

УДК 621.311.001.57:681.51

## КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ПОЛУНАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

**Б. В. Кавалеров,**

канд. техн. наук, доцент

**В. П. Казанцев,**

доктор техн. наук, профессор

**И. А. Шмидт,**

канд. техн. наук, доцент

Пермский государственный технический университет

Описывается методика компьютерных и полунатурных испытаний на основе моделирования электроэнергетической системы. Перечислены и кратко описаны основные алгоритмические модули, обеспечивающие комплексные испытания и настройку средств управления газотурбинных агрегатов электростанций малой мощности.

**Ключевые слова** — моделирование, испытания, электроэнергетическая система, газотурбинная установка.

### Введение

В настоящее время значительную долю в продукции отечественных предприятий авиационного двигателестроения составляют конвертированные авиационные газотурбинные установки (ГТУ), предназначенные для привода электрогенераторов. Основной мощностной ряд таких ГТУ составляет от 2 до 25 МВт. При этом существенно, что примерно 70–75 % узлов и деталей базового двигателя удается сохранить [1]. Электростанции, формируемые на основе таких силовых модулей, могут содержать до шести и даже больше энергоблоков, работающих в параллель. Преимущества таких газотурбинных электростанций (ГТЭС) хорошо известны: это экономичность, низкая стоимость, быстрые сроки окупаемости, малая удельная масса и габариты, высокие мобильность и приемистость, короткие сроки строительства, детально отработанная технология производства, широкий диапазон климатических условий эксплуатации, практически полная автоматизация управления работой двигателя, высокий КПД использования топлива, особенно при когенерации (одновременном производстве электроэнергии и тепла), возможность работы на разнообразном топливе (керосине, дизельном топливе, природном и попутном газе), малые объемы вредных выбросов в окружающую среду.

Естественно, что новые условия работы ГТУ вызвали необходимость конвертировать и их средства управления — электронные регуляторы. Первые регуляторы энергетических ГТУ в 90-е гг. XX в. строились на базе авиационных электронных регуляторов двигателя (РЭД), позднее появились специализированные блоки управления двигателем (БУД), сегодня — это более сложные многоканальные системы контроля и управления. Для новых условий эксплуатации потребовалось разработать новые алгоритмы управления, обеспечивающие высокую надежность работы мини-электростанций и требуемые показатели качества вырабатываемой электроэнергии. Несмотря на очевидные успехи к настоящему времени резерв совершенствования систем автоматического управления (САУ) еще не исчерпан. Более того, по-прежнему сохраняются определенные проблемы с качеством вырабатываемой электроэнергии, связанные с поддержанием частоты и напряжения при резких колебаниях нагрузки, при взаимодействии САУ ГТУ и САУ синхронного генератора, при обеспечении различных режимов параллельной и автономной работы. Для решения этих проблем необходимо совершенствовать средства управления. Статья рассматривает один из подходов на пути к этой цели. В основе статьи — опыт сотрудничества ПГТУ с предприятиями аэрокосмической отрасли.

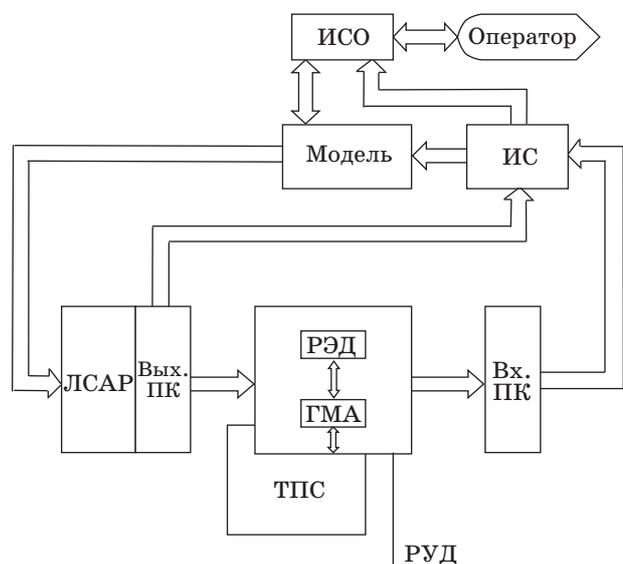
### Компьютерные и полунатурные испытания

В наш век всеобщей компьютеризации имеются хорошие возможности использовать математические методы, позволяющие корректно решать самые сложные задачи управления, получать оптимальные решения. Известно, что переход от допустимого к оптимальному может привести к существенному снижению затрат, и это важно для завоевания конкурентных преимуществ.

