

УДК: 621.438:681.51.01-047.58.

С.М. Козьмин, Б.В. Кавалеров, К.А. Один

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ПОСТРОЕНИЕ БЫСТРОРЕШАЕМОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Рассмотрен алгоритм получения быстро решаемой модели электроэнергетической системы по данным натурального эксперимента или результатам расчетов на структурно сложной модели. Модель предназначена для расчетов поведения электроэнергетической системы при испытаниях и настройки систем управления газотурбинными установками. Полученная модель может применяться при реализации различных проектов, учитывающих динамику электроэнергетической системы.

В статье представлены результаты исследований, проводимых на кафедре микропроцессорных средств автоматизации ПНИПУ при поддержке субсидии в соответствии с Постановлением 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»).

Конвертированные электроэнергетические газотурбинные установки, разрабатываемые в ОАО «Авиадвигатель» и выпускаемые ОАО «Пермский моторный завод», уже два десятилетия используются для создания электростанций малой и средней мощности. Газотурбинные установки (ГТУ) в составе электростанций должны обеспечивать требуемое качество вырабатываемой электроэнергии. Поэтому к системам автоматического управления (САУ) газотурбинными электростанциями предъявляются достаточно жесткие требования, выполнение которых является сложной задачей. В результате в настоящее время по-прежнему сохраняются определенные проблемы при управлении ГТУ в аварийных и нормальных эксплуатационных

режимах. Аналитические исследования показали, что одной из главных причин сложившейся ситуации является неучет влияния электроэнергетической системы (ЭЭС) при разработке и испытаниях САУ ГТУ [1]. Но для учета ЭЭС необходимы или дорогостоящие натурные испытания, которые не всегда возможны, или компьютерные испытания с использованием многорежимной математической модели ЭЭС [1, 2]. Такая структурно сложная модель может быть построена при использовании векторно-матричного подхода и принципа структурного моделирования [3]. Однако значительные затраты времени при использовании этой модели приводят к тому, что модель может успешно применяться в основном только при однократной проверке уже предварительно полученных структурных и параметрических решений конкретных САУ. Например, характерный переходный процесс реальной продолжительностью одна секунда для системы из шести 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. Поэтому требуется методика, позволяющая получить компактные редуцированные быстро решаемые модели ЭЭС с нормированной погрешностью. При наличии быстро решаемых моделей становится возможным формализовать операции настройки и оптимизации САУ при проведении компьютерных и полунатурных испытаний [4]. Более того, полученные быстро решаемые модели позволят в перспективе выполнить их программную реализацию с использованием различных универсальных сред визуального моделирования (например, с помощью инструментального пакета *LabVIEW*), ориентированных на непосредственное использование в системах автоматизации [5].

Структура быстро решаемых моделей

Для того чтобы моделировать синхронный генератор вместе с электрической нагрузкой, необходимо получить быстро решаемую модель относительно внешнего управляющего воздействия синхронного генератора – напряжения возбуждения U_f (рис. 1).

Такие быстро решаемые модели характеризуются высокой универсальностью и избыточностью информации. Последнее свойство является полезным, поскольку использование дополнительной информации позволяет достичь значительного улучшения алгоритмов идентификации, а также последующих настройки и оптимизации [6].

Вместе с тем целесообразно также получить и исследовать модели с ограниченным набором переменных. Такие модели ориентированы на определенные области применения. Например, в случае автоматической настройки регуляторов системы автоматического управления (САУ) ГТУ основным возмущающим воздействием со стороны ЭЭС является активная мощность, преобразующаяся в механическую мощность на валу ГТУ. В случае исследования многосвязной системы необходимо также учитывать изменение напряжений в различных сечениях (узловых точках) ЭЭС. В связи с этим рассмотрим получение быстро решаемых моделей относительно активной мощности и напряжения. В этом случае модель формируется по следующей схеме (рис. 2).

