

РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

С.И. Рясный, И.И. Зайкин, А.П. Казновский, П.С. Казновский, К.Г. Касьянов, А.В. Щугорев
АО «Атомтехэнерго»

Работы по расчетно-экспериментальному обоснованию сейсмостойкости и устойчивости к внешним воздействиям важного для безопасности оборудования АЭС с определением его собственных динамических характеристик в реальных условиях монтажа, раскрепления и трубопроводной обвязки регламентируются российскими федеральными нормативными документами [1,2,3], отраслевым нормативно-методическим документом [4] и рекомендуются стандартами МАГАТЭ [5,6,7] для всех вводимых в эксплуатацию и при обосновании продления срока эксплуатации действующих энергоблоков АЭС.

Расчетно-экспериментальное обоснование сейсмостойкости оборудования включает в себя следующие этапы:

1. Изучение проектной документации на оборудование и системы;
2. Визуальный осмотр оборудования и оценку его соответствия проектным требованиям монтажа и раскрепления;
3. Экспериментальное определение динамических характеристик оборудования в условиях стационарных систем;
4. Разработку расчетных моделей оборудования на основе установочных чертежей, уточненных данных о раскреплении и обвязке оборудования;
5. Расчет на сейсмостойкость типопредставителей оборудования и участков трубопроводов, сопоставление результатов расчетов с проектными обоснованиями;
6. Разработку мероприятий, направленных на доведение оборудования до уровня требуемой сейсмостойкости.

В настоящее время по результатам проведенных обследований накоплен значительный объем данных по квалифицированному на сейсмостойкость оборудованию (более 5000 единиц оборудования – трубопроводной арматуры, насосов, теплообменников, резервных дизельных электростанций и др.) как на этапе ввода в эксплуатацию, так и на этапе продления сроков эксплуатации энергоблоков АЭС. Накопленные данные содержат в себе проектную документацию, физические и рабочие параметры оборудования, результаты динамических испытаний и расчетов, разработанные технические решения по обеспечению требуемой сейсмостойкости.

Кроме того, банк данных постоянно увеличивается за счет квалификации на сейсмостойкость расчетно-экспериментальным методом пусковых энергоблоков (№4 Белоярской АЭС, №3 Ростовской АЭС, №3 Нововоронежской АЭС, №1 Ленинградской АЭС-2).

Объем данных по каждой квалифицированной единице оборудования содержит порядка 30 параметров, кроме того, графики, чертежи, паспортные и расчетные данные, изображения и другую информацию.

В связи со значительной трудоемкостью полного комплекса сейсмической квалификации оборудования (на каждом обследуемом энергоблоке АЭС исследуется сейсмостойкость 1000-2000 единиц важного для безопасности оборудования) возникает потребность существенного снижения трудозатрат, которое, как будет показано ниже, может достигаться за счет эффективного использования накопленных результатов ранее выполненных работ путем оптимизации методологии, процедур выполнения и состава работ.

Пути возможной оптимизации работ за счет использования упрощенных процедур квалификации оборудования на сейсмостойкость косвенными методами рекомендуются документом МАГАТЭ [7], содержащем процедуры оценки запаса сейсмостойкости (SMA - Seismic Margin Assessment), включая специальную процедуру GIP (Generic Implementation Procedure). Оценка сейсмостойкости оборудования с применением процедуры GIP осуществляется путем установления соответствия или подобия с оборудованием, имеющимся в базе данных SQUG (Seismic Qualification Utility Group). В базе SQUG содержатся данные по оборудованию, квалифицированному ранее в результате расчетных, экспериментальных обоснований и на основе опыта эксплуатации при реальных сейсмических событиях.

На основе данных из баз SQUG были разработаны таблицы скрининга (отсева) оборудования, заведомо сейсмостойкого при определенных сейсмических нагрузках и обобщенные граничные спектры (спектры предельных сейсмических нагрузок, допустимых для оборудования). Созданы критерии отсева оборудования (скрининга) из дальнейшего рассмотрения для различных классов оборудования, в основном, на основании данных визуального осмотра и документации.

Однако базы данных SQUG не могут быть использованы для оценки сейсмостойкости российских АЭС в силу следующих причин:

1) Данные базы представляют собой закрытый ресурс, доступ к которому открыт только 33 организациям, перечисленным на сайте SQUG, среди которых нет ни одной российской. Российские организации не имеют доступа к содержимому баз в силу политических причин.