До начала 90-х гг. нашими учеными и инженерами проводилась большая работа по математическому моделированию и алгоритмизации задач управления режимами. Были составлены и внедрены компьютерные программы, накоплен опыт их использования в области управления и ГТУ, и режимами электроэнергетических систем [2–4]. Сейчас многие разработки не востребованы. За истекшее время изменились условия, изменилась вычислительная техника, снизился общий интерес к научно-исследовательским проблемам. Но сегодня ситуация пусть медленно, но меняется, и в связи с этим становится актуальной задача модернизации старых компьютерных программ, а также разработки новых программ на современной инструментальной базе.

В авиационной отрасли известны и применяются так называемые полунатурные испытания средств управления, при этом выполняется сопряжение модели ГТУ с натурной аппаратурой регулирования [3]. Экономичность этого способа очевидна — не нужно жечь керосин, а возможности автоматизации и уровень функциональности испытаний существенно возрастают.

Рассмотрим такой полунатурный стенд (рис. 1) [4].



■ Рис. 1. Структура полунатурного стенда

На рисунке обозначено: РЭД — регулятор электронного двигателя, ГМА — гидромеханическая аппаратура, ИС — измерительная система, ТПС — технологические подсистемы стенда, Вых. ПК и Вх. ПК — выходные и входные преобразователи координат, РУД — рукоятка управления двигателем, ЛСАР — локальные системы автоматического регулирования (преобразователями), ИСО — интерфейс стендового оператора. Здесь мы не будем рассматривать особенности всех перечисленных компонентов стенда, они достаточно подробно освещены в специальной литературе. Остановимся на компьютерной модели ГТУ, включенной в контур испытаний агрегата управления.

Поскольку САУ ГТУ является сложным многосвязным объектом, полноценное ее исследование возможно только при связанном воспроизведении всех выходных координат модели ГТУ, используемых в контурах регулирования. Такая модель, построенная путем объединения моделей отдельных узлов, называется агрегированной. Для испытания САУ в работе [4] была построена быстрорешаемая компьютерная модель на основе упрощенной идентификационной нелинейной модели ГТУ. Для сокращения времени счета использовался метод Эйлера с контролем допустимой погрешности на каждом шаге расчета. Идея быстрорешаемой модели состоит в объединении линейной динамической модели и нелинейных статических характеристик ГТУ. Данный класс моделей позволяет обеспечить точность в границах 2–5 % [4]. Модель учитывает аккумуляцию энергии во вращающихся массах роторов двухвальной ГТУ, динамика которых описывается двумя уравнениями:

— уравнением ротора турбокомпрессора

$$dn_{\text{тк}} / dt = (n_{\text{с.тк}} - n_{\text{тк}}) / T_{\text{тк}}; \quad (1)$$

— уравнением ротора свободной турбины

$$dn_{\text{с.т}} / dt = (N_{\text{с.т}} - N_{\text{н}}) / (3,14/30)^2 J_{\Sigma} n_{\text{с.т}}, \quad (2)$$

где  $n_{\text{тк}}$  — частота вращения ротора турбокомпрессора, об/мин;  $n_{\text{с.тк}}$  — частота вращения ротора турбокомпрессора, взятая по нелинейной статической характеристике, об/мин;  $T_{\text{тк}}$  — постоянная времени ротора турбокомпрессора, с;  $n_{\text{с.т}}$  — частота вращения ротора свободной турбины, об/мин;  $N_{\text{с.т}}$  — располагаемая мощность свободной турбины, Вт;  $N_{\text{н}}$  — потребляемая мощность нагрузки, Вт;  $J_{\Sigma}$  — суммарный приведенный к валу момент инерции свободной турбины, кг · м<sup>2</sup>. Уравнения динамики роторов (1) и (2) дополняются уравнением дозатора топлива и, как правило, уравнениями для расчета температур и давлений в характерных сечениях ГТУ. Семейство статических ха-

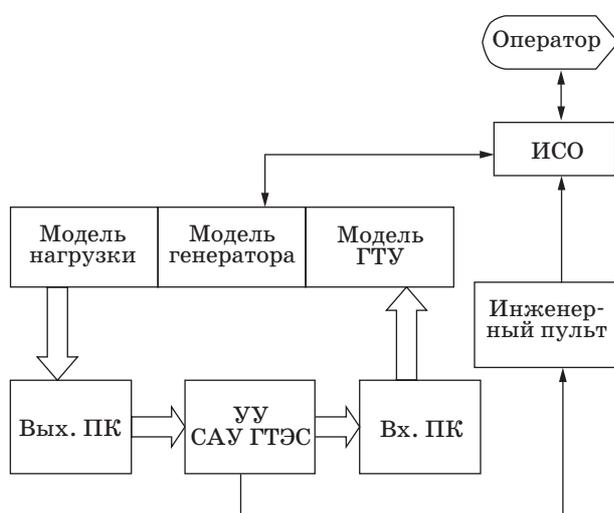
рактических используется для расчета нелинейных зависимостей между  $n_{TK}$ ,  $N_{с.т}$ ,  $G_T$  (расходом топлива), температурами и давлениями, а также для вычисления параметра  $T_{TK}$  как функции  $n_{TK}$ .

