

DOI: 10.15593/2224-9982/2019.57.08

УДК 621.452.3:519.86

**Б.В. Кавалеров, А.И. Суслов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
КОНВЕРТИРОВАННЫМИ ГАЗОТУРБИНЫМИ УСТАНОВКАМИ  
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ЭЛЕКТРОСИСТЕМЫ**

Посвящена автоматизации испытаний систем управления, которые проектируются для конвертированных газотурбинных установок. Под конвертированными газотурбинными установками здесь понимаются авиационные двигатели, переоборудованные для наземного использования в качестве силового привода для электрогенераторов. В настоящее время построенные на их базе газотурбинные электростанции малой и средней мощности выступают в качестве одного из основных элементов распределенной электроэнергетики. Совершенство систем автоматического управления является одним из важных условий достижения требуемых показателей качества вырабатываемой электроэнергии. Показано, что энергетические объекты ввиду сложности и ответственности назначения, как правило, не допускают проведения полного набора натурных экспериментов, необходимых для испытания управляющей системы, а ограниченные натурные эксперименты не позволяют с нужной достоверностью оценить функционирование системы автоматического управления и к тому же весьма трудоемки. Исходя из этого для улучшения показателей качества систем управления следует на максимально ранних стадиях проектирования учитывать поведение электрической системы, поскольку именно она определяет режим работы газотурбинной установки. С этой целью предложено в процессе испытаний уже на стадиях научно-исследовательских испытаний включить в состав средств испытаний математическую модель электрической системы. Такая модель должна быть многорежимной, должна моделировать электрическую систему произвольной структуры и состава элементов. Приводится описание разработанной модели и созданных на ее основе программных комплексов, рассматриваемых как средства испытания алгоритмов систем управления газотурбинными установками для электроэнергетики. Оценивается преимущество такой методики испытаний и ее актуальность для отрасли.

**Ключевые слова:** автоматизация испытаний, газотурбинная установка, электрическая система, система автоматического управления, математическое моделирование.

**B.V. Kavalеров, A.I. Suslov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**AUTOMATION OF TESTS OF CONTROL SYSTEMS OF CONVERTED GAS  
TURBINE INSTALLATIONS BASED ON THE APPLICATION  
OF THE MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRICAL SYSTEM**

The article is devoted to the automation of testing control systems that are designed for converted gas turbine plants. Under the converted gas turbine installations here refers to aircraft engines, converted for ground use as a power actuator for electric generators. At present, gas turbine power plants of small and medium capacity, built on their base, are one of the main elements of a distributed electric power industry. The perfection of automatic control systems is one of the important conditions for achieving the required indicators of the quality of generated electricity. The article shows that, due to the complexity and responsibility of the assignment, energy facilities, as a rule, do not allow carrying out a full set of field experiments necessary for testing the control systems, and limited field experiments do not allow evaluating the operation of the automatic control system with the necessary reliability and, moreover, are very laborious. Therefore, in order to improve the quality indicators of control systems, it is necessary to take into account the behavior of the electrical system at the earliest possible stages of design, since it determines the operating mode of the gas turbine unit. To this end, it has been proposed to include in the testing process, already at the stages of research testing, a mathematical model of the electrical system into the composition of the testing facilities. Such a model should be multi-mode, it should simulate the electrical system of arbitrary structure and composition of elements. The description of the developed model and software systems created on its basis, considered as a means of testing the algorithms of gas turbine control systems for the power industry, is given. The advantage of this test method and its relevance for the industry is evaluated.

**Keywords:** test automation, gas turbine installation, electrical system, automatic control system, mathematical modeling.

## Введение

Авиационные газотурбинные установки (ГТУ) находят применение в электроэнергетике. Они вращают электрогенераторы, которые вырабатывают электрическую энергию. При этом в настоящее время предприятия выпускают ГТУ, специально предназначенные для использования в электроэнергетике. Как правило, такие ГТУ строятся на основе авиационных прототипов, в частности предприятия Пермского авиадвигателестроительного комплекса строят такие ГТУ на основе авиационных двигателей Д-30 и ПС-90. В результате на предприятии в настоящее время сформирована широкая линейка газотурбинных установок мощностью от 2,5 до 25 МВт [1]. Ведется разработка ГТУ мощностью свыше 25 МВт.

Такие ГТУ называются конвертированными (газотурбинная установка, в состав которой входит один или несколько двигателей, разработанных на базе их транспортных вариантов (авиационных или судовых))<sup>2</sup>.

Поскольку ГТУ конвертируются для электроэнергетики, преобразованию подвергаются и устройства управления такими ГТУ. В настоящее время системы автоматического управления (САУ) такими ГТУ строятся в основном на основе авиационных прототипов, но нуждаются в привязке к новым условиям эксплуатации и новым законам регулирования. Основным законом регулирования для электроэнергетических ГТУ является стабилизация частоты вращения свободной силовой турбины:

$$n_{CT} = \text{const}, \quad (1)$$

где под свободной или независимой турбиной (рис. 1) понимается турбина низкого давления, приводящая обычно через редуктор во вращение электрогенератор (газотурбинная установка с независимой силовой турбиной – это газотурбинная установка, в которой силовая турбина

