

Подсистема компьютерной имитации для многоцелевых испытаний газотурбинных установок мощностью до 40 МВт

Б.В. Кавалеров (ПНИПУ), А.Н. Рязанов (ОАО «Протон-ПМ»)

Рассматриваются стендовые испытания газотурбинных установок и систем управления газотурбинными установками наземного применения. В настоящее время такие газотурбинные установки часто выполняются на основе переоборудования серийных авиационных двигателей. В традиционную схему испытаний газотурбинных установок предложено включить подсистему для компьютерной имитации газотурбинных установок с учетом характеристик наземной нагрузки. Представлены основные задачи, решаемые подсистемой имитации, и обсуждаются достигаемые при этом преимущества¹.

Ключевые слова: автоматизация испытаний, компьютерное моделирование, газотурбинная установка, синхронный генератор, электроэнергетическая система.

Введение

Авиационные газотурбинные установки (ГТУ) находят широкое применение в наземных условиях: на их базе создаются ГТУ для привода газоперекачивающих агрегатов и электрогенераторов. При этом на основе единственного типа серийного авиационного двигателя получают целый ряд наземных ГТУ различного применения и различной мощности. Например, на основе авиационного двигателя Д-30 за счет внесения необходимых конструктивных изменений отечественными предприятиями изготавливаются наземные ГТУ мощностью 2,5 МВт, 4 МВт и 6 МВт в версиях для электроэнергетики и перекачки газа. При проведении испытаний таких ГТУ полезно учитывать специфику их наземного использования: принимать во внимание поведение нагрузки ГТУ и реакцию на изменения нагрузки со стороны управляющих устройств ГТУ. Хорошие возможности для этого предоставляет имитационное моделирование ГТУ вместе с внешней нагрузкой. В свою очередь компьютерная имитация открывает возможности для дальнейшего совершенствования испытаний. Известно, что испытания относятся к очень ответственным и трудоемким этапам производства и эксплуатации ГТУ и систем автоматического управления (САУ) ГТУ. Поэтому вопросам автоматизации испытаний уделяется повышенное внимание [1].

Испытательные стенды

В 2013 г. на испытательном полигоне ОАО «Протон–Пермские моторы» запущен в эксплуатацию многоцелевой универсальный стенд, позволяющий серийно испытывать ГТУ мощностью до 40 МВт. Испытуемые ГТУ нагружаются с помощью гидротормоза. Этот стенд может быть адаптирован под ГТУ различных промышленных производителей. При участии Пермского национального исследовательского политехнического университета в рамках Постановления Правительства РФ от 9.04.2010 № 218 выполнена разработка трехуровневой иерархической системы автоматизации испытаний (САИ) для

единого центра многоцелевых испытаний ГТУ мощностью до 40 МВт различных версий применения [2].

Нижний уровень САИ (рис. 1) обеспечивает взаимодействие с модулями устройств связи с объектом (УСО), транспортировку первичной измеренной информации на второй уровень, получение управляющей информации со второго уровня и выдачу управляющих сигналов через выходные модули УСО.

Второй уровень обеспечивает непосредственное проведение испытаний и первичную обработку поступившей с нижнего уровня информации. Здесь обеспечивается решение следующих основных задач: проверка и оценка работоспособности измерительной подсистемы конкретного стенда; формирование управляющих воздействий на испытываемую ГТУ и аппаратуру стенда в автоматическом режиме или по командам оператора; сбор данных, параметров и сигналов стендовых систем на протяжении всего времени

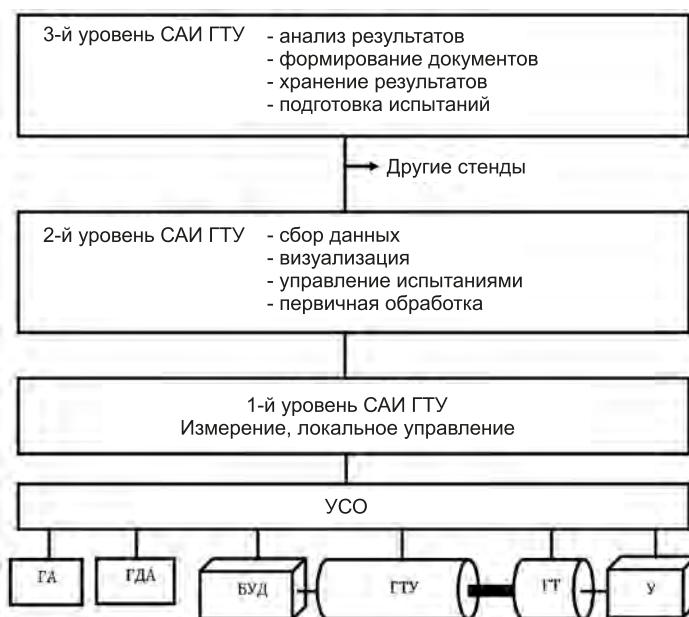


Рис. 1. Иерархическая структура САИ многоцелевого универсального стенда для испытания ГТУ, где ГА – газоанализатор, ГДА – газодожимной агрегат, БУД – блок управления двигателем, ГТ – гидротормоз, У – устройство управления гидротормозом

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ № 13.832.2014/К.