При испытаниях САУ наземных ГТЭС преимущества полунатурной схемы еще более очевидны. Объект управления, включающий помимо ГТУ также синхронные генераторы и другие взаимодействующие элементы электроэнергетической системы, становится значительно сложнее. Кроме того, хорошо известно, что в электроэнергетике невозможно воспроизвести в натуральных условиях всю совокупность подкритических режимов, наиболее интересных для испытания САУ. Моделирование является основным способом исследования таких режимов.

В связи с этим для совершенствования САУ наземных ГТУ предлагается дополнить компьютерную модель ГТУ компьютерной моделью электроэнергетической системы (ЭЭС), учитывающей все разнообразие основных режимов работы ГТЭС: автономно, на мощную сеть, параллельно, при различном сочетании электрических нагрузок.

Таким образом, структура стенда, изображенная на рис. 1, приобретает вид, показанный на рис. 2. В новой структуре отсутствует ГМА, место РЭД занимает устройство управления УУ САУ ГТЭС, задание режима производится не РУД, а при помощи инженерного пульта. Оператор дает задание на УУ САУ ГТЭС и задает моделируемый режим нагрузки генератора.

Показанные на рисунке математическая модель генератора и математическая модель электрической нагрузки в совокупности составляют модель ЭЭС. Разработанная математическая модель ЭЭС представляет собой автономный мо-



■ Рис. 2. Структура полунатурного стенда для испытания и настройки САУ ГТЭС

дель, который может использоваться не только в составе полунатурного стенда (см. рис. 2), но и отдельно как чисто компьютерная система испытания алгоритмов управления САУ для задач, решаемых в классе НИОКР. Такие испытания в отличие от полунатурных являются компьютерными испытаниями средств управления.

Для организации компьютерных и полунатурных испытаний на математической модели ЭЭС требуется строгое согласование этапов подготовки и выполнения испытаний, включающих этапы моделирования, идентификации, настройки, оптимизации и др. В связи с этим целесообразно рассмотреть общую методику подготовки испытаний и настройки САУ энергетических наземных ГТУ на основе компьютерных и полунатурных испытаний с использованием компьютерной модели ЭЭС. При этом основное внимание сосредоточим на модели собственно ЭЭС, учитывая, что модель ГТУ разработана и верифицирована ранее, а проблемы их взаимного сопряжения успешно решены [5].

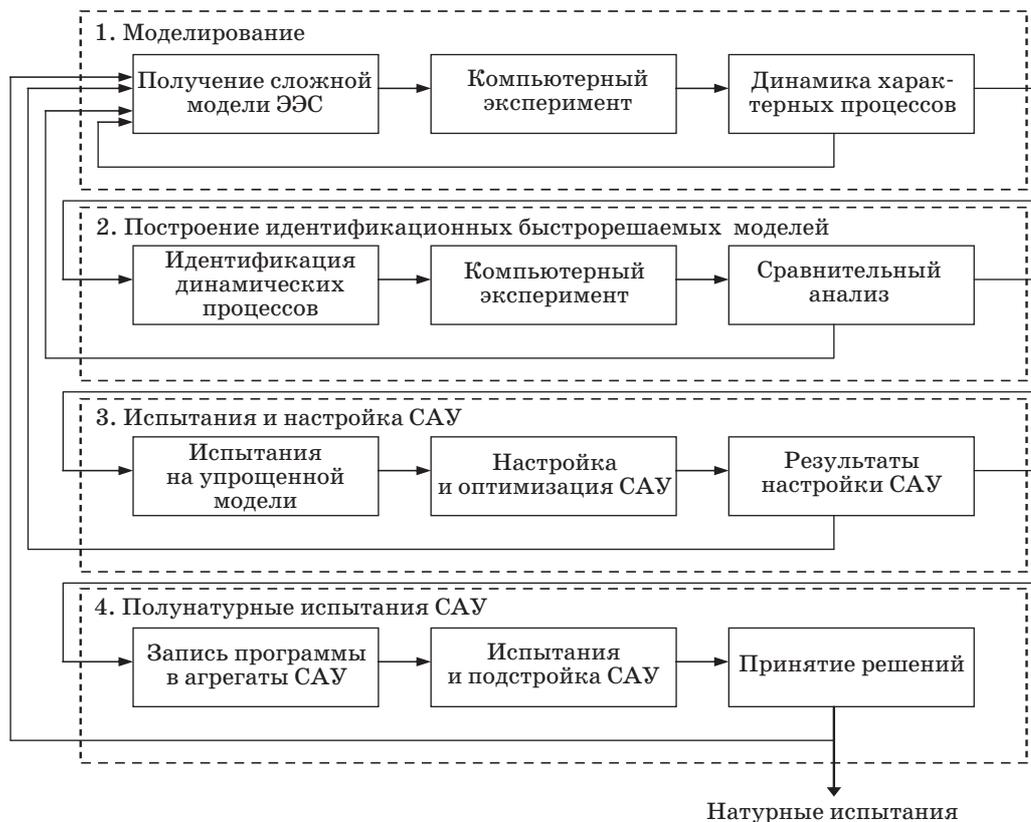
## Методика испытаний и настройки САУ ГТУ