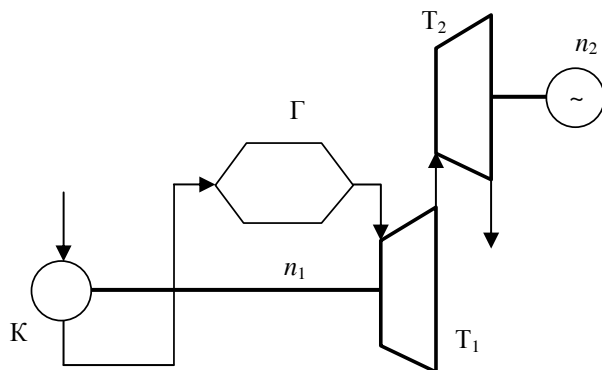


Рис. 1. ГТУ с независимой силовой турбиной: К – компрессор, Г – камера сгорания, Т<sub>1</sub> – турбина высокого давления, Т<sub>2</sub> – турбина низкого давления, n – частота вращения

механически не связана с компрессором)<sup>3</sup>. Закон регулирования (1) объясняется тем, что от частоты вращения электрогенератора зависит частота электропитания, на которую накладываются жесткие ограничения по качеству вырабатываемой электроэнергии (отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать ±0,2 Гц в течение 95 % времени интервала в 1 нед. и ±0,4 Гц в течение 100 % времени интервала в 1 нед.; отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать ±1 Гц в течение 95 % времени интервала в 1 нед. и ±5 Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю)<sup>4</sup>. Ввиду этого одной из главных функций САУ ГТУ является автоматическое регулирование частоты вращения<sup>5</sup>.

<sup>2</sup> ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

<sup>3</sup> Там же.

<sup>4</sup> СТО 70238424.27.040.001–2008. Газотурбинные установки. Условия поставки. Нормы и требования.

<sup>5</sup> Там же.

Помимо требований по частоте, ГТУ должна обеспечивать требования по отклонению и допустимому провалу напряжения (отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в 1 нед.)<sup>6</sup>. Если учесть, что электроэнергетическая ГТУ должна функционировать еще и на различных режимах работы электростанции: автономно, на мощную сеть, параллельно, то становятся понятными высокие требования и широкий перечень задач, решаемых современными САУ ГТУ для электроэнергетики. В самом деле электрическая система, ее конфигурация и состав элементов, ее режимы работы должны во многом определять алгоритмы и характеристики проектируемых САУ ГТУ. Исходя из этого подробный учет поведения электрической системы целесообразен на этапах проектирования и испытания алгоритмов управления САУ ГТУ для сокращения времени испытаний и повышения качества функционирования САУ.

Для такого учета поведения электрической нагрузки и всей внешней электрической системы необходимо использовать математическую модель электрогенератора и электрической системы, поскольку в реальных условиях организовать такие испытания, особенно на этапах проектирования и с учетом разнообразных аварийных режимов, чрезвычайно затратно. Как, например, отмечается в работе [2] энергетические объекты ввиду сложности и ответственности назначения, как правило, не допускают проведения полного набора натуральных экспериментов, необходимых для испытания управляющей системы. Ограниченные же натурные эксперименты не позволяют с нужной достоверностью оценить функционирование САУ и к тому же требуют значительных затрат времени и материальных ресурсов, т.е. весьма трудоемки. В связи с этим основным методом испытания систем управления энергообъектами является организация процесса моделирования с участием реально созданной САУ [2].

Исходя из этого далее обсудим особенности проведения испытаний САУ ГТУ с использованием компьютерных математических моделей электрогенератора и всей электроэнергетической системы (ЭЭС).

### Этапы испытаний

В силу вышеизложенного рассмотрим испытания САУ электроэнергетическими ГТУ прежде всего на стадии проектирования. Согласно работе [3] главной целью испытаний на стадии проектирования является объективная оценка новых идей, концепций и технических характеристик, заложенных в основу новых алгоритмов управления и структур проектируемых САУ ГТУ, а также поэтапное совершенствование принятых проектных решений. Для достижения этой цели решаются следующие основные задачи:

- сбор данных о свойствах проектируемой САУ ГТУ. Здесь имеются в виду данные, которые невозможно получить с помощью расчетов, например с помощью анализа ЛАЧХ или применения известных критериев устойчивости;
- экспериментальная проверка и уточнение характеристик САУ ГТУ, ранее полученных расчетным путем;
- экспериментальная оценка качества принятых решений при разработке и уточнении структуры САУ ГТУ и путей их улучшения;
- оценка и отбор наиболее существенных факторов, влияющих на показатели качества САУ ГТУ.

Для решения вышеперечисленных задач проводят следующие испытания:

- исследовательские (для изучения свойств будущего изделия и нахождения конкретных значений характеристик с заданной точностью и достоверностью);
- сравнительные (для сравнения характеристик различных вариантов изделия);
- контрольные (для контроля качества изделия и его составляющих).

<sup>6</sup> СТО 70238424.27.040.001–2008. Газотурбинные установки. Условия поставки. Нормы и требования.

При этом основная задача исследовательских испытаний состоит в оценке потенциальных возможностей новых идей и концепций при их реализации в будущей САУ ГТУ.

