

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 624.074.432(539.374)

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_3_80

С.В. Кожевников, С.А. Пименов

О РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Рассмотрен процесс «модельно-ориентированных испытаний» (расчетно-экспериментальной отработки изделий) в рамках использования платформы Simcenter применительно к изделиям программно-технических средств (ПТС), на которые действуют различные механические нагрузки динамического характера. Задействованы два основных компонента платформы: Simcenter 3D и Simcenter Testlab с набором оборудования SCADAS. Сферой применения технологии расчетно-экспериментальной отработки ПТС выступают автоматизированные системы управления технологическими процессами атомных электростанций (АСУ ТП АЭС). Преимуществом «модельно-ориентированных испытаний» является связь с численным моделированием и командная работа расчетчиков и испытателей в ходе процесса расчетно-экспериментальной отработки. В рамках представленного подхода также минимизируется субъективизм инженеров и снижаются затраты, большое количество классических экспериментов заменяется модальными испытаниями с последующей расчетной отработкой на верифицированных моделях, что особенно важно при проектировании крупногабаритных изделий ПТС. Данный подход позволяет проводить расчетно-экспериментальную отработку оборудования не только для АСУ, но и для большого количества крупногабаритного оборудования, устанавливаемого на АЭС.

Ключевые слова: программно-технические средства, численное моделирование, расчетная отработка, экспериментальная отработка, радиоэлектронная аппаратура, энергоблок, блочный пункт управления, атомная электростанция.

Введение

В настоящее время на атомных электростанциях (АЭС) для управления энергоблоком (ЭБ) используются автоматизированные системы управления (АСУ), состоящие из программно-технических средств (ПТС) специального назначения. ПТС представляют собой сложно-функциональную радиоэлектронную аппаратуру (РЭА), построенную по модульному иерархическому принципу, и являются информационным и управляющим инструментом в виде отдельных самостоятельных систем.

1. *Технические средства оперативного диспетчерского управления* энергоблоком (ТС ОДУ) служат для создания на блочном пункте управления ЭБ АЭС средств обобщенной мнемосхемы резервной зоны контроля и управления оборудованием нормальной эксплуатации энергоблока. Конструкция ПТС представляет собой шкаф с установленными в нем электронными блоками (мозаичные элементы контроля, управления и индикации, измерительные приборы, монитор, клавиатура, трекбол, сетевые фильтры, акустическая система, оптический кросс и др.). Фрагмент конструкции представлен на рис. 1.

2. *Программно-технический комплекс системы верхнего блочного уровня управления* (СВБУ) служит для централизации информационных потоков и предоставления оперативному персоналу АЭС необходимых средств управления. Конструкция ПТС представляет

собой пульт, состоящий из двух тумб со столешницами, и установленными мониторами. Одна из тумб предназначена для установки аппаратной части (на 19” адаптеры установлено оборудование рабочей станции), другая – для размещения клеммных соединителей, обеспечивающих соединение элементов МПКУ с внешними устройствами.

3. Система регистрации важных параметров эксплуатации энергоблока (СРВПЭ) служит для сбора данных от всех предусмотренных источников информации, их записи и хранения, а также для передачи информации на СВБУ о неисправностях технических и программных средств СРВПЭ. Конструкция ПТС представляет собой шкаф с установленными в нем электронными блоками (на 19” адаптеры установлено в зависимости от модификации от одного до трех оптических кроссов, к которым подсоединяются внешние волоконно-оптические кабели, промышленные компьютеры, источники переключения питающих сетей, источники бесперебойного питания).

В соответствии с техническими условиями эксплуатации для оборудования, поставляемого на АЭС, а также требованиями ГОСТ 25804.3-83 [1], конструкция ПТС должна быть прочной и работоспособной при воздействии:

- механических факторов (синусоидальная вибрация, удары, сейсмические нагрузки, воздействия от удара падающего самолета и воздушной ударной волны);
- климатических факторов (перепады температуры окружающей среды в заданном диапазоне и относительная влажность).