Общая схема задачи испытаний САУ ГТЭС в соответствии с разработанной методикой представлена на рис. 3. Кратко рассмотрим особенности основных методических модулей.

Разработанная методика включает 4 основных этапа.

### 1. Моделирование.

Необходимость моделировать ЭЭС сложной структуры возникает в связи с тем, что воспроизвести всю гамму характерных и критических режимов ЭЭС в реальных натуральных условиях крайне затруднительно, а по существу и невозможно. Тем не менее, аппаратура управления САУ и ее алгоритмы должны пройти проверку в наиболее характерных, а также в наиболее опасных режимах работы. При этом следует использовать физические принципы построения модели, т. е. строить модель, основываясь на физике рассматриваемых процессов; формальные принципы, основанные на обработке экспериментальных данных, здесь не годятся по причине все той же сложности получения экспериментальных данных. Методика построения сложной модели — далеко не тривиальная задача, она подробно рассмотрена нами в работе [5]. Здесь лишь отметим, что из двух наиболее распространенных на практике способов моделирования взаимодействия элементов для динамических режимов сложных ЭЭС [6] выбран способ с явным интегрированием дифференциальных уравнений структурных элементов, как обеспечивающий необходимую гибкость и удобство настраиваемости. Модель содер-



■ Рис. 3. Схема компьютерных и полунатурных испытаний и настройки САУ

жит десять основных типов структурных элементов (синхронные генераторы, асинхронные двигатели, статические нагрузки и т. п.), каждый из которых представлен системой дифференциальных уравнений до восьмого порядка включительно. Как состав элементов, так и сложность моделей элементов может свободно варьироваться.

Модели всех структурных элементов ЭЭС записываются в единой обобщенной векторно-матричной форме

$$pI = \pm AU - VI - H, \quad (3)$$

где  $p$  — символ дифференцирования;  $I$  и  $U$  — соответственно векторы токов и напряжений;  $A$  и  $B$  — векторы параметров;  $H$  — вектор внешних воздействий на элемент со стороны, например, средств регулирования. Размерность матриц определяется порядком соответствующих дифференциальных уравнений. Знак « $\pm$ » соответствует случаю, когда элемент является источником тока, а знак « $+$ » — приемником. В общем случае исходные уравнения элемента нелинейные, при этом представление (1) есть линеаризованное уравнение для малого промежутка времени, соответствующего шагу интегрирования системы дифференциальных уравнений. Тогда урав-

нение взаимодействия элементов рассчитывается по методу узловых потенциалов по векторно-матричному уравнению

$$MGM^T U = -MW - pMI, \quad (4)$$

где  $M$  — матрица инцидентности;  $G$  — матрица проводимостей элементов;  $W$  — матрица, составленная из правых частей уравнений (3) и содержащая эквивалентные источники ЭДС и источники тока, действующие на  $i$ -м шаге расчета динамики;  $pM$  — матрица, полученная дифференцированием матрицы  $M$ . Ее необходимость обусловлена тем, что все элементы моделируются во вращающейся системе координат, связанной с роторами синхронных генераторов.

Представленная сложная нелинейная модель ЭЭС разработана с использованием общепринятых систем уравнений, полученных на основании известных балансовых соотношений, обусловленных физическими законами. Ее адекватность подтверждена воспроизводимостью результатов для характерных режимов, которые у разных моделей отличаются только за счет различной погрешности расчетов. Прогностическая адекватность модели также подтверждена по результатам серии экспериментов на реальных ГТЭС.