2) В данных базах нет ни одного примера оборудования, применяющегося на Российских АЭС [8].

3) Предлагаемая в процедурах скрининга квалификация на сейсмостойкость по результатам сравнения спектров воздействия на оборудование не может быть признана в достаточной мере методически обоснованной [9].

Кроме того, что не менее важно, российские нормативные документы [3,4] требуют обязательного изучения собственных динамических характеристик оборудования в реальных условиях монтажа и трубопроводной обвязки, вследствие чего может быть “отсеяно” только оборудование, для которого значения динамических характеристик обоснованно предсказуемы на основании результатов предшествующих проверок российских энергоблоков, построенных по тому же проекту.

Для оценки сейсмостойкости оборудования российских АЭС косвенными методами необходимо разработать собственную базу данных сейсмической квалификации (БДСА), включающую результаты расчетно-экспериментальных обоснований сейсмостойкости многочисленного оборудования российских АЭС с реакторами ВВЭР-1000, ВВЭР-440, РБМК-1000, БН-800 и др.

База данных содержит универсальные квалификационные карты обследованных единиц оборудования, включающие в себя полный набор параметров, получаемых в ходе исследования (тип оборудования, геометрические характеристики, типы опорных конструкций и условия раскрепления, результаты динамических испытаний и расчетов и др.) [10].

Использование базы данных позволит сократить объемы расчетно-экспериментальных исследований сейсмостойкости за счет «отсева» ранее квалифицированного и включенного в базу данных строго идентичного оборудования на разных этапах обследования.

Целью использования такой базы данных является оптимизация объемов расчетно-экспериментальных исследований сейсмостойкости на основании результатов проверок ранее квалифицированного и включенного в базу оборудования. При строгом соответствии весогабаритных и частотных параметров каждой отдельно взятой единицы текущая проверка может сводиться к сравнению нагрузок, на которые единица квалифицировалась ранее, с нагрузками, на действие которых производится текущая проверка.

Основополагающими принципами создания БДСА являются: удобство ввода и поиска информации, получаемой и обрабатываемой на всех этапах расчетно-экспериментальных обоснований сейсмостойкости, возможность автоматического анализа и сопоставление различных данных.

БДСА представляет собой систему таблиц, содержащих необходимые данные в текстовом, числовом, временном или логическом форматах, заполняемых поэтапно в ходе проведения работ и систему папок на диске, содержащую файлы изображений и записанных экспериментальных данных. Таблицы связаны между собой и делятся на основную и вспомогательные. Вспомогательные таблицы созданы с целью группирования данных, ввод которых многократно повторяется в ходе заполнения основной таблицы, содержащей информацию, касающуюся непосредственно обследуемого оборудования. Таким образом, появляется возможность максимально облегчить ввод и хранение информации, обрабатываемой в ходе проведения обследований, в особенности экспериментальных результатов.

Использование БДСА подразумевает усовершенствование применявшегося ранее алгоритма проведения оценки с учетом опыта текущих и выполненных задач в ходе проверок на энергоблоках Ростовской, Калининской, Ленинградской, Белоярской, Балаковской, Нововоронежской АЭС.

БДСА создается на платформе электронной площадки АО «Атомтехэнерго» с открытым доступом для всех сотрудников и специалистов предприятия.

Каждый этап рабочего процесса подразумевает последовательное заполнение базы данных на каждом этапе обследования:

1. Составление перечня

На этапе формирования перечня оборудования в БДСА вносится информация о системах энергоблока, в том числе и ссылка на проектную документацию с принципиальными схемами, установочными чертежами и поэтажными спектрами отклика на сейсмические воздействия. После изучения принципиальных схем и чертежей в базу заносятся обозначения оборудования по системе кодирования (KKS) и номера помещений расположения оборудования.

В состав данных следует включать результаты аналитической оценки низшей частоты собственных изгибных и продольных колебаний.