При испытаниях САУ ГТУ прежде всего испытаниям подвергается алгоритмическое обеспечение САУ ГТУ. Эти испытания существенно затратны по времени. Ведь известно, что при выполнении проектов разработки нового программного обеспечения САУ наибольшие усилия затрачиваются именно на этапе отладки новых алгоритмов. При этом в общем времени разработки алгоритмического обеспечения отладка занимает 50–90 %. Ввиду чего часто наиболее эффективным путем повышения надежности САУ, а также снижения затрат на ее разработку и внедрение признается совершенствование испытаний создаваемой САУ на основе возможно более полного математического моделирования условий работы таких САУ. В процессе разработки не известен точный характер потоков информации, степень взаимосвязи между отдельными составными частями системы и т.д. Такие сведения можно получить лишь при натурных испытаниях, что чаще всего невозможно, поэтому необходимы другие меры, к которым и относятся методы моделирования [4].

Испытания алгоритмов САУ на этапах проектирования, как правило выполняются на компьютере или полунатурном стенде. В отличие от традиционных полунатурных испытательных систем (ПНИС) [2, 5–7], которые включают в себя реальную САУ и модель ГТУ, стенды с моделью ЭЭС обладают дополнительной гибкостью, что особенно важно на этапах проектирования САУ, начиная с этапа концептуального проектирования. В свою очередь, компьютерные испытания предоставляют возможность рассматривать варианты перспективных САУ на самых ранних стадиях ее создания. Ограничения, вносимые при ее натурной реализации, следует предварительно учесть и затем уточнять в ходе последующих итераций. В таком случае ПНИС более целесообразна на завершающих стадиях проектирования.

В случае испытания САУ совместно с моделью ЭЭС ситуация осложняется. Мощность множества режимных ситуаций ЭЭС очень значительна. ЭЭС постоянно испытывает внутренние и внешние возмущения режима. Все это ведет к тому, что математическая модель ЭЭС должна постоянно перестраиваться вслед за изменяющейся структурой реального объекта или в соответствии с планом эксперимента, учитывающим наиболее существенные и статистически обусловленные режимы работы. Таким образом, следует сделать вывод о том, что компьютерная модель объекта должна обладать свойствами универсальности и настраиваемости в ходе эксперимента, т.е. иметь адаптивную структуру.

Для того чтобы выявить место этапов проведения испытаний САУ ГТУ в процессе ее разработки и последующей доводки, укажем главные этапы создания новых САУ в соответствии с материалами [8] (рис. 2):

Этап 1 – формирование цели управления САУ, определение перечня управляемых, управляющих и возмущающих сигналов САУ.

Этап 2 – выбор и обоснование точек установки различных корректирующих устройств, описание структурной организации новой САУ.

Этап 3 – создание математических моделей для элементов неизменяемой части системы (т.е. для САУ без корректирующих устройств).

Этап 4 – выбор желаемой (эталонной) переходной характеристики или(и) целевого функционала качества САУ.

Этап 5 – обоснование конкретных структур выбранных корректирующих устройств.

Этап 6 – проведение расчета числовых значений для корректирующих устройств.

Этап 7 – исследование полученной САУ по критерию выполнения ранее представленной цели управления.

Этап 8 – выполнение многорежимного моделирования САУ в условиях, соответствующих наиболее характерным ситуациям реального функционирования объекта управления.

Этап 9 – формирование технического задания, предварительное эскизное и техническое проектирование и испытание соответственно макетов, экспериментальных и опытных образцов, запуск серийного производства.

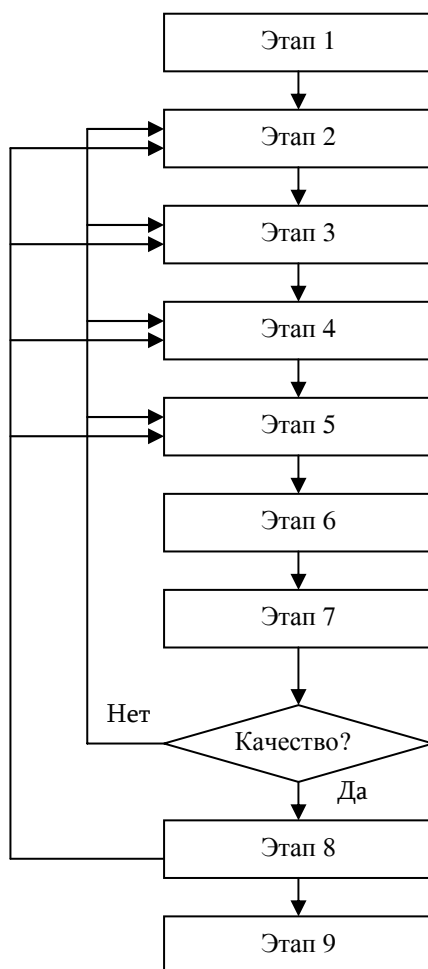


Рис. 2. Процесс создания САУ сложными объектами

На каждом из указанных этапов могут применяться различные модели. Речь здесь, по сути, идет о сопровождении изделия на всех этапах его жизненного цикла: от создания до утилизации. Структура, состав этих моделей и принципы их использования существенно различаются.