На основании уравнений (3) и (4) может быть произведен компьютерный эксперимент для получения динамических характеристик произвольного режима работы ЭЭС. Для увеличения устойчивости алгоритма использованы специально разработанные методы. Рассмотренный алгоритм моделирования позволяет учесть все основные особенности динамики сложной нелинейной ЭЭС, поскольку допускает использовать математические модели элементов 1-го класса точности [7] и при необходимости усложнять эти модели, не изменяя структуру уравнений (3) и (4). Но, к сожалению, такие расчеты требуют больших затрат машинного времени даже для современной компьютерной техники. Из-за воспроизведения сверхпереходных составляющих статорных токов шаг численного интегрирования выбирается, как правило, не более 10 мкс. В результате, например, характерный переходный процесс реальной продолжительностью 1 с для системы из 6 параллельных энергоагрегатов и распределенной комплексной электрической нагрузки рассчитывается с помощью одноточечного метода Рунге — Кутты четвертого порядка за время 14,6 мин на базе Pentium IV, 3 GHz персонального компьютера [5]. По этой причине рассмотренную математическую модель в отдельных случаях затруднительно использовать для испытания алгоритмов и, тем более, для параметрической настройки регуляторов в ходе компьютерных и полунатурных испытаний. Настройка, в том числе автоматическая, требует многократного воспроизведения переходного процесса. Для поиска коэффициентов регуляторов могут применяться различные численные поисковые методы (симплекс-метод, покоординатный спуск, случайный поиск и др.), каждый из них требует затрат времени на эксперименты, а также последующую оценку их результатов на соответствие критериям качества. Разработанная методология позволяет решить данную проблему методами идентификации динамических систем с тем, чтобы получить быстрорешаемые модели объектов с нормированной погрешностью. Такие модели проще всего получить за счет идентификации по результатам моделирования на сложной модели ЭЭС, последняя при этом используется как поверочная модель для итоговой проверки алгоритмов перед натурными испытаниями.

## 2. Построение быстрорешаемых идентификационных моделей.

Разработанная методика включает три основных этапа построения быстрорешаемых идентификационных моделей:

— выбор характерных переходных процессов (динамических характеристик) на основе сложной модели ЭЭС для заданного узла комплексной нагрузки;

— идентификацию матрицы коэффициентов быстрорешаемой модели по результатам полученной динамической характеристики;

— воспроизведение на быстрорешаемой модели заданных динамических характеристик.

Для получения матрицы параметров идентификационной модели используется метод наименьших квадратов:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^T (\mathbf{X}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^T)^{-1}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{Y}_{\Sigma}$  — вектор выходных переменных;  $\mathbf{X}_{\Sigma}$  — вектор входных переменных;  $\mathbf{A}$  — матрица коэффициентов размерностью  $n \times n$ , которую следует идентифицировать. Символ  $\Sigma$  означает, что в общем случае число измерений векторов входа и выхода может быть больше  $n$ . Уравнение (5) можно переписать в виде

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^+, \quad (6)$$

где  $\mathbf{X}_{\Sigma}^+$  — псевдообратная матрица такая, что  $\mathbf{X}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^+ \mathbf{X}_{\Sigma} = \mathbf{X}_{\Sigma}$ . Известно, что она является наилучшей аппроксимацией (по методу наименьших квадратов) соответствующей системы линейных уравнений [8].

Матрица  $\mathbf{A}$  может быть реализована в двух основных вариантах. В первом случае она связывает мгновенные значения входных и выходных сигналов и, следовательно, отображает квазистатический режим:

$$\mathbf{I}(k) = \mathbf{A}(k) \mathbf{U}(k). \quad (7)$$

Во втором случае эта матрица является матрицей перехода системы в терминологии метода пространства состояний в границах линеаризованной области:

$$\mathbf{V}(k+1) = \mathbf{A}^*(k) \mathbf{V}(k), \quad (8)$$

где  $\mathbf{V} = (\mathbf{U}, \mathbf{I})$  — расширенный вектор состояния;  $\mathbf{U}, \mathbf{I}$  — векторы напряжений и токов;  $\mathbf{A}^*$  — матрица перехода.