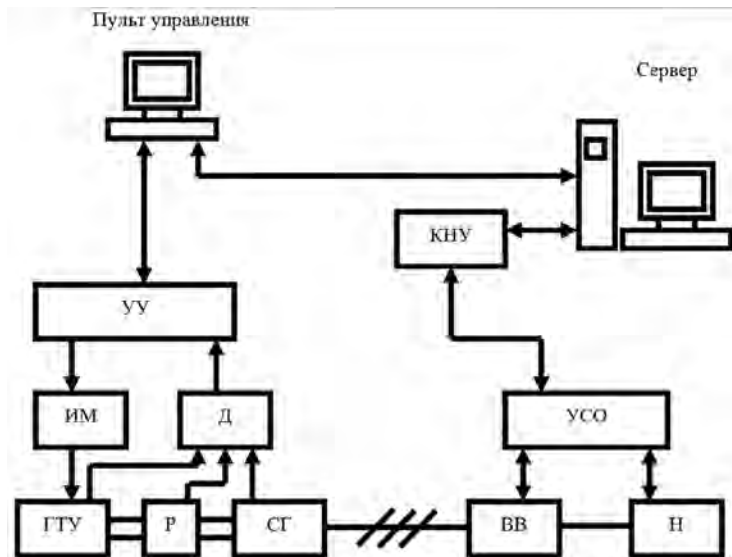


Рис. 2. Структурная схема стенда испытания ГТУ для электростанций, где УУ – устройство управления, Р – редуктор, ИМ – исполнительные механизмы, Д – датчики, СГ – синхронный генератор, ВВ – высоковольтный выключатель, Н – загрузочное поле генератора, УСО – устройства связи с объектом, КНУ – контроллер нижнего уровня

испытания, первичная обработка поступающей информации; распознавание режимов по основным параметрам; визуализация измеренных и преобразованных параметров, отображение параметров стенда и испытываемой ГТУ на мнемосхеме; сигнализация аварийных и предаварийных режимов и ситуаций, формирование блокировок на управляющие воздействия; метрологическое обслуживание системы.

Третий (верхний) уровень САИ обеспечивает решение следующих задач: хранение данных о ходе испытаний и их результатов в единой БД; математическая постэкспериментальная обработка и анализ результатов испытаний; конвертация результатов испытаний в требуемый формат; создание и выдача итоговых документов; хранение всей информации по ходу испытаний с возможностью выполнения гибких запросов по любым параметрам, включая поиск результатов по сложным критериям, сравнение и анализ результатов испытаний.

Таким образом верхний уровень характеризуется независимостью от конкретной аппаратуры стенда и вида испытываемого изделия.

В силу универсальности рассмотренного стенда все испытываемые ГТУ нагружаются одинаково: посредством гидротормоза. Также на верхний уровень САИ может поступать информация и с других стендов, где учитывается специфика нагрузки ГТУ, и записываться в единую БД. Таким образом происходит стандартизация процедур хранения и обработки данных об испытываемых ГТУ.

Рассмотрим стенд, позволяющий учитывать специфику ГТУ для привода электрогенератора, расположенный на испытательном полигоне ОАО «Протон – Пермские моторы». На стенде размещается ис-

пытываемая электростанция (рис. 2). Нагружение происходит за счет поля активных сопротивлений ступенями по 125 кВт, вводимых/выводимых в произвольной последовательности. Испытания выполняются исключительно в автономном режиме (без сети). Такие испытания позволяют значительно сократить сроки пусконаладочных работ. Возможности стенда позволяют проводить испытания ГТУ для электростанций мощностью до 6 МВт [2].

На верхнем уровне САИ накапливаются экспериментальные данные со всех испытательных стендов предприятия. Сюда же может поступать информация с полунатурных испытательных стендов и от предприятий-партнеров. В полунатурных стендах используется реальное устройство управления ГТУ, а сама ГТУ и нагрузка ГТУ имитируется с помощью компьютерной модели (рис. 3).