В [10] было показано, что, поскольку для всех типов оборудования по результатам предыдущих проверок выявляются единицы с динамическими характеристиками в резонансной области сейсмических воздействий, в настоящий момент нет возможности исключить из работы этап испытаний хотя бы для одного типа оборудования и ограничиться только проверкой соответствия раскрепления требованиям проекта. Однако имеется возможность для некоторых типов отказаться от испытаний отдельных единиц оборудования, если идентичные, в том числе и в части раскрепления, единицы были неоднократно испытаны в ходе предыдущих проверок, и при этом было выявлено совпадение значений собственных динамических характеристик. Таким образом, из перечня обследуемого может быть исключено:

- Вспомогательное малогабаритное оборудование, динамические характеристики которого вследствие его малой массы и большой жесткости не попадают в область резонанса с сейсмическим возбуждением;

- Вспомогательная малогабаритная трубопроводная арматура с ручным приводом ввиду ее малой сосредоточенной массы, близкого расположения центра масс к оси трубопровода и, как следствие, слабого влияния на динамическое поведение трубопроводной системы;
- Крупногабаритное оборудование массой выше 100 т, жестко связанное с железобетонными строительными конструкциями, сейсмостойкость которого надежно обеспечивается расчетными методами на стадии проектирования;
- Автономное электротехническое оборудование без внешних механических связей при строгом воспроизводстве условий монтажа и раскрепления, регламентированных техническими условиями и лабораторными заключениями о сейсмостойкости.

Основные типы оборудования, имеющие низкие собственные частоты в резонансной области сейсмических воздействий и подлежащие обследованию, приведены в [11].

В [11] приведены методы определения областей значений геометрических характеристик опорной конструкции, в которых ожидаются высокие собственные частоты оборудования. Предварительную оценку значений собственных частот можно выполнить расчетом с помощью метода конечных элементов. Построение типовых расчетных схем, например, арматуры на участке трубопровода, может быть запрограммировано с помощью макросов. В таких случаях удобно проводить анализ влияния параметров объекта на значения собственных частот, имея в наличии программу, автоматически выполняющую построение расчетной модели по введенным значениям параметров. Для балочных моделей участка трубопровода, содержащего одну единицу арматуры, варьируются следующие параметры:

- значение сосредоточенной массы привода;
- характеристики трубопровода: внутренний и внешний диаметры, данные о материале;
- характеристики внешних связей: жесткости в различных направлениях;
- данные об опорах: сечения, материалы;
- длины участков трубопровода до ближайших опор.

Сокращение количества испытаний может осуществляться также на основании аналитической оценки низшей частоты собственных изгибных ($\omega_{изг}$) и продольных ($\omega_{прод}$) колебаний по соотношениям (1) и (2) соответственно [11]:

$$\omega_{изг} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{3EJ}{MI^3}} \quad (1)$$

$$\omega_{прод} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{EF}{MI}} \quad (2)$$

при наличии данных о массе оборудования M , модуле упругости материала E , сечениях опорных конструкций F , наименьших моментах инерции горизонтального поперечного сечения опорных конструкций J , расстоянии от центра масс до опоры l .

В случае расположения полученных по (1) и (2) частот вне резонансной области сейсмических воздействий для данного оборудования становится возможным ограничиться проверкой раскрепления и соответствия проектной документации.

2. Подготовка к испытаниям

При подготовке к испытаниям база данных служит для формирования плана испытаний, маршрута обхода, поиска и печати чертежей, необходимых для визуального осмотра и контроля монтажа оборудования.

3. Проведение испытаний

До проведения испытаний по определению собственных динамических характеристик каждой единицы непосредственно на месте установки оборудования в БДСА вносятся результаты визуального осмотра: выявленные несоответствия, эскизы фактического расположения оборудования. По результатам испытаний в БДСА заносятся: дата испытаний, ссылки на файлы с записанными акселерограммами.

4. Обработка экспериментальных результатов

На этом этапе в БДСА вносятся результаты обработки результатов испытаний (значения полученных собственных динамических характеристик).

5. Анализ результатов испытаний, выбор оборудования для проведения расчетного анализа, составление расчетных схем

В БДСА предусмотрена форма поиска, позволяющая производить выборку данных на основании необходимых параметров, таких как собственные частоты, тип оборудования, высотные отметки, принадлежность к системам и т.д.

Оборудование подразделяется на “группы квалификации”, каждой из которых присваивается номер. Принадлежность двух или более единиц к одной группе квалификации означает, что для подтверждения их сейсмостойкости используются результаты одного и того же расчета по одной расчетной схеме.