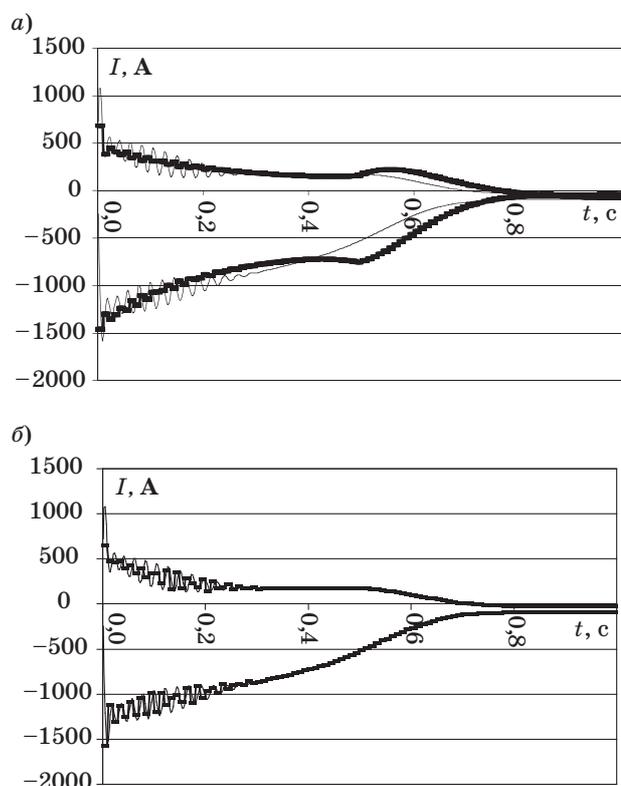
В общем случае полученные идентификационные модели не представимы в виде какой-либо электрической цепи, поскольку идентификация выполняется по внешней динамической характеристике. Поэтому разработаны алгоритмы получения матрицы  $\mathbf{A}$  в форме реальных параметров активно-индуктивной цепи на основе метода наименьших квадратов с ограничениями, что в перспективе открывает возможность воспроизводить режимы на натуральных стендах.

При существенной нелинейности или нестационарности матрицы  $\mathbf{A}$  необходимо учитывать эти нелинейность и нестационарность при прове-

дении идентификации. Для этого следует использовать априорную информацию о природе нелинейности и нестационарности, которую, в свою очередь, можно получить по сложной нелинейной модели ЭЭС.

В качестве примера на рис. 4, а, б показан расчет переходного процесса для упрощенной ЭЭС, включающей синхронный генератор ТК-4-2 мощностью 4 МВт, статическую нагрузку и соизмеримый по мощности асинхронный двигатель (АД). Моделируется процесс пуска мощного АД с малым моментом инерции. Поскольку на параметры  $\mathbf{A}$  влияет скольжение, которое в процессе пуска АД меняется от 1 до 0, при использовании модели (8) требуется не менее двух матриц  $\mathbf{A}^*$ . Тонкими линиями показаны активная и реактивная компоненты пусковых токов исходной сложной модели, жирными линиями — те же токи для идентификационной модели; вверх — составляющая тока  $I_q$ , вниз —  $I_d$ .

Все быстро решаемые модели строятся с учетом мер адекватности, в качестве которых обычно выступают средняя квадратичная ошибка или коэффициент несовпадения Тейла. В задачах анализа электрических процессов допустимая погрешность модели определяется погрешностью измерительных приборов, при этом модель, как



■ Рис. 4. Результаты моделирования в соответствии с (8) при использовании двух (а) и десяти (б) матриц  $\mathbf{A}^*$

правило, должна иметь погрешность не более 2 %. Максимально допустимое значение критерия Тейла, исходя из поставленной задачи, должно быть не более 0,1. Для контроля адекватности вводится система ограничений на точность быстро решаемой модели

$$\varepsilon_i \leq \varepsilon_i^*, i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_i$  —  $i$ -я мера адекватности;  $\varepsilon_i^*$  — контрольный показатель по  $i$ -й мере адекватности;  $n$  — число мер адекватности. Но ограничений (9) недостаточно при переходе от первичной сложной нелинейной модели вида

$$dx / dt = f(t, x, u) \quad (10)$$

к упрощенной быстро решаемой линейной стационарной модели

$$dx / dt = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t), \quad (11)$$

где  $\mathbf{x} \in \{X\}$ ;  $\mathbf{u} \in \{U\}$ ;  $X, t \in \{T\}$ ,  $\{X\}$ ,  $\{U\}$  — соответственно множество состояний и множество управлений,  $\{T\}$  — множество упорядоченных моментов времени. Поскольку модель (11) сохраняет адекватность (из условия допустимого  $\varepsilon$ ) в ограниченной области отклонений переменных, система ограничений (9) дополняется системой ограничений на область допустимых по условиям адекватности отклонений переменных модели при испытании и настройке средств управления. В случае если для выбранной модели заданные ограничения не выполняются, следует выбрать более сложную идентификационную модель.