На начальных этапах 1–7 используются преимущественно упрощенные модели, что позволяет использовать хорошо известные и апробированные методики анализа и синтеза САУ ГТУ. Главная цель здесь – при известных допущениях за короткое время получить предварительное решение, которое можно использовать как базовое на последующих этапах. Это часто объясняют еще и тем, что проектирование является творческим процессом, т.е. итерационным и нелинейным, поэтому на первых стадиях опытные разработчики прибегают к максимальному упрощению сложных объектов [8]. Как, в свою очередь, отмечается в работе [9], такие упрощенные модели – это часто единственный путь для применения к сложным системам известных и апробированных методик синтеза. Ввиду этого в работе [10] выделяется два класса моделей: упрощенные (для первых этапов схемы на рис. 2) и так называемые поверочные (возможно, более полная модель для проверки ранее принятых решений). В работе [11] по этому же принципу строится иерархия моделей: первичные и вторичные. При этом создание упрощен-

ных моделей представляет собой научную проблему и является самостоятельной исследовательской задачей.

На этапе 8 используется многорежимное моделирование САУ с использованием наиболее полной модели объекта управления. При таком моделировании учитываются все основные нелинейности, должен быть отражен переменный состав структурных элементов и их параметров, возможные переключения в конфигурации также должны быть учтены. Этот этап непосредственно предшествует аппаратной реализации САУ. На этапе 9 проводятся испытания уже после аппаратной реализации. Здесь испытывается натурная САУ. К сожалению, часто бывает так, что испытать ее на всех характерных режимах затруднительно (например, если ГТУ используется для выработки электроэнергии и требуется учесть все многообразие режимов ЭС). И здесь на помощь приходит полунатурное моделирование, где натурная САУ испытывается совместно с моделью ЭЭС. Исходя из этого можно сделать вывод, что для этапов 8 и 9 общим является перечень испытаний и многорежимная модель, отражающая все разнообразие режимных ситуаций. В связи с этим одну и ту же модель ЭЭС целесообразно применять сначала для испытания алгоритмов САУ (этап 8), а затем для испытания натурных САУ (этап 9). Эти испытания возможно объединить в составе комплексного испытательного стенда для компьютерных и полунатурных испытаний САУ (рис. 3). При этом полунатурные и компьютерные испытания смогут взаимно друг друга дополнять, чем преодолевается «системный парадокс» при проектировании САУ [12].

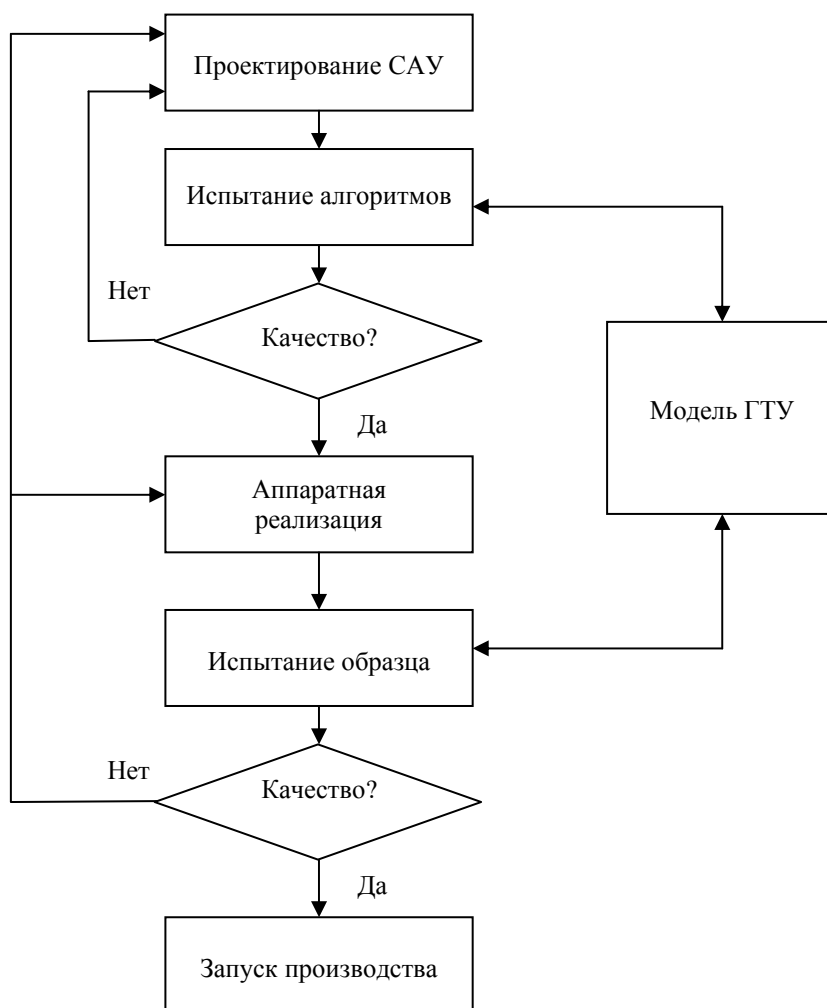


Рис. 3. Алгоритм испытательного стенда

Возможность применения такой общей для этапов 8 и 9 модели предоставляют одновременно безопасный, быстровыполнимый и низкочастотный инструмент анализа, а также эффективный инструмент компьютерной поддержки (computer-aided) разработки перспективных схем САУ [13].