6. Проведение расчетов

В качестве критериев отбора одного или нескольких типопредставителей из группы единиц оборудования (участков трубопроводов) для проведения расчетного анализа на основании результатов испытаний по определению собственных динамических характеристик в [11] предложено использовать

параметры $\tilde{A}_j^X, \tilde{A}_j^Y, \tilde{A}_j^Z$, характеризующие нагрузки по соответствующим направлениям (X,Y,Z) следующим образом:

$$\begin{aligned}\tilde{A}^X &= \sqrt{(k_1^X \cdot A_1^X)^2 + (k_2^X \cdot A_2^X)^2 \dots (k_n^X \cdot A_n^X)^2} \\ \tilde{A}^Y &= \sqrt{(k_1^Y \cdot A_1^Y)^2 + (k_2^Y \cdot A_2^Y)^2 \dots (k_n^Y \cdot A_n^Y)^2} \\ \tilde{A}^Z &= \sqrt{(k_1^Z \cdot A_1^Z)^2 + (k_2^Z \cdot A_2^Z)^2 \dots (k_n^Z \cdot A_n^Z)^2}\end{aligned}\quad (3)$$

где:

- $A_1^X \dots A_n^X, A_1^Y \dots A_n^Y, A_1^Z \dots A_n^Z$ – значения ускорений, взятые со спектров ответа в точке расположения оборудования, соответствующие экспериментально полученным частотам;
- n – количество форм для каждой из схем, попадающих в исследуемый диапазон (обычно 33 Гц);
- k_1, k_2, \dots, k_n – коэффициенты вклада соответствующих форм в движение вдоль осей при затухающих колебаниях, определяемые по высотам пиков на спектрах Фурье мощности, полученных по результатам испытаний.

В случае, когда все три значения \tilde{A} для трех соответствующих направлений для одной из единиц группы выше, чем для других единиц, данная единица выбирается для расчетного анализа. Её сейсмостойкость будет гарантировать сейсмостойкость нерассмотренных единиц.

В случае если такая единица не выявляется, расчет выполняется для нескольких единиц из группы, отобранных согласно следующим принципам:

- наличие экстремального значения одного из параметров $\tilde{A}^X, \tilde{A}^Y, \tilde{A}^Z$;
- наибольшая сумма значений $\tilde{A}^X, \tilde{A}^Y, \tilde{A}^Z$;

По завершении расчетного анализа производится сопоставление результатов с результатами проектного расчета трубопровода.

Таким образом, в составе базы данных по обследуемому оборудованию необходимо также иметь параметры $\tilde{A}_j^X, \tilde{A}_j^Y, \tilde{A}_j^Z$.

В результате расчетов определяются значения механических напряжений в материале элементов конструкции и крепежных элементов. Напряжения характеризуются несколькими числами – значениями напряжений расчетных категорий по [12] (как правило, $(\sigma_s)_2, (\sigma_s)_1, (\sigma_s)_{4w}, (\tau_s)_3$). Расчетные значения сравниваются с допускаемыми.

Также в некоторых случаях определяются и вносятся в базу значения реактивных усилий в опорах P_x, P_y, P_z .

7. Оформление документации

Отчетная документация оформляется в соответствии с универсальными шаблонами. БДСА должна предусматривать автоматическое заполнение типовых таблиц отчетной документации.

Помимо целей оптимизации и сокращения количества обследуемого оборудования, разрабатываемая база данных может использоваться для систематизации и обобщения результатов расчетных и экспериментальных обследований. Так, на первом этапе разработки БДСА был выполнен анализ накопленного банка данных по результатам натурных динамических испытаний тепломеханического оборудования при его аттестации на сейсмостойкость, включающего в себя значения низших собственных частот и соответствующих декрементов колебаний, определенных для выбранных 1684-х единиц ответственного за безопасность оборудования АЭС, а также выполненных на предприятиях-изготовителях динамических испытаний механически автономного (не имеющего внешних обвязок) оборудования, предназначенного для поставок на АЭС [13].