Проиллюстрируем использование мер адекватности для рассмотренного примера (см. рис. 4). Для быстро решаемой модели с двумя матрицами  $\mathbf{A}^*$  (см. рис. 4, а) при шаге наблюдения 0,01 с одна из мер адекватности (средняя квадратичная ошибка по току)  $\varepsilon_I \approx 2,556$  %, что превышает допустимое ограничение на точность модели в 2 %, поэтому такую модель следует отвергнуть. При использовании в модели пяти матриц  $\mathbf{A}^*$  получаем  $\varepsilon_I \approx 1,203$  %, в этом случае пределы управляющего воздействия (изменения напряжения возбуждения) составляют +39 и -79 %. При использовании в модели 10 матриц  $\mathbf{A}^*$  (см. рис. 4, б)  $\varepsilon_I \approx 0,382$  %, допустимые пределы управляющего воздействия увеличиваются и составляют +61 и -119 %. Для того чтобы увеличить диапазон адекватности, следует использовать более сложную идентификационную модель. Например, если в вектор состояния модели (8) дополнительно включить скольжение асинхронного двигателя  $\mathbf{V} = (U, I, S)$ , где  $S$  — скольжение двигателя ( $S = (\omega - \omega_{AD})/\omega$ ,  $\omega$  — угловая скорость магнитно-

го поля,  $\omega_{\text{АД}}$  — угловая скорость асинхронного двигателя), становится возможным получить адекватную быстро решаемую модель только с одной матрицей  $\mathbf{A}^*$  (тогда размерность матрицы  $\mathbf{A}^*$  увеличивается на единицу). В этом случае погрешность достаточно велика:  $\varepsilon_I \approx 1,290 \%$ , но допустимый диапазон изменения напряжения расширяется до +153 и -137 %. Пример поясняет процедуру структурной идентификации, применяемую в разработанной методике.

### 3. Испытания и настройка САУ.

Быстрорешаемые идентификационные модели открывают возможность использовать автоматическую настройку и оптимизацию параметров управляющих устройств САУ энергетических ГТУ в ходе компьютерных и полунатурных испытаний. В самом деле, задача выбора оптимальных настроек регуляторов является задачей многокритериальной оптимизации с нелинейными ограничениями. Решать такую задачу целесообразно методами нелинейного программирования, основная идея которых заключается в многошаговом движении в направлении экстремума.

Сформулируем задачу нелинейного программирования.

Целевая функция

$$J = J(\mathbf{R}, \mathbf{x}) \quad (12)$$

зависит от  $n$ -мерного вектора переменных состояния системы и минимизируется путем варьирования вектора параметров  $\mathbf{R}$  системы (лежащего в области  $Z$ )

$$\min_{\mathbf{R} \in Z} J(\mathbf{R}, \mathbf{x}) \quad (13)$$

при векторе ограничений

$$\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{R}) \in \Psi, \quad (14)$$

причем в эти ограничения входят дифференциальные уравнения динамической системы (динамические ограничения) в форме уравнений (3) и (4), и ограничения  $\mathbf{R} \in Z$ . Параметры системы  $\mathbf{R}$  относятся к регуляторам системы.

Сложность решения задачи нелинейного программирования в основном определяется видом ограничений. Кроме того, решение задачи оптимизации для систем высокого порядка вида (3) и (4) приводит к весьма большим затратам машинного времени. Для каждого сочетания варьируемых параметров  $r_k$  (т. е. для каждого частного значения вектора  $\mathbf{R}$ ) необходимо численно интегрировать систему дифференциальных уравнений, входящих в ограничения (14). В случае сложной модели затраты времени недопустимо велики. В связи с этим известны подходы, основанные на технике алгебраизации исходных дифференциальных уравнений или перехода от дифференциальных уравнений к невязкам метода

ортогональных проекций (обобщенного метода Галеркина) [9] и др. С другой стороны, полученные на предыдущем этапе идентификационные модели также открывают возможность проведения оптимизации параметров если не в темпе реального процесса, то, во всяком случае, за значительно более приемлемый промежуток времени.

Еще одна сложность настройки САУ возникает из-за многокритериальности задачи параметрической оптимизации САУ. Например, в настоящее время очень важен критерий экологичности, но он вступает в очевидное противоречие с другими критериями. Ясно, что самый экологичный двигатель — это неработающий двигатель. Но даже рассматривая исключительно критерии качества динамических процессов отработки возмущающих воздействий, мы приходим к множественности критериев.