В результате верхний уровень САИ предоставляет дополнительные возможности работы с экспериментальными данными. В первую очередь это относится к построению различных моделей ГТУ на основе полученных экспериментальных данных, эти модели могут использоваться для имитационного моделирования поведения ГТУ и нагрузки ГТУ. Компьютерное моделирование применяется при отладке и проверке специализированного ПО испытательных стендов, обучении лиц, проводящих испытания, распознавании характерных и аварийных режимов работы испытываемой ГТУ, сопровождении ГТУ во время эксплуатации. Перспективно использование компьютерного моделирования для испытаний, предварительной настройки и оптимизации САУ ГТУ. В этом случае ГТУ и нагрузка ГТУ имитируется с помощью компьютер-

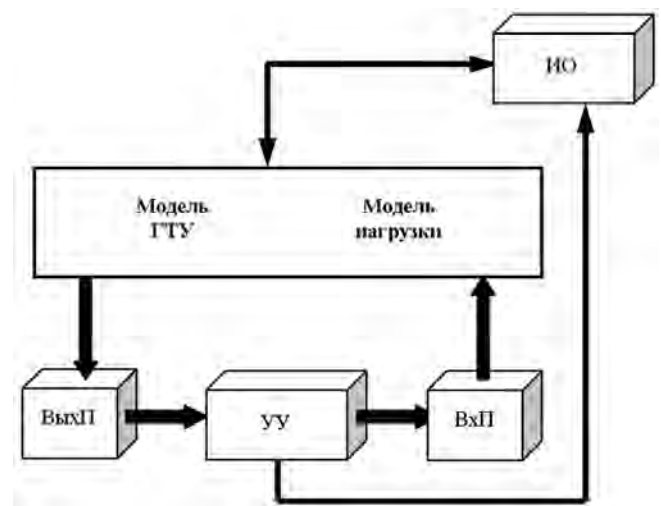


Рис.3. Полунатурный испытательный стенд, где УУ – устройство управления ГТУ, ВыхГ, ВхГ – выходные и входные преобразователи координат, ИО – интерфейс оператора

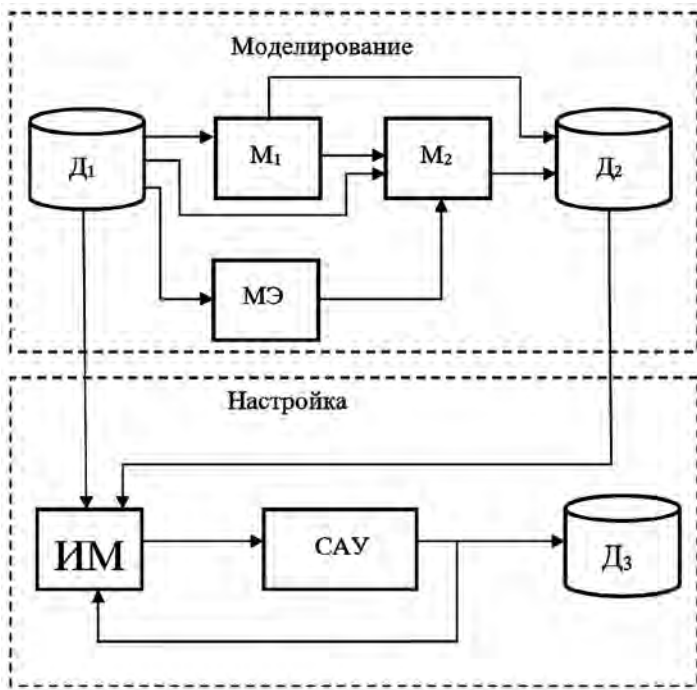


Рис. 4. Функциональная структура подсистемы компьютерного моделирования: D_1 – экспериментальные данные, M_1 – построение модели ГТУ, $MЭ$ – модель электроэнергетической системы, M_2 – построение совместной модели ГТУ и нагрузки, D_2 – открытое множество моделей, ИМ – имитационное моделирование, САУ – настройка САУ, D_3 – открытое множество предварительных настроек САУ

ной модели. Для реализации этих функций структура третьего уровня САИ дополняется подсистемой имитационного моделирования. Подготовленные имитационные модели, а также полученные предварительные результаты настройки САУ используются в дальнейшем при проведении испытаний ГТУ и САУ ГТУ, в том числе на полунатурных стендах.

Подсистема компьютерного моделирования

Выделим две основные задачи, решаемые подсистемой компьютерного моделирования:

- создание по результатам испытаний открытого множества различных моделей ГТУ и нагрузки ГТУ;
- предварительная настройка САУ ГТУ с использованием полученных моделей (рис. 4).