Наибольший интерес при анализе результатов динамических испытаний представляет выявление статистических закономерностей, присущих характеристикам собственных колебаний оборудования в условиях его фактического состояния. Полученные статистические данные позволяют ввести экспериментальное обоснование и уточнение принятых в российской нормативной документации [2,12] значений относительных логарифмических декрементов колебаний (декрементов колебаний), используемых при проектных обоснованиях устойчивости оборудования АЭС к внешним воздействиям [13].

Было выявлено, что около 65% всего оборудования имеют низшую собственную частоту <33 Гц и декременты колебаний в диапазоне 0,005-0,05, причем для каждой из рассматриваемых групп от 10 до 40% единиц имеют декременты менее величины 0,02, установленной в [12]. В связи с этим выявлена необходимость соответствующей корректировки нормативных требований по выбору значений декрементов колебаний при задании инерциальных нагрузок на оборудование от сейсмических воздействий при проведении проектных расчетов.

Были определены и предложены минимальные значения декрементов колебаний для всех рассмотренных типов оборудования в зависимости от направлений динамических воздействий и собственных частот колебаний для принятия в качестве консервативных нормативных значений в случае отсутствия реальных экспериментальных данных на стадии выполнения проектных обоснований сейсмостойкости.

Поскольку запорно-регулирующая арматура, как единица оборудования, входит в состав всех технологических систем атомной станции с энергоблоками любого типа, а на блоке АЭС эксплуатируется более 10000 единиц арматуры, был выполнен статистический анализ экспериментально полученных собственных частот и декрементов колебаний для включенных в базу данных 766 единиц трубопроводной арматуры с вынесенным ручным или электрическим приводом без собственных опорных конструкций и с опорной конструкцией непосредственно под арматурой с учетом влияния диаметра стыкуемой трубы и направления воздействия [14].

Было показано, что при расчетном обосновании сейсмостойкости арматуры необходимо учитывать несколько декрементов, соответствующих различным направлениям воздействий, значения собственных частот, а также диаметр условного прохода стыкуемого трубопровода.

Были получены графические зависимости для определения консервативных значений декрементов колебаний трубопроводной арматуры с различными параметрами, которые свидетельствуют о необходимости уточнения нормативных требований, действующих по отношению к трубопроводной арматуре.

Было предложено в случае отсутствия прямых экспериментальных данных принимать значения декрементов в соответствии с эмпирически полученными графическими зависимостями, связанными с набором параметров трубопроводной арматуры, условно характеризующих её жесткость (диаметр стыкуемой трубы, наличие опор, направление воздействия и собственные частоты колебаний). Это заметно повысит надежность предварительных оценок сейсмостойкости арматуры на стадиях её разработки и проектирования.

При динамических испытаниях в реальных условиях АЭС приходится ограничиваться воздействиями на оборудование усилием на 1-2 порядка ниже в сравнении с реальными сейсмическими воздействиями, что связано с требованием неповреждаемости оборудования. В связи с этим в [15] был поставлен вопрос о характере влияния на точность определения декрементов колебаний фактора «малости возмущений» при возбуждении колебаний малых амплитуд. По результатам специально проведенного модельного эксперимента было показано, что при переходе от малых возмущений колебаний к большим, декременты увеличиваются не более, чем в 1,5-2 раза, поэтому было предложено в результате статистического анализа вводить поправку на фактор «малости возмущений» в виде коэффициента-множителя, равного 1,5, применительно ко всем значениям декрементов колебаний. Однако такое решение является паллиативным, а вопрос о степени влияния фактора «малости возмущений» требует дополнительного изучения и уточнения.

Для этого планируется применение метода экспериментального модального анализа с использованием тензометрической станции и динамометрического молотка, позволяющих определить силу ударного воздействия. Целью экспериментального модального анализа является определение модальных параметров, т.е. резонансных частот, коэффициентов демпфирования и собственных форм колебаний системы. Эти модальные параметры позволяют характеризовать вибрационное поведение системы. Возбуждение может прикладываться как в одном месте конструкции, так и в нескольких местах одновременно. Целью при этом является возбуждение колебаний конструкции приложенной динамической силой в интересующем частотном диапазоне. При этом измеряются как приложенная сила, так и ответные реакции на ее воздействие. Система анализа преобразует полученные сигналы в цифровую форму и после этого использует их для вычисления частотных характеристик. Эти частотные характеристики служат основой для оценки модальных параметров [16].