Конструкции ПТС (шкаф представляет собой сваренную балочную конструкцию с установленными электронными модулями соединенными кабельными трассами) состоят из множества составных элементов, количество которых может достигать нескольких тысяч. При этом ПТС являются массогабаритными конструкциями, для которых, в большинстве своем, нет возможности проведения классических натуральных испытаний на воздействие заданных механических факторов. Причиной этого является сложность выбора испытательных вибростендов, способных работать с такими массогабаритными объектами. Аналогичная проблема возникает и для других конструктивных элементов АЭС, отличающихся большой массой и габаритами (элементы трубопроводной арматуры, элементы реакторных установок, турбины и т.п.) Обоснование прочности и стойкости таких объектов, как правило, осуществляется много-итерационным расчетным путем с учетом приближений при использовании численных методов [2] и субъективных методик различных групп инженеров. Следует заметить, что эффективную разработку массогабаритных конструкций, в том числе, данного класса РЭА (конструкции ПТС), быструю адаптацию проектов под новые требования заказчиков, обеспечение конкурентоспособности по техническим параметрам и стоимостным показателям можно реализовать только с применением технологий расчетно-экспериментальной отработки изделий на основе современных систем автоматизированного проектирования и модальных испытаний.

Предметом исследования в настоящей статье является технология расчетно-экспериментальной отработки ПТС при проектировании. Классический подход предполагает здесь два основных этапа:

- 1) проектирование конструкции ПТС [3] с расчетной отработкой для минимизации отказов оборудования на уровне стендовых испытаний (экспериментальная отработка);
- 2) проведение стендовых испытаний.

Для проектирования оборудования АСУ ТП АЭС, в частности, оборудования систем ТС ОДУ, СВБУ, СРВПЭ, используется как коммерческие программные продукты класса САД (САПР NX, Eplan, ACAD, Компас и др.), так и ПО класса CAE-Simcenter 3D, которое имеет встроенный, полнофункциональный САД модуль от САПР NX. САД модули предназначены для твердотельного моделирования, создания 3D-моделей и на их основе чертежей конструкций ПТС (рис. 2). Это классический подход на основе ассоциативности данных и использования технологии «мастер моделей». Геометрия ПТС в виде 3D-моделей является основой для построения расчетных моделей и проведения расчетной отработки в Simcenter

3D. ПО Simcenter 3D поддерживает возможность импорта 3D-моделей из сторонних CAD САПР с применением универсальных форматов (IGES, STEP и др.) или на уровне геометрического ядра Parasolid. Расчетная отработка ведется с учетом внешних нагрузок [4].