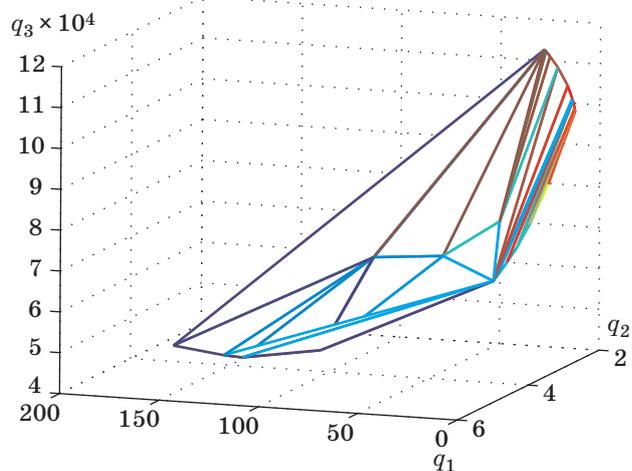
Очевидно, что эффективность САУ может быть повышена за счет совместного учета всех полезных критериев из этого множества. Но выбор весовых коэффициентов многокритериальной задачи при линейной свертке неоднозначен.

В связи с этим для сокращения области допустимых настроек САУ предложено использовать компромиссы Парето [10].

Множество парето-оптимальных решений формируется многократным решением экстремальной задачи (12), являющейся сверткой нормированных показателей качества из множества критериев  $Q_j$ :

$$Q_{\Sigma}(R_i) = \min(q_1(R_i), \dots, q_n(R_i)) = \min(\lambda_1 Nq_1(R_i) + \lambda_2 Nq_2(R_i) + \dots + \lambda_n Nq_n(R_i)), \quad (15)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  — положительные числа ( $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1$ );  $q_j$  — критерии;  $Nq_j$  — нормированные значения показателей качества.



■ Рис. 5. Область парето-оптимальных решений

Многokrатное решение экстремальной задачи обеспечивается варьированием в зависимости (15) значений коэффициентов  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  в интервале  $0 \dots 1$  при условии  $\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = 1$ .

В качестве примера на рис. 5 представлена область парето-оптимальных решений для выбора регулятора частоты вращения свободной турбины энергетической ГТУ в пространстве показателей качества:  $q_1$  — первый максимум отклонения частоты,  $q_2$  — быстродействие,  $q_3$  — среднеквадратическая ошибка.

#### 4. Полунатурные испытания.

Производится программирование аппаратуры управления САУ. Используются ранее полученные настройки для дополнительной подстройки параметров регуляторов в ходе испытаний. При необходимости предусмотрен переход на предыдущие этапы. По завершении полунатурных испытаний выполняются испытания на испытательных площадках, где установлены реальные ГТЭС, нагружаемые полем нагрузочных электри-

ческих сопротивлений ступенями по 250 кВт, подключенных через согласующий трансформатор.

#### Заключение

В статье представлены основные алгоритмические модули для компьютерной поддержки последовательности взаимосвязанных задач испытаний и настройки средств управления ГТУ. При этом на каждом из этапов используются разработанные математические модели ЭЭС. Рассмотренная методика реализована как система компьютерной поддержки (*computer-aided system*) автоматизированных испытаний.

Статья выполнена при поддержке субсидии по постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 (проект «Создание высокотехнологичного производства для оказания услуг по испытаниям газотурбинных установок мощностью до 40 МВт на многоцелевом адаптивном экологичном стенде»).

#### Литература

1. Гриценко Е. А. и др. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения / СНЦ РАН. — Самара, 2004. — 266 с.
2. Филиппова Т. А. Энергетические режимы электрических станций и электроэнергетических систем / НГТУ. — Новосибирск, 2005. — 300 с.
3. Теория автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов. Управление ВРД / Под ред. А. А. Шевякова. — М.: Машиностроение, 1976. — 344 с.
4. Шмидт И. А. Автоматизация испытаний САУ ГТД на основе цифровых быстро решаемых моделей: дис. ... канд. техн. наук. — Уфа, 1991. — 103 с.
5. Шмидт И. А. и др. Сопряжение программных сред в задачах моделирования и тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками // Информационно-управляющие системы. 2009. № 5 (42). С. 25–31.
6. Kundur P. Power system stability and control. — N. Y.: McGraw-Hill, 1994. — 1176 p.
7. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высш. шк., 1985. — 536 с.
8. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. — М.: Физматлит, 2004. — 560 с.
9. Анализ и оптимальный синтез на ЭВМ систем управления / Под ред. А. А. Воронова, И. А. Огурка. — М.: Наука. Гл. ред. Физматлит, 1984. — 344 с.
10. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981. — 488 с.