Следует подчеркнуть, что развитие алгоритмов управления значительно усложнило процесс их проектирования, натурной и полунатурной доводки систем [14]. Отмечается существенная неполнота априорной информации, на базе которой проектируется система, а также значительная текущая неопределенность условий, в которых функционирует ГТУ, ГТЭС и система. Как результат – длительный и дорогостоящий цикл натурной доводки алгоритмов цифровых систем управления [14].

В работе [14] отмечается, что традиционные методы расчетных исследований и математического моделирования при проектировании САУ авиационных ГТУ, отражающие, как правило, некоторые идеализированные условия, зачастую приводят к большому числу ошибок системного характера. Эти ошибки нередко проявляются только на стадии натурных испытаний, и поэтому их устранение приводит к значительным материальным и временным затратам. Отсюда следует вывод о том, что необходимо применять как можно более полные модели на стадиях компьютерных и полунатурных испытаний. Применительно к САУ энергетических ГТУ это означает использование возможно более полной модели ЭЭС в качестве поверочной модели. Взаимодействие моделей ГТУ и ЭЭС с испытуемой САУ ГТУ показано на рис. 4.

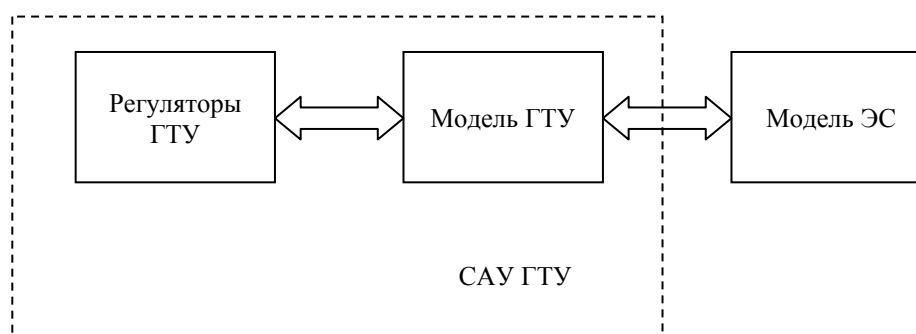


Рис. 4. Взаимодействие моделей при испытании САУ ГТУ

Модель ГТУ показана внутри САУ ГТУ, поскольку, по определению САУ, – это совокупность устройств управления и объекта управления. Кроме того, схема, показанная на рис. 4, дает возможность дополнительно ввести и испытать в САУ внешние сигналы со стороны модели ЭЭС.

### Принцип построения модели

Прежде всего отметим, что модель ЭЭС является моделью сложной структуры [15]. Моделью сложной структуры называют модель, состоящую из моделей структурных элементов и модели взаимодействия этих элементов между собой. В силу этого определения ЭЭС должна быть моделью сложной структуры.

Сначала рассмотрим модели структурных элементов. Такие модели целесообразно привести к общему, унифицированному виду для того, чтобы потом их можно было легко объединять в систему произвольной конфигурации. В такой единой унифицированной форме целесообразно записать модели всех элементов ЭЭС: упрощенные и более сложные. Главное, чтобы они обменивались с другими элементами ЭЭС посредством одних и тех же переменных (параметров режима).

В работе [11] предложено для указанной унификации представить систему уравнений структурного элемента ЭЭС относительно его внешних переменных (т.е. переменных, которые

ми он будет обмениваться с другими элементами) следующим векторно-матричным уравнением:

$$p\mathbf{I}_s = \pm\mathbf{A}\mathbf{U} - \mathbf{B}\mathbf{I} - \mathbf{H}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{I}$  – вектор токов структурного элемента;  $p\mathbf{I}_s$  – вектор производных внешних токов элемента (под внешними токами здесь имеются в виду токи, которыми этот элемент обменивается с другими элементами ЭЭС, например для синхронного электрогенератора внешние токи – это статорные токи, внутренние токи – роторные);  $\mathbf{U}$  – вектор внешних напряжений;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  – матрицы, размерность которых зависит от системы координат, в которых моделируется структурный элемент, а также от того, полные это уравнения или упрощенные (например, модель элемента может быть выполнена в трехфазных или двухфазных осях отсчета, неподвижных или вращающихся);  $\mathbf{H}$  – вектор, определяющий воздействие на элемент со стороны средств регулирования электрических параметров (для синхронного генератора это может быть воздействие со стороны автоматического регулятора возбуждения). Компоненты вектора  $\mathbf{H}$  для пассивных элементов электрической системы нулевые, для синхронных машин при отсутствии регулирования возбуждения – постоянные, при наличии – меняются на каждом шаге расчета.

При численном решении уравнений (2) получают приращения внешних токов на каждом шаге расчета. Именно посредством этих токов моделируемый элемент «ощущают» все остальные взаимодействующие с ним элементы ЭЭС. Напряжения  $\mathbf{U}$ , наряду с воздействиями со стороны средств управления  $\mathbf{H}$ , являются внешними воздействиями (возмущения) для уравнений (2). Исходя из этого статорные (внешние) токи являются реакцией элемента на текущее значение токов  $\mathbf{I}$  и внешних воздействий ( $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{H}$ ).

В форме (2) записываются математические модели всех структурных элементов ЭЭС: электрогенераторов, асинхронных двигателей, линий электропередачи, электрической статической нагрузки, трансформаторов, короткозамыкателей и т.д. Подробно механизм сведения математического описания каждого из этих структурных элементов к форме (2) представлен в монографии [16].