ВЫВОДЫ:

1. Повышение эффективности использования результатов расчетно-экспериментальной оценки сейсмостойкости оборудования АЭС может достигаться с применением базы данных сейсмической квалификации в качестве инструмента для:

- сокращения перечня оборудования, подлежащего динамическим испытаниям;
- сокращения объемов расчетных работ;
- выявления и практического использования статистических закономерностей, присущих характеристикам собственных колебаний оборудования в условиях его фактического состояния.

2. На основании разработанных критериев и методов обоснованного сокращения трудоемкости расчетно-экспериментальной оценки сейсмостойкости оборудования АЭС определен набор параметров для включения в «Базу данных сейсмической квалификации оборудования», разрабатываемую на основе опыта и результатов предшествующих работ.

3. Оценена возможность использования «Базы данных...» для оценки сейсмостойкости оборудования российских АЭС косвенными методами.

4. Определен набор параметров при использовании разрабатываемой базы данных для целей систематизации и обобщения результатов расчетных и экспериментальных обследований. Выполнен статистический анализ экспериментально полученных собственных частот и декрементов колебаний для включенных в базу данных 766 единиц трубопроводной арматуры с вынесенным ручным или электрическим приводом без собственных опорных конструкций и с опорной конструкцией непосредственно под арматурой с учетом влияния диаметра стыкуемой трубы и направления воздействия.

5. Определена актуальность уточнения влияния уровня экспериментального воздействия на оценку затухания колебаний в условиях реального сейсмического воздействия с применением методов классического модального анализа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. **Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97).**
2. **Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01. // М.: Госатомнадзор. 2001**
3. **Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05. // М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2005.**
4. **Методика подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности. МТ 1.2.2.04.0069-2012. // ОАО «Концерн Росэнергоатом». 2012. 50 с.**
5. **Fundamental Safety Principles // Vienna.: International atomic energy agency. Safety fundamental series No.SF-1, 2006.**
6. **Seismic design and qualification for nuclear power plants // Vienna.: International atomic energy agency. Safety guide No.NS-G-1.6, 2003.**
7. **Evaluation of seismic safety for existing nuclear installations // Vienna.: International atomic energy agency. Safety guide No.NS-G-2.13, 2009.**
8. **Earthquake experience and seismic qualification by indirect methods in nuclear installations// Vienna.: International atomic energy agency. TECDOC 1333, 2003.**
9. **Сааков Э.С., Рясный С.И., Казновский П.С., Касьянов К.Г., Емельянова А.Д. Сравнительный анализ зарубежных и российских методологий оценки сейсмостойкости оборудования АЭС // Атомная энергия, – 2013. – Т.115. – Вып. 6 (декабрь), с. 309-318.**
10. **Емельянова А.Д., Казновский А.П., Казновский П.С., Касьянов К.Г., Рясный С.И. Об объёме и составе расчётно-экспериментальных обследований сейсмостойкости оборудования АЭС // Электрические станции. № 1, 2014, с. 21-26.**
11. **Емельянова А.Д., Зайкин И.И. Казновский А.П., Казновский П.С., Касьянов К.Г., Щугорев А.В., Рясный С.И. Выбор оборудования АЭС, подлежащего расчётно-экспериментальному подтверждению сейсмостойкости // Электрические станции. № 5, 2014, с. 4-11.**
12. **Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86 // М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.**
13. **Казновский А.П., Касьянов К.Г., Рясный С.И. Результаты анализа натуральных исследований собственных динамических характеристик важного для безопасности оборудования АЭС // Электрические станции. № 8, 2014, с. 10-15.**
14. **Казновский А.П., Казновский П.С., Дерий В.П., Сааков Э.С., Рясный С.И. Анализ собственных динамических характеристик трубопроводной арматуры АЭС при оценке ее сейсмостойкости с учетом влияния параметров жесткости // Электрические станции. № 9, 2014, с. 2-7.**
15. **Встовский Г.В., Казновский А.П., Казновский П.С. Влияние декрементов на сейсмическую устойчивость оборудования АЭС и методы их определения // М.: «Тяжелое машиностроение». №1, 2009, с. 5-8.**
16. **D. Brown, G. Carbon, K. Ramsey, Survey of excitation techniques applicable to the testing of automotive structures, Society of Automotive Engineers, International Automotive Congress and Exposition, 770029, March 1977.**