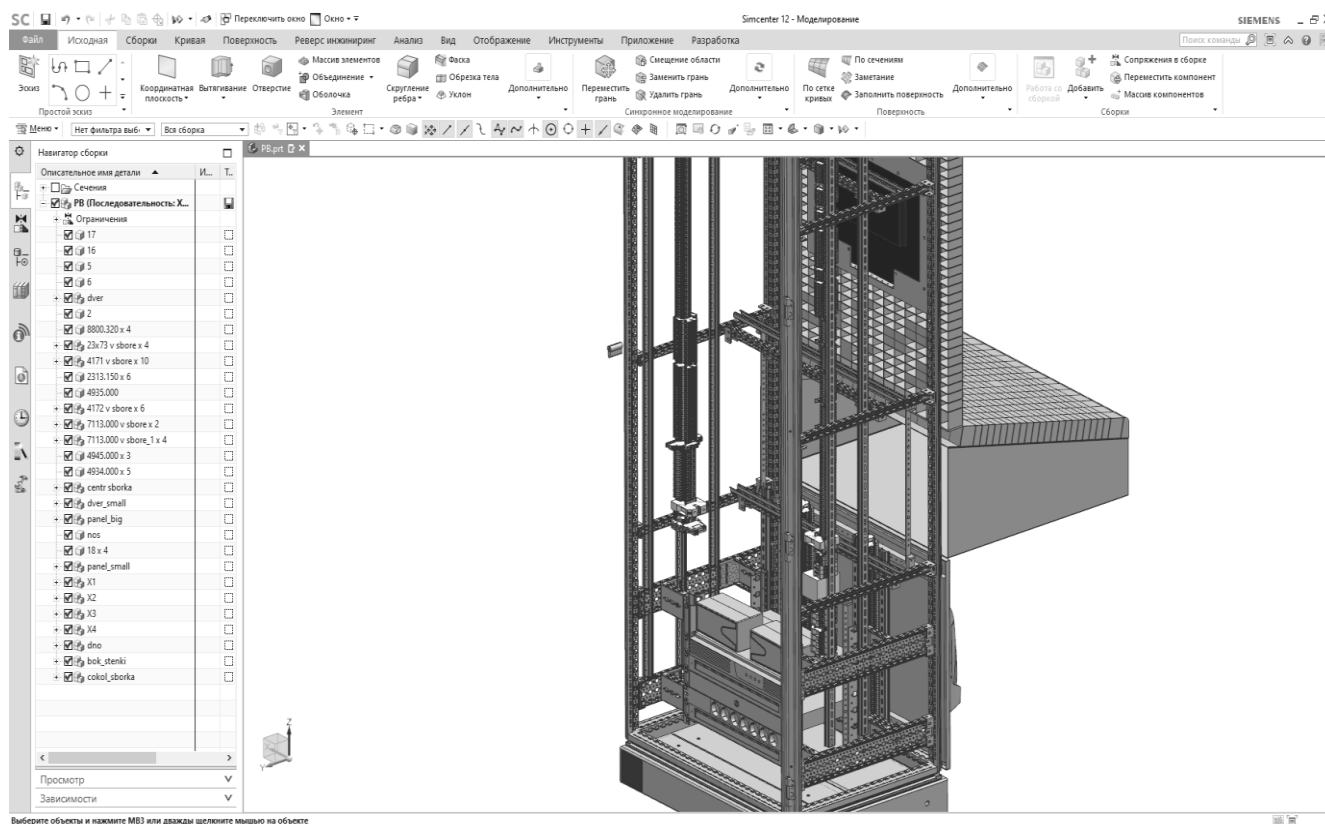


Рис. 1. Фрагмент конструкции ПТС, модель в Simcenter 3D

О применяемых системах автоматизированного проектирования и технологиях расчетно-экспериментальной отработки

Основным видом нагрузок на ПТС являются динамические: синусоидальная вибрация, максимальное расчетное землетрясение (МРЗ), проектное землетрясение (ПЗ), падение самолета (ПС), воздушная ударная волна (ВУВ). ПТС устанавливаются в здании АЭС путем приварки цокольной части к металлическим закладным элементам конструкции перекрытия. Таким образом, все выше перечисленные нагрузки передаются через здание АЭС на основание ПТС – цоколь. При проведении расчетов на внешние механические воздействия ПТС рассматривается как конструкция с вынужденными динамическими перемещениями основания. В результате расчетных исследований производится анализ собственных частот конструкции, анализ откликов конструкции на динамические воздействия, оценка уровня перегрузок, напряжений, деформаций и т.п. В случае нарушения прочности, жесткости, ударо-вибро-стойкости конструкции и электронных компонентов производится доработка (оптимизация) конструкции с дальнейшими новыми расчетными исследованиями. Такие расчетные исследования должны проводиться для всех модификаций и исполнений ПТС.

Учет влияния внешних воздействующих факторов на работу изделия ПТС АСУ ТП АЭС является важной составляющей получения надежной и конкурентно способной продукции. В этом плане проводятся как расчетные оценки, так и экспериментальная отработка изделий. Это классические (стандартные) составляющие современного процесса проектирования. Расчетная отработка производится с целью минимизации отказов изделия, которые могут произойти при испытаниях. Экспериментальная отработка в виде стендовых или натур-

ных испытаний имеет целью получить окончательные доказательства о работоспособности, прочности и надежности изделия.