Задача моделирования решается следующим образом. На основе экспериментальных данных (D_1), полученных по результатам испытаний, строятся модели ГТУ различных версий применения (M_1): для перекачки газа, для электростанций, в версии микротурбин. Полученные модели формируют открытое множество D_2 . Модель ГТУ для электростанции дополняется моделью электрической нагрузки (M_2). Последняя строится с помощью заранее подготовленной модели электроэнергетической системы ($MЭ$). Полученные модели используются при испытаниях ГТУ и при предварительной настройке САУ ГТУ.

Задача настройки САУ включает следующую последовательность действий. Выполняется имита-

ционное моделирование (ИМ) на основе полученных ранее моделей ГТУ и нагрузки (D_2) и с учетом данных натурных экспериментов (D_1). В ходе имитационного моделирования производится выбор оптимальных настроек регуляторов САУ ГТУ. С этой целью используются программы регуляторов САУ из штатных управляющих устройств САУ ГТУ. Затем результаты настройки вновь проверяются с помощью моделирования в иных режимных ситуациях и на более сложных моделях. После завершения процесса настройки результаты записываются в БД настроек САУ ГТУ (D_3). Полученные предварительные настройки САУ используются при полунатурных и натурных испытаниях САУ ГТУ, что сокращает время испытаний и повышает качество регулирования ГТУ.

Построение моделей

При построении моделей ГТУ используются экспериментальные данные. Методы построения моделей по экспериментальным данным разрабатываются в соответствии с теорией идентификации. Строгая идентификация в соответствии с принципом суперпозиции возможна для линейных математических моделей относительно параметров. В случае нелинейных моделей возможны некоторые приближенные подходы, опирающиеся на априорную информацию. Отметим, что вместо экспериментальных данных для построения моделей могут использоваться результаты, полученные при моделировании на сложных поэлементных верифицированных моделях ГТУ.

Построение моделей нагрузки ГТУ встречает наибольшие трудности, когда рассматривается ГТУ для электроэнергетики. Электроэнергетическая система (ЭЭС) обладает сложной структурой и многорежимным характером работы. К тому же испытательные стенды (рис. 2.) позволяют воспроизвести ограниченный перечень режимов работы. Из рассмотрения выпадают многие важные для практики режимные ситуации, например: пуск мощных асинхронных двигателей; короткие замыкания; отключения линий электропередачи; отключение/включение одного или нескольких генераторов электростанции; переход электростанции с автономного режима работы на работу с мощной сетью; изменение структуры и состава комплексной нелинейной нагрузки при значительных изменениях электрической мощности.

На рис. 5. показано окно программы для построения упрощенных моделей электрической нагрузки по результатам эксперимента на сложной модели ЭЭС. Для этого предварительно задается структура сложной модели на наборном поле (3). Затем рассчитывается переходный процесс на сложной модели (5). По этому переходному процессу получают упрощенную модель. Результаты моделирования на упрощенной модели сравнивают с результатами моделирова-

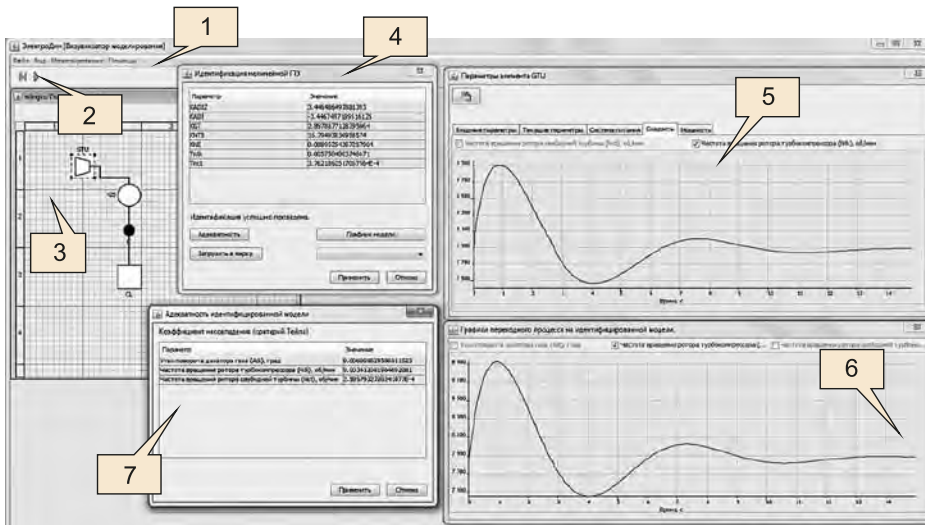


Рис. 5. Интерфейс программы построения упрощенной модели: 1 – главное меню программы, 2 – панель моделирования, 3 – окно отображения структуры сложной модели, 4 – окно коэффициентов упрощенной модели, полученных с помощью идентификации, 5 – окно отображения переходного процесса на сложной модели, 6 – окно отображения переходного процесса упрощенной модели, 7 – окно оценки адекватности упрощенной модели