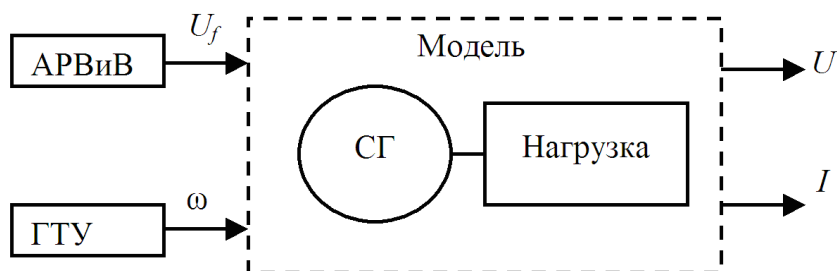


Рис. 1. Совместная идентификация генератора и нагрузки (АРВиВ – автоматический регулятор возбуждения и возбудитель)

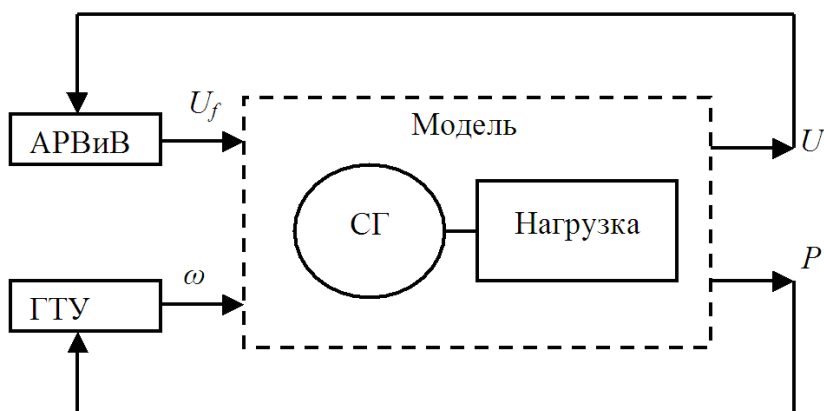


Рис. 2. Совместная идентификация генератора и нагрузки относительно напряжения и активной мощности (АРВиВ – автоматический регулятор возбуждения и возбудитель)

В отличие от схемы, приведенной на рис. 1, здесь U – это не вектор, а скалярное число, обозначающее действующее напряжение в узле нагрузки. Однако в том случае, если рассмотрению подвергается n узлов ЭЭС, вместо U может использоваться вектор U с размерностью, соответствующей числу узловых точек ЭЭС.

Рассмотрим применяемый метод идентификации – метод наименьших квадратов.

Модели обычно ищутся в следующем виде:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (1)$$

где \mathbf{Y} – вектор выходных переменных; \mathbf{X} – вектор входных переменных; \mathbf{A} – матрица коэффициентов размерностью $n \times n$, которую следует идентифицировать.

Для определения неизвестной матрицы параметров \mathbf{A} применяется метод наименьших квадратов в следующей форме записи:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^T (\mathbf{X}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^T)^{-1}. \quad (2)$$

При решении задачи идентификации вносятся дополнительные ошибки в определяемую матрицу коэффициентов \mathbf{A} из-за погрешностей в вычислении производных. Проблема численного дифференцирования хорошо известна. Суть ее заключается в том, что производная вычисляется обычно как разность двух близких по величине значений функции, поэтому относительная погрешность производной всегда оказывается больше, чем относительная погрешность численного представления дифференцируемой функции.

Поэтому предварительно преобразуем систему (1) к разностному (дискретному) виду. При этом уравнение (1) преобразуется к следующему виду:

$$\mathbf{V}(k+1) = \mathbf{F}\mathbf{V}(k), \quad (3)$$

где $\mathbf{V}(k)$ – расширенный вектор состояния системы в k -й момент времени, $\mathbf{V}(k+1)$ – расширенный вектор состояния системы в $k+1$ -й момент времени, \mathbf{F} – матрица перехода из состояния в момент k в новое состояние в момент $k+1$. Вследствие нелинейности исходного объекта и его структурно сложной модели может возникнуть необходимость использовать не одну, а несколько матриц \mathbf{F} или матрицу \mathbf{F} с переменными параметрами, которые являются функциями режима работы и режимных параметров.

