и ту же точку. По результатам таких измерений строятся графики форм колебаний на этой линии. Особенностью метода является большое количество возбуждаемых частот с небольшими амплитудами.

Для более детального анализа поведения конструкции на низших резонансных частотах, связанных с изгибом или кручением всего шкафа, использовался второй метод возбуждения. Этот метод позволил определить резонансные частоты и характеристики затухания при больших амплитудах.

В табл. 2 показаны схемы проведения эксперимента (крепление датчиков и место приложения силы) при определении крутильных и изгибных колебаний по осям  $X$ ,  $Y$ .

Таблица 2

Схема эксперимента	Описание
	<p>При определении отклика по оси <math>Y</math> датчик закреплялся последовательно в 10-ти точках равномерно распределенных по длине боковой балки, при этом ударное возбуждение наносилось молотком в центр верхней кромки в направлении оси <math>Y</math>.</p>
	<p>При определении спектра отклика по оси <math>X</math> датчик закреплялся последовательно в 10-ти точках равномерно распределенных по длине боковой балки, при этом ударное возбуждение наносилось молотком в центр верхней кромки в направлении оси <math>Y</math>.</p>
	<p>Для определения крутильных колебаний датчики крепились последовательно в 5-ти точках, равномерно распределенных по длине, на верхней кромке длинной стороны, при этом ударное возбуждение наносилось молотком в направлении линии крепления датчиков в край противоположной стороны.</p>

Отметим, что в ходе экспериментов было выявлено значительное влияние качества установки шкафа на полу. Каркас крепился одним и тем же способом во всех сериях экспериментов, но затяжка болтов не контролировалась. Следствием этого стало заметное системное расхождение резонансных частот (около 1 Гц) между двумя сериями экспериментов.

*Результаты определения собственных частот.* Собственные частоты и параметры затухания параллельно определялись расчетным и экспериментальным путями для основных вариантов сборок.

Полученные в работе низшие собственные частоты каркаса шкафа на различных этапах сборки в направлениях  $X$ ,  $Y$  приведены в табл. 3.

Анализ данных, приведенных в табл. 3, показывает, что:

- элементы усиления каркаса значительно (приблизительно в 6 раз) увеличивают изгибную жесткость шкафа в направлении оси  $Y$  и только в 2 раза в направлении оси  $X$  (такая разница связана с фактическим отсутствием влияния жесткости двери шкафа);
- установка каркаса на цоколь снижает резонансную частоту на 0,5 Гц, что связано с его высокой жесткостью в сравнении с каркасом;
- установка массового имитатора блоков 100 кг приводит к снижению первой резонансной частоты по оси  $X$  в 2 раза, а также к возникновению отчетливой изгибной формы по оси  $Y$  и уменьшению разброса резонансных частот по осям  $X$ ,  $Y$ ;
- влияние стенок на общую жесткость каркаса за счет слабого крепления практически не проявляется по оси  $X$ , по оси  $Y$  резонансная частота при этом увеличивается в 1,4 раза.

Отметим также, что приведенные в табл. 3 экспериментальные собственные частоты несколько ниже расчетных, что позволяет сделать вывод о наличии податливости в элементах крепления.

По результатам проведенных экспериментов была проведена верификация конечно-элементной модели каркаса.