Как правило, процессы расчетной и экспериментальной отработки распределены между различными подразделениями предприятия. Расчетчик субъективно принимает решение о математической постановке расчетной модели изделия, и результат в значительной мере зависит от его квалификации. Результаты расчета могут значительно отличаться от результатов испытаний. Здесь можно уже говорить об «искусстве» создавать корректные расчетные модели изделий. Имеют место и субъективные аспекты: выбор испытательной оснастки, замена реального режима нагружения на эквивалентный (который можно реализовать на имеющемся испытательном оборудовании), выбор мест расположения датчиков и т.п.; в связи с этим возникает ряд проблем.

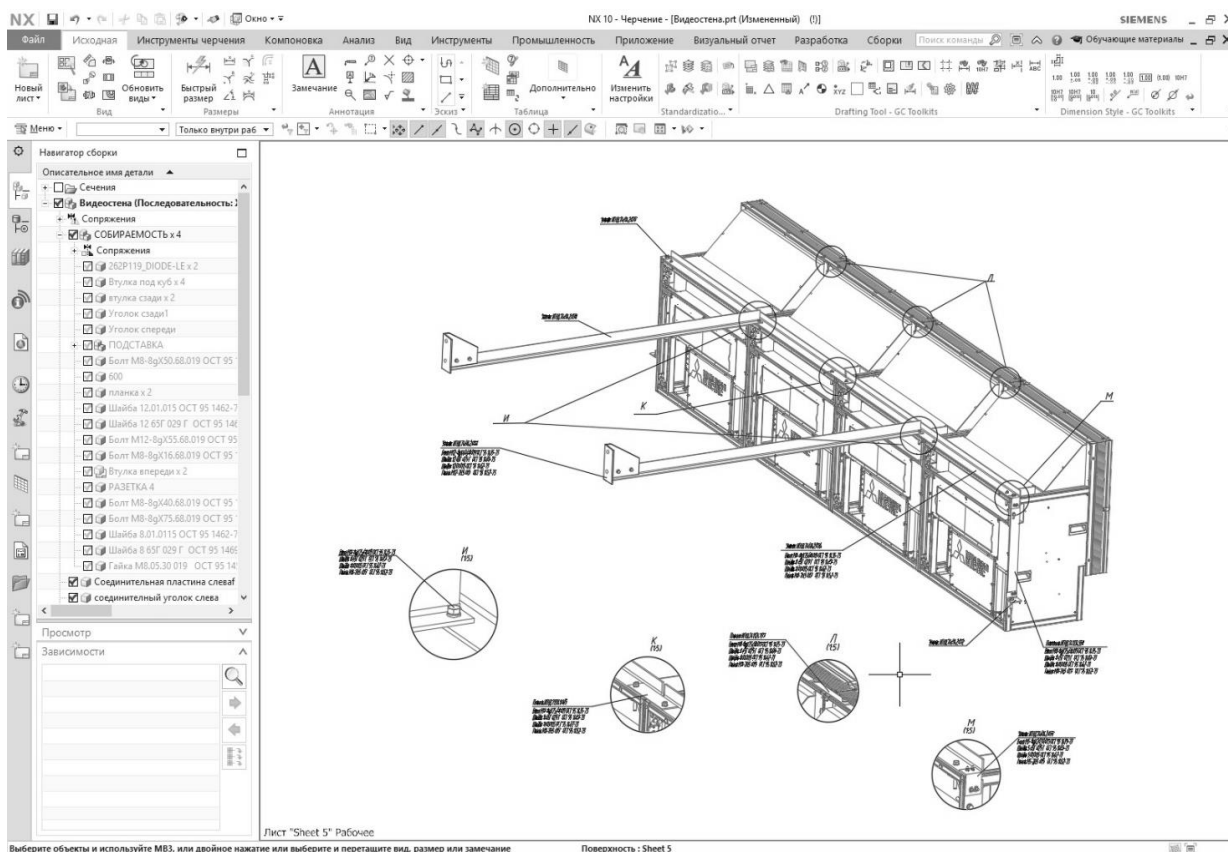


Рис. 2. Монтажный чертеж

Однако на современном этапе развития появилось понятие «модельно-ориентированных испытаний». Здесь подразумевается связь испытаний с расчетным (численным) моделированием, а расчетчики и испытатели работают в одной команде в рамках процесса расчетно-экспериментальной отработки (численный анализ с последующей тарировкой расчетной модели на основе модального эксперимента). Это необходимо для уменьшения инженерного субъективизма на расчетных и экспериментальных этапах отработки, чтобы в конечном итоге получить качественное изделие при минимальных затратах.