Затем строится модель взаимодействия элементов (т.е. моделей в форме (2)) между собой. В работе [11] обосновывается выбор в пользу метода узловых потенциалов для построения модели взаимодействия. Такая модель записывается в следующей унифицированной векторно-матричной форме [17]:

$$\mathbf{M}\mathbf{G}\mathbf{M}^T\mathbf{U}_y = -\mathbf{M}\mathbf{W} - \mathbf{M}\mathbf{I}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{G}$  – блочная матрица проводимостей ветвей (элементов), образующих систему;  $\mathbf{W}$  – вектор, полученный из правых частей уравнений элементов в форме (1);  $\mathbf{U}_y$  – вектор искомых узловых напряжений;  $\mathbf{I}$  – вектор токов ветвей.

Для строгого обоснования уравнения (3) и его распространения на случай произвольных конфигураций ЭЭС и произвольного количества структурных элементов, записанных в форме (2), в работе [11] было сформулировано и доказано соответствующее утверждение.

На основе матричных уравнений (2) и (3) построена модель ЭЭС, которая позволяет изменять конфигурацию и состав структурных элементов. Эта модель используется для испытаний САУ, компьютерных и полунатурных, в соответствии со схемами на рис. 2 и 3.

### Компьютерная реализация модели

На основе представленного математического описания реализован целый ряд программных комплексов (ПК) с целью автоматизации испытаний САУ ГТУ для электроэнергетики. Рассмотрим один из них. Этот ПК создан по заданию АО «ОДК-Авиадвигатель» (Пермь) и используется при проведении испытаний алгоритмов САУ ГТУ на этапах проектирования, т.е. при научно-исследовательских, сравнительных и контрольных испытаниях. Принятые ре-



шения затем проверяются на полунатурных стендах, финальные испытания происходят в режиме испытаний газотурбинной электростанции на специализированных стендах предприятия [18].

Рассмотрим ПК (Программный комплекс «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети» / Петроченков А.Б., Кавалеров Б.В., Шигапов А.А., Один К.А., Полулях А.И., Ситников А.С., Лисовин И.Г., Ширинкина Е.Н. «КМЭС» / Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611839 РФ. – 28.02.2011.). Функциональная структура ПК «КМЭС» для автоматизированных испытаний алгоритмов САУ ГТУ представлена на рис. 5.



Рис. 5. Функциональная структура ПК «КМЭС»

Интерфейс программы для функциональной структуры на рис. 5 содержит средства для генерации и управления диалоговым режимом. Интерфейс программы обладает характеристиками, позволяющими управлять разнообразными стилями ведения диалога, изменять стиль диалога по выбору пользователя, предоставлять данные в различных формах и видах, обеспечивать гибкую поддержку пользователя.

Блок управления экспериментом содержит процедуры и функции для управления вычислительным экспериментом в диалоговом режиме.

Интерфейс ПК показан на рис. 6. В ПК входят разнообразные модели ГТУ (разной степени детализации), модели регуляторов САУ ГТУ, модели элементов ЭЭС. ПК позволяет проводить моделирование различных режимных ситуаций в ЭЭС, которые было бы затруднительно исследовать в реальных условиях, и проверять, как ведет себя при этом проектируемая САУ ГТУ. Среди них, например, можно выделить следующие важные характерные для газотурбинных электростанций малой и средней мощности режимные ситуации:

1. Разнообразные короткие замыкания (однофазные, двухфазные и др.), перегрузка в распределительной или питающей сети и их устранение, отключение электрической линии с последующим успешным или неуспешным автоматическим повторным включением.

2. Пуск соизмеримого по мощности асинхронного двигателя или группы мощных асинхронных двигателей.