*Расчет каркаса шкафа на воздействие*

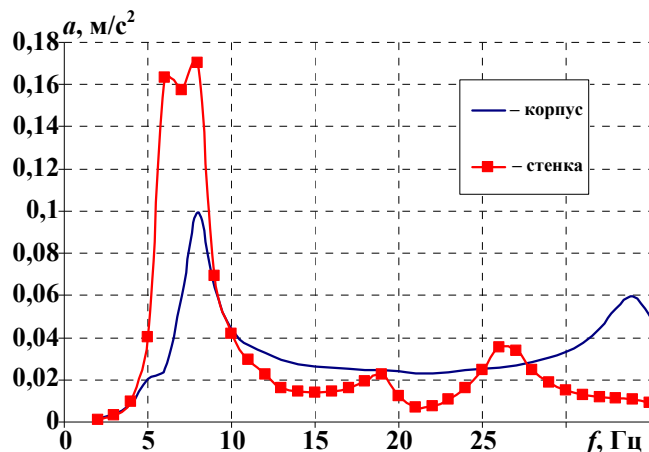


Рис. 4. Расчетные ускорения каркаса и боковой стенки шкафа

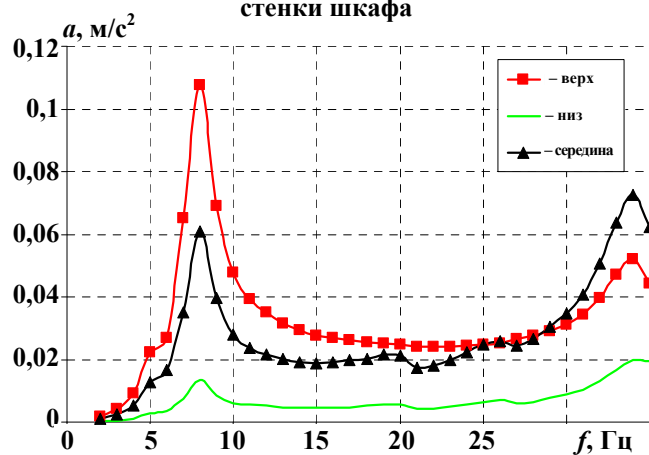


Рис. 5. Распределение ускорений по высоте каркаса шкафа

*гармонической вибрации.* Кроме расчета собственных частот каркаса, были проведены расчеты отклика каркаса на воздействие гармонической вибрации в трех направлениях. При этом вычисляется амплитуда установившихся вынужденных колебаний при гармоническом воздействии определенной частоты. Расчет позволяет получить передаточную функцию модели между любыми двумя точками: точкой приложения силы и точкой измерения отклика. Такой расчет довольно близко моделирует условия проводимых экспериментов – в месте удара молотка прикладывается сила, в месте установки датчика вычисляется ускорение.

Таблица 3

Вид сборки	$f_x$ Гц	$f_y$ Гц
Рама	7,3	7,3
Рама на цоколе	6,8	6,7
Собранный каркас	13,6	46
Каркас на цоколе с массовым имитатором	7	10
Каркас со стенками на цоколе с массовым имитатором	7,8	14

Показанные на рис. 4, 5 результаты расчета шкафа с боковыми стенками на воздействие, приложенное в направлении оси  $X$  в верхней части, позволяют разделить резонансные частоты боковой стенки (6,5 Гц) и каркаса шкафа (8 Гц), а также оценить возрастание амплитуды ускорения по высоте каркаса.

### Выводы

1. Для нового типа каркаса TS8 шкафов электрооборудования создана конечно-элементная модель, отражающая его основные динамические характеристики. Проведен расчет собственных частот и форм колебаний для различных вариантов сборки каркаса.
2. Экспериментальное определение динамических характеристик каркаса шкафа в различных вариантах сборки подтвердило соответствие основных элементов динамической модели и реальной конструкции.
3. В ходе проведения экспериментов было выявлено влияние крепления и соединений элементов на резонансные частоты конструкции. В результате проведенных исследований параметры конечно-элементной модели каркаса шкафа были оптимизированы и уточнены по результатам эксперимента.
4. Определено влияние различных элементов каркаса (усилений, стенок, двери) на его резонансные частоты.
5. Выявлено существенное различие частот и форм колебаний пустого каркаса по осям  $X$  и  $Y$  (примерно в 5 раз), связанное с фактическим отсутствием усиления со стороны двери шкафа. Показано, что установка массового имитатора 100 кг приводит к уменьшению этой разницы (до 2 раз) и к возникновению отчетливой изгибной формы по оси  $Y$ .
6. Скорректированная конечно-элементная модель шкафа электрооборудования на основе каркаса TS8 будет в дальнейшем использоваться для оценки

нагрузок на элементы шкафа при сейсмическом воздействии.

### Литература

1. Расчетно-экспериментальный метод подтверждения сейсмостойкости оборудования АЭС / А.М. Белостоцкий, В.Я. Геча, А.И. Горшков [и др.] // Вопросы электромеханики. Обеспечение безопасности электрооборудования энергетических реакторов атомных электростанций. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2004. – Т. 101. – С. 58 – 68.
2. Методология расчетно-экспериментальной отработки сейсмостойкости встраиваемого оборудования / А.И. Горшков, Е.А. Канунникова // Вопросы электромеханики. Обеспечение безопасности электрооборудования энергетических реакторов атомных электростанций. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2004. – Т. 101. – С. 79 – 87.
3. Квалификация электрооборудования для АЭС в части его сейсмостойкости по результатам предшествующих испытаний / В.Я. Геча, А.И. Горшков, Е.А. Канунникова [и др.] // Вопросы электромеханики. Обеспечение безопасности электрооборудования энергетических реакторов атомных электростанций. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2004. – Т. 101. – С. 45 – 52.
4. Уточнение математической модели шкафов электрооборудования АЭС по результатам эксперимента / В. В. Каверин // Международная конференция MSC.Software. – М., 2007.
5. Расчетно-экспериментальное исследование динамических характеристик антенных устройств космических аппаратов / Е. А. Канунникова, И. Ю. Пугач // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 109. – № 2. – С. 17 – 20.
6. Применение современных методов при проектировании и отработке прочности малого космического аппарата / В.В. Каверин, И.Ю. Пугач // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 109. – № 2. – С. 21 – 27.

Поступила в редакцию 28.01.2010

*Владимир Викторович Каверин, мл. научный сотрудник.  
Елена Александровна Канунникова, канд. техн. наук, начальник лаборатории.  
Наталья Алексеевна Красова, инженер.  
Алексей Юрьевич Рузаков, инженер.  
Т. 366-33-61.  
E-mail: vniiem@vniiem.ru.*