Расчетная-экспериментальная отработка изделий ПТС с применением платформы Simcenter

Рассмотрим реализацию процесса «модельно-ориентированных испытаний» (расчетно-экспериментальная отработка изделий) в рамках использования платформы Simcenter и применительно к изделиям ПТС, на которые действуют различные механические нагрузки

динамического характера. Задействованы два основных компонента платформы: Simcenter 3D (рис. 1) и Simcenter Testlab (рис. 3) с набором оборудования SCADAS.

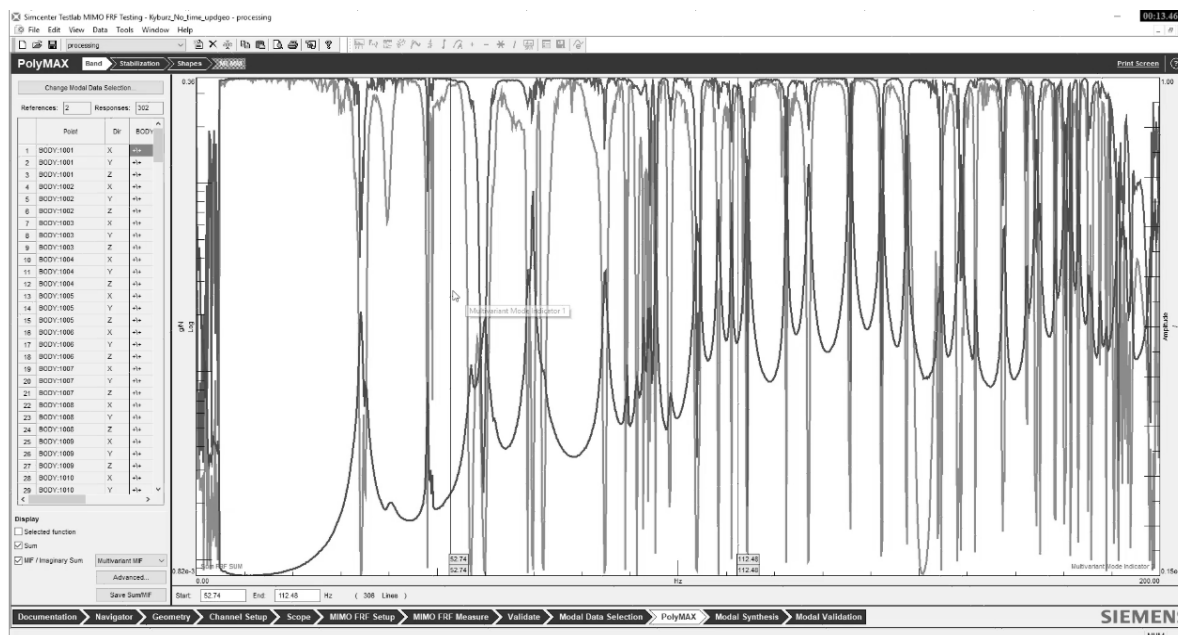


Рис. 3. Программная платформа Simcenter Testlab

На *первом этапе* проводится классическое расчетное (численное) моделирование с построением расчетной модели (РМ) в виде конечно-элементной структуры, ассоциативно связанной с геометрической 3D моделью, с приложенными условиями нагружения и закрепления. Расчетное моделирование проводится в рамках Simcenter 3D, где происходит расчет собственных частот. На основе полученной РМ автоматизировано строится так называемая «проволочная модель» (модель с использованием специальных 1D конечных элементов) в узлах которой производится оптимальная расстановка сенсоров и источников возбуждения. Собственные частоты РМ и проволочной модели корреляционно связываются. В целом это называется «претест анализ» (рис. 4), результатом которого является «тест модель» («проволочная модель» с набором сенсоров и источников возбуждения, привязанных по координатам узлов, а также набор расчетных собственных частот). Полученная «тест модель» передается в Simcenter Testlab.

Второй этап – модальные испытания (рис. 4). В рамках подготовки производится установка (вывешивание) экспериментального образца изделия (в нашем случае использовался опытный образец ПТС системы ТС ОДУ АЭС «Куданкулам», рис. 5). На экспериментальном образце в координатных местах согласно «тест модели» устанавливаются источники возбуждения и сенсоры (датчики оборудования SCADAS) для получения откликов модели. В качестве возбуждения могут использоваться локальные генераторы вибрации (рис. 6) или возбуждение осуществляется путем удара специальным динамическим молотком (рис. 7). Отклики модели – передаточные функции в частотной или временной области с амплитудой в виде ускорений, перемещений, напряжений, деформаций и др. (в зависимости от типа датчика). Дальнейший процесс – это измерение и получение передаточных функций откликов в местах установки сенсоров с учетом воздействий возбуждения. На основе измеренных передаточных функций откликов производится расчет амплитудно-частотных и демпфирующих характеристик экспериментального образца изделия. Для этого используется специальный функционал (модальный анализ) Simcenter Testlab. Результатом модальных испытаний является «экспериментальная модель» («проволочная модель» с набором воздействий возбуждения и передаточных функций откликов, привязанных по координатам динамических нагру-

зок и датчиков измерений соответственно, а также набор экспериментальных собственных частот и коэффициентов демпфирования). Полученная «экспериментальная модель» передается в Simcenter 3D для дальнейшего уточнения (тарировки) РМ.

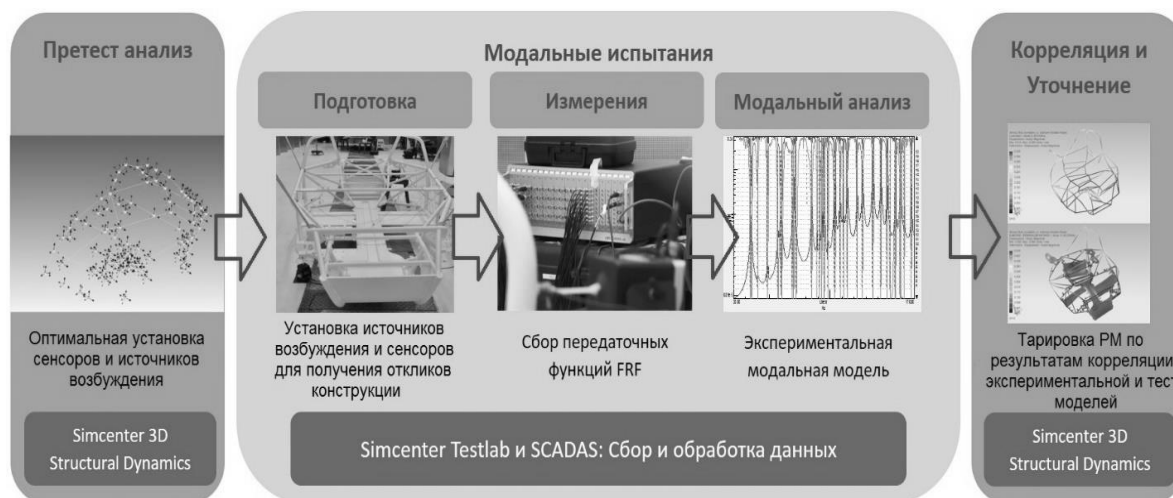


Рис. 4. Расчетно-экспериментальная отработка изделий

На *третьем этапе* в Simcenter 3D производится корреляция расчетных и экспериментальных данных на уровне «тест» и «экспериментальной» моделей. Дальнейшее уточнение (тарировка) РМ производится на основе корреляции «экспериментальной» и «тест» моделей с применением оптимизатора Simcenter Nastran Sol 200 [5]. Оптимизации подвергается конечно-элементная структура РМ за счет изменения величины дискретизации сеток, параметров материала, ввода специальных конечных элементов и т.п. При этом целевая функция направлена на совпадение расчетных и испытательных собственных частот, их амплитуд и форм колебаний с учетом экспериментальных коэффициентов демпфирования. В результате получается тарированная РМ, результаты расчета собственных частот и откликов на динамические воздействия которой с минимальной погрешностью совпадают с результатами испытаний. Это уже верифицированная по результатам испытаний математическая модель изделия.