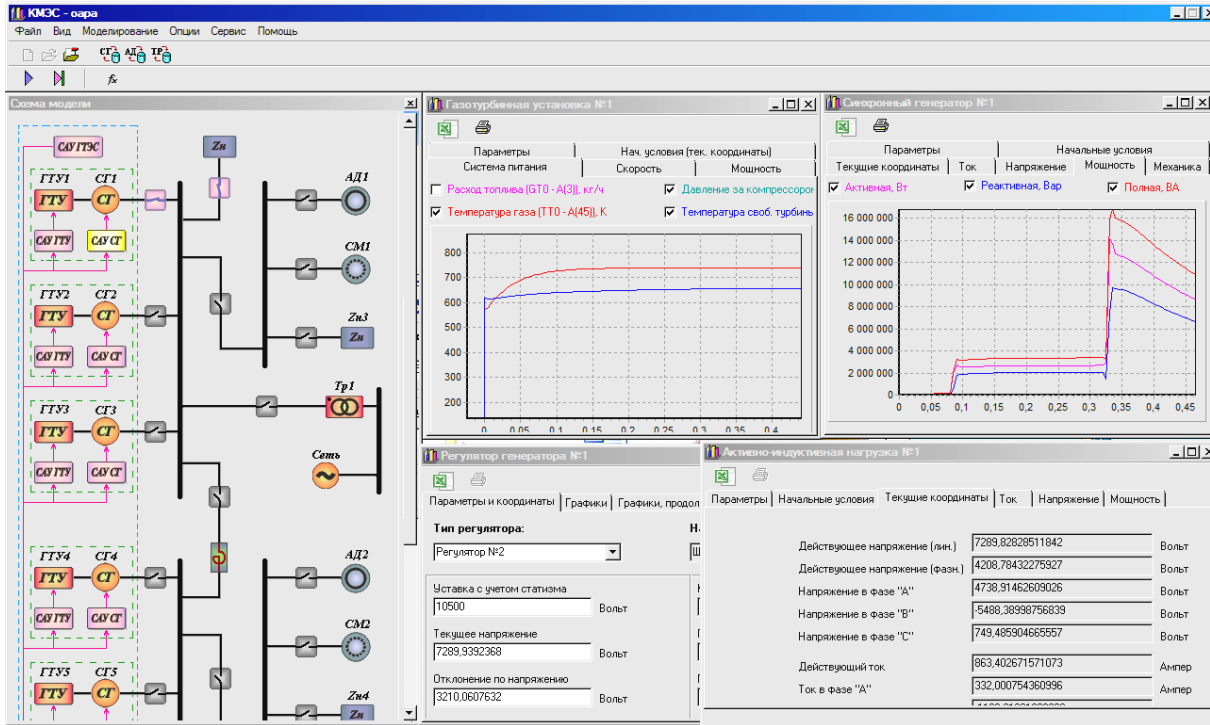


Рис. 6. Интерфейс ПК «КМЭС»

3. Отключение или подключение одного или нескольких электрогенераторов в многоагрегатных газотурбинных электростанциях.
4. Переход с автономного режима работы газотурбинной электростанции на параллельный режим работы, переход на работу параллельно мощной сети.
5. Изменения механической нагрузки электродвигателей, приводящие к существенным изменениям нагрузки на электрогенераторы.
6. Изменения в структуре комплексной нелинейной нагрузки при значительных изменениях электрической мощности.
7. Влияние толчкообразных изменений нагрузки, различных графиков изменения нагрузки.
8. Разнообразные возмущения в системе два электрогенератора–нагрузка.
9. Разнообразные возмущения в системе несколько электрогенераторов–нагрузка.
10. Взаимовлияние САУ ГТУ и САУ электрогенераторами при существенных изменениях электропотребления.
11. Влияние слабых связей и разнообразных изменений в конфигурации ЭЭС при значительных изменениях передаваемой электрической мощности.
12. Потеря синхронизма и ресинхронизация.

### Заключение

Модельно-ориентированный подход при проектировании САУ ГТУ обеспечивает автоматизацию процесса испытаний при проведении научно-исследовательских, сравнительных и контрольных испытаний. Поскольку конвертированные ГТУ работают в новых условиях, а именно в условиях электрической системы, испытывать такие САУ ГТУ целесообразно в условиях, максимально приближенных к условиям характерных режимных ситуаций ЭС. Такую возможность дает математическое моделирование. В результате использования разработанной математической модели ЭС эффект достигается по двум основным показателям. Во-первых, существенно сокращается время испытаний, ведь известно, что испытания – очень затратный процесс. Во-вторых, улучшается качество регулирования САУ ГТУ, так как уже на этапах про-

ектирования при испытаниях учитывается все многообразие возможных режимных ситуаций ЭС. Качество переходных процессов улучшается прежде всего по частоте вращения свободной (независимой силовой) турбины. Исследования показали, что время проведения испытаний сокращается, по крайней мере, в 2 раза, качество регулирования по частоте вращения свободной турбины улучшается в среднем на 15–20 %. Ввиду этого включение математической модели ЭС в процесс испытаний САУ ГТУ начиная с самых ранних стадий следует признать актуальным направлением для внедрения в производство ГТУ и проведения перспективных научных исследований.

#### Библиографический список

1. АО «ОДК-Пермские моторы»: сайт. – URL: [http://www.pmz.ru/products/gtu\\_energy/gtu\\_2\\_5p/](http://www.pmz.ru/products/gtu_energy/gtu_2_5p/) (дата обращения: 15.04.2019).
2. Верлань А.Ф., Галкин В.В. Имитация динамики энергетических объектов в системах испытания программных средств управления. – Киев: Наукова думка, 1991. – 181 с.
3. Агдамов Р.И., Берхеев М.М., Заляев И.А. Автоматизированные испытания в авиастроении. – М.: Машиностроение, 1989. – 232 с.
4. Гласс Р. Руководство по надежному программированию. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 256 с.
5. Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.
6. Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е., Суханов А.В. Обмен данными между SCADA-системой и системой имитационного моделирования авиационных двигателей в процессе испытаний // Молодой ученый. – 2011. – Т. 1, № 8. – С. 50–53.
7. Шмидт И.А. Автоматизация испытаний САУ ГТД на основе цифровых быстро решаемых моделей: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 1991. – 103 с.
8. Методы классической и современной теории автоматического управления: учеб.: в 5 т. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
9. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
10. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488 с.
11. Кавалеров Б.В. Методологические и теоретические основы автоматизации испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с учетом динамики электроэнергетической системы: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2012. – 409 с.
12. Деменков Н.П. Программные средства оптимизации настройки систем управления: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 244 с.
13. Fusco G. A simulation tool for voltage control studies in power systems // *Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems*. – 2008. – Vol. 14, no. 2. – P. 127–145.
14. Кухарчук В.Г. Современные принципы построения комплексных систем управления авиационных газотурбинных двигателей / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1995. – 164 с.
15. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 440 с.
16. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем: монография / В.М. Винокур, Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков, М.Л. Сапунков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2010. – 299 с.
17. Кавалеров Б.В. Математическое моделирование в задачах автоматизации испытаний систем управления энергетических газотурбинных установок // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2011. – № 34(1). – С. 74–83.
18. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин [и др.]. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 5. – 190 с.