В качестве оценки степени адекватности модели используем критерий (коэффициент несовпадения) Гейла:

$$S = \frac{\left[\sum_{i=1}^n [x_i^{(\ominus)} - x_i^{(M)}]^2 \right]^{0,5}}{\left[\sum_{i=1}^n [x_i^{(\ominus)}]^2 \right]^{0,5} + \left[\sum_{i=1}^n [x_i^{(M)}]^2 \right]^{0,5}}, \quad (4)$$

где $x_i^{(\ominus)}$ – переменная, полученная на i -м шаге в результате эксперимента по точной модели, $x_i^{(M)}$ – переменная, рассчитанная по упрощенной модели, n – число точек наблюдения. Допустимая погрешность модели определяется погрешностью измерительных приборов, при этом модель должна иметь погрешность не более 1–2 %.

Для построения быстрорешаемых моделей ЭЭС возьмем четыре режимных параметра ЭЭС: действующее напряжение, активную мощность, напряжение возбуждения, угловую скорость системы «ГТУ–генератор».

Структуру идентификационной модели представим в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} U(k+1) \\ P(k+1) \\ U_f(k+1) \\ \omega(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U(k) \\ P(k) \\ U_f(k) \\ \omega(k) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где U – действующее напряжение, P – активная мощность, U_f – напряжение возбуждения, ω – угловая скорость системы «ГТУ–генератор».

Для повышения точности моделирования и расширения допустимой области адекватности модели структура быстрорешаемой модели может быть усложнена, например:

$$\begin{pmatrix} U(k+1) \\ P(k+1) \\ U_f(k+1) \\ \omega(k+1) \\ s(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & f_{25} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & f_{35} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} & f_{45} \\ f_{51} & f_{52} & f_{53} & f_{54} & f_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U(k) \\ P(k) \\ U_f(k) \\ \omega(k) \\ s(k) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где s – среднее скольжение асинхронных двигателей ЭЭС. Модель со структурой (6) целесообразно применять, если в электрической

нагрузке существенную долю составляют асинхронные двигатели. При этом модель (6) обеспечивает лучшую точность и большую величину области адекватности, чем модель (5).

Алгоритм использования быстрорешаемой модели

Операции, выполняемые при получении и использовании быстрорешаемой модели, целесообразно разделить на следующие этапы (рис. 3):

1. Выбор на основе первичной модели ЭЭС набора характерных переходных процессов (динамических характеристик) ЭЭС.

2. Выбор структуры быстрорешаемой модели с учетом специфики решаемой задачи, возможности многократного использования быстрорешаемой модели, реализуемости, робастности и др.

3. Выбор алгоритма идентификации коэффициентов быстрорешаемой модели на основе рассчитанных динамических характеристик.

4. Идентификация матрицы коэффициентов быстрорешаемой модели.

5. Верификация быстрорешаемой модели. Проверка выборочных режимов на полной нелинейной модели, определение допустимых границ варьирования условий эксперимента.

6. Воспроизведение на быстрорешаемой модели заданных динамических характеристик.

7. Решение задач испытания и настройки на основе быстрорешаемой модели.

8. Перенос решения с быстрорешаемой модели на первичную модель.

9. Оценка на полной модели эффективности быстрорешаемой модели и при необходимости коррекция быстрорешаемой модели.

Таким образом, каждая быстрорешаемая модель строится для конкретного переходного процесса.

Результаты моделирования

Проверим структуру быстрорешаемой модели (5) на экспериментальных данных, полученных на программном моделирующем комплексе посредством ранее реализованной структурно сложной модели ЭЭС [3]. Данные для проведения идентификации возьмем из эксперимента, который воспроизводит включение асинхронного двигателя в цепь одиночного синхронного генератора, при его работе.