Рис. 5. Установка (вывешивание) экспериментального образца ПТС



Рис. 6. Источник возбуждения вибрационной нагрузки

На основе верифицированной математической модели можно провести и другие расчетные исследования, которые невозможно воспроизвести на имеющемся испытательном оборудовании ввиду массогабаритных характеристик изделия. Верифицированные математические модели также могут использоваться в рамках Simcenter Amesim для общесистемных расчетных исследований.



Рис. 7. Динамический молоток для возбуждения ударного воздействия

Заключение

При описанном расчетно-экспериментальном подходе («модельно-ориентированных испытаний») минимизируется субъективизм инженеров, большое количество классических экспериментов заменяется модальными испытаниями с последующей расчетной отработкой на верифицированных моделях. Это особенно важно при проектировании крупногабаритных изделий ПТС, когда нет возможности проведения испытаний ввиду их дороговизны или ввиду отсутствия испытательного оборудования требуемой мощности или требуемых характеристик. Данный подход позволяет проводить расчетно-экспериментальную отработку оборудования не только для АСУ, но и для большого количества крупногабаритного оборудования, устанавливаемого на АЭС. Речь идет об оборудовании и конструкциях, которые ввиду массогабаритных характеристик невозможно испытать на классических вибростендах.

Расчетно-экспериментальный подход реализован в рамках плановой тематики службы Главного конструктора по АСУ ТП в филиале ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю.Е. Седакова» и планируется к внедрению в процессе проектирования конструкций ПТС.

Библиографический список

1. ГОСТ 25804.3-83. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование систем управления технологическими процессами атомных электростанций. Требования по стойкости, прочности и устойчивости к внешним воздействующим факторам.
2. **Зенкевич, О.К.** Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
3. **Кожевников, С.В.** Моделирование конструкций ПТС / С.В. Кожевников, А.А. Миронов. // Сборник материалов XV Международной молодежной научно-техн. конф. «Будущее технической науки». – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017.
4. Оценка работоспособности электрорадиоизделий в конструкциях радиоэлектронной аппаратуры при динамическом нагружении / С.В. Кожевников, С.А. Пименов. // Сборник докладов 12-й научно-технической конференции «Молодежь в науке». – Саров: изд-во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014.
5. 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.

*Дата поступления
в редакцию: 25.03.2020*

S.V. Kozhevnikov, S.A. Pimenov

**COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL PROCESSING
OF SOFTWARE AND HARDWARE**

Measuring System Research Institute n.a. Yu.Ye. Sedakov

Purpose: Consideration of influence of external factors on the equipment of the automated process control system of NPP as an important component for obtaining reliable and competitive goods. At the present development stage the need arose for linking tests with computational (numerical) modeling as part of the computational and experimental processing. The implementation of the computational and experimental processing of products is considered within Simcenter platform use and in relation to software and hardware products that are subject to various dynamic mechanical loads.

Design/methodology/approach: A classical computational (numerical) simulation is carried out by construction of a computational model in the form of a finite element structure associatively associated with a 3D geometric model under loading and fixing conditions applied. Within preparation of modal tests, installation (hanging-out) of an experimental product sample is carried out. Calculated and experimental data are correlated by Simcenter 3D at the level of “test” and “experimental” models. The subsequent refinement (calibration) of the calculation models is based on the correlation of the “experimental” and “test” models using Simcenter Nastran Sol 200 optimizer. On the basis of the verified mathematical model, it is possible to carry out computational studies that cannot be reproduced on existing test equipment or are impossible due to weight and size characteristics of the product.

Conclusions: As a result of such computational and experimental approach, the subjectivity of engineers is minimized; a large number of classical experiments are replaced by modal test followed by calculated testing on verified models.

Key words: software and hardware, numerical simulation, estimated mining, experimental testing, radio-electronic equipment, generating unit, main control room, nuclear power plant.