#### References

1. JSC «UEC-Perm Engines» URL: [http://www.pmz.ru/products/gtu\\_energy/gtu\\_2\\_5p/](http://www.pmz.ru/products/gtu_energy/gtu_2_5p/) (accessed 15 March 2019).

2. Verlan A.V., Galkin V.V. Imitatsiia dinamiki energeticheskikh obektov v sistemakh ispytaniia programnykh sredstv upravleniia [Imitation of the dynamics of energy objects in the test systems of software management tools]. Kiev, Naukova dumka, 1991, 181 p.
3. Agdamov R.I., Berkheev M.M., Zaliaev I.A. Avtomatizirovannye ispytaniia v aviastroenii [Automated tests in aircraft industry]. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 232 p.
4. Glass R. Rukovodstvo po nadezhnomu programmirovaniiu [Software reliability guidebook]. Moscow, *Finansy i statistika*, 1982, 256 p.
5. Akhmedzianov A.M., Dubravskii N.G., Tunakov A.P. Diagnostika sostoiianiia VRD po termogazodinamicheskim parametram. [Diagnostics of the state of air-jet engine on thermogasdynamical parameters]. Moscow, Mashinostroenie, 1983, 206.
6. Akhmedzianov D.A., Kishalov A.E., Sukhanov A.V. Obmen dannymi mezhdu SCADA-sistemoi i sistemoi imitatsionnogo modelirovaniia aviatsionnykh dvigatelei v protsesse ispytaniia [Data exchange between the SCADA system and the aircraft engine simulation system during the testing process]. *Molodoy uchenyy*, 2011, no. 8, vol.1, pp. 50-53.
7. Shmidt I.A. Avtomatizatsiia ispytaniia SAU GTD na osnove tsifrovyykh bystro reshaemykh modelei [Test automation system for automatic control of gas turbine engines based on digital rapidly solvable models]. Ph. D. thesis. Ufa, 1991, 103 p.
8. K.A. Pupkova N.D. Egupova. Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia: Sintez regulatorov sistem avtomaticheskogo upravleniia [Methods of classical and modern theory of automatic control: Synthesis of regulators of automatic control systems]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2004, vol. 3, 616 p.
9. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami [Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems]. St. Petersburg: Nauka, 2000, 549 p.
10. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka, 1981, 488 p.
11. Kavalеров B.V. Metodologicheskie i teoreticheskie osnovy avtomatizatsii ispytaniia sistem upravleniia elektroenergeticheskimi gazoturbinnymi ustanovkami s uchetom dinamiki elektroenergeticheskoi sistemy [Methodological and theoretical foundations of the automation of testing of control systems for electric power gas turbine installations taking into account the dynamics of the electric power system]. Abstract of PhD dissertation. Perm, 2012, 409 p.
12. Demenkov N.P. Programmnye sredstva optimizatsii nastroiiki sistem upravleniia [Software to optimize control systems]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2006, 244 p.
13. G. Fusco. A simulation tool for voltage control studies in power systems. *Mathematical and computer modelling of dynamical systems*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 127-145.
14. Kukharchuk V.G. Sovremennye printsipy postroeniia kompleksnykh sistem upravleniia aviatsionnykh gazoturbinnyykh dvigatelei [Modern principles of building integrated control systems for aircraft gas turbine engines]. Perm: Perm State Technical University, 1995, 164 p.
15. Buslenko N.P. Modelirovanie slozhnykh system [Modeling complex systems]. Moscow: Nauka, 1978, 440 p.
16. V.M. Vinokur, B.V. Kavalеров, A.B. Petrochenkov, M.L. Sapunkov. Matematicheskoe modelirovanie gazoturbinnyykh mini-elektrostantsii i mini-energosisistem [Mathematical modeling of gas turbine mini-power plants and mini-power systems]. Perm: Perm State Technical University, 2010, 299 p.
17. Kavalеров B.V. Matematicheskoe modelirovanie v zadachakh avtomatizatsii ispytaniia sistem upravleniia energeticheskikh gazoturbinnyykh ustanovok [Mathematical modeling in problems of automation of testing control systems of power gas turbine plants]. *Proceedings of Southwest State University*, 2011, iss. 34, no. 1, pp. 74-83.
18. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A. et al. Avtomatika i regulirovanie aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok [Automation and regulation of aircraft engines and power plants]. Moscow, Mashinostroenie, 2008, Vol. 5, 190 p.

### Об авторах

**Кавалеров Борис Владимирович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

**Суслов Артем Игоревич** (Пермь, Россия) – студент ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: 1\_suslov@mail.ru).

### About the authors

**Boris V. Kavalero**v (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Electrical Engineering and Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: kbv@pstu.ru).

**Artem I. Suslov** (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: 1\_suslov@mail.ru).

Получено 10.05.2019