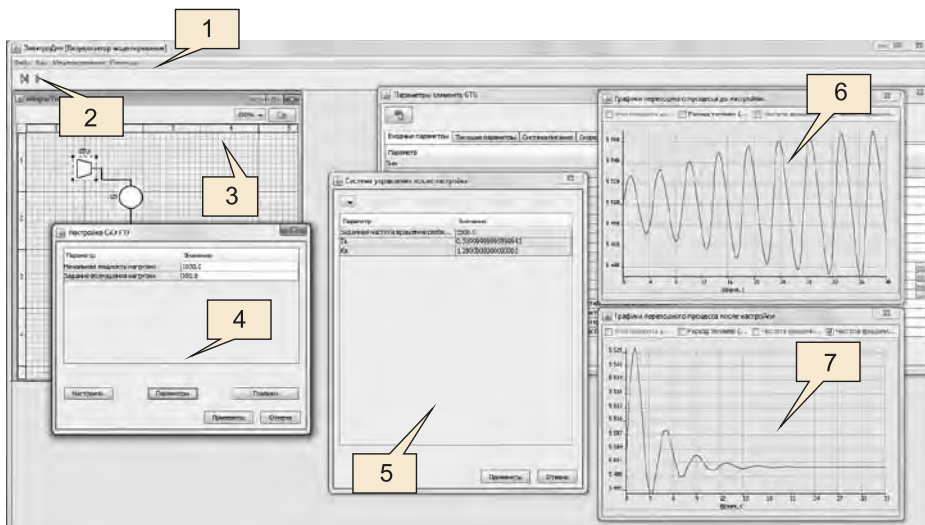


Рис. 6. Интерфейс программы настройки САУ: 1 – главное меню приложения, 2 – панель моделирования, 3 – окно отображения схемы проекта, 4 – главное меню модуля настройки САУ ГТУ, 5 – окно отображения настроенных параметров САУ, 6 – окно отображения результатов до настройки, 7 – окно отображения результатов после настройки.

ния на сложной модели (6). При этом оцениваются меры адекватности (7).

Аналогичные программы в рамках подсистемы компьютерного моделирования созданы для построения упрощенных моделей ГТУ по экспериментальным данным стендовых испытаний: ГТУ для электростанции, ГТУ для перекачки газа, одновальная

микротурбина, двухвальная микротурбина и др.

Настройка САУ

В качестве примера на рис. 6 показана настройка САУ ГТУ двухвальной конструкции, применяемой для привода электрогенератора. В составе программы реализуются следующие функции: выбор метода и критерия оптимизации; задание ограничений на параметры; отображение результатов моделирования до/после настройки, расчет показателей качества настройки.

Заключение

Подсистема компьютерной имитации позволяет повысить уровень автоматизации испытаний ГТУ и САУ ГТУ. Полученные на различных стендах экспериментальные данные используются для построения открытого множества компьютерных моделей. Эти модели могут использоваться в различных задачах, например: тренинг персонала, совершенствование программ испытаний, диагностика ГТУ, сопровождение ГТУ во время эксплуатации. Использование полученных моделей для предварительной настройки САУ ГТУ открывает дополнительные возможности для совершенствования испытаний и для повышения показателей качества работы САУ ГТУ различных версий применения.

Список литературы

1. Кавалеров Б.В. Автоматизация испытаний САУ ГТУ газотурбинных мини-электростанций при проектировании и настройке // Автоматизация в промышленности. 2011. №1. С.12-17.
2. Кавалеров Б.В., Казанцев В.П., Шмидт И.А. и др. Интеллектуализация испытаний конвертированных газотурбинных установок для электроэнергетики // Системы управления и информационные технологии. 2012. №1(47). С. 84-88.

Кавалеров Борис Владимирович – зав. кафедрой электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета,
Рязанов Алексей Николаевич – начальник отдела АСУТП ООО «Протон – Пермские моторы»
 Контактный телефон (342) 219-86-61.
 E-mail: kbv@pstu.ru ranperm@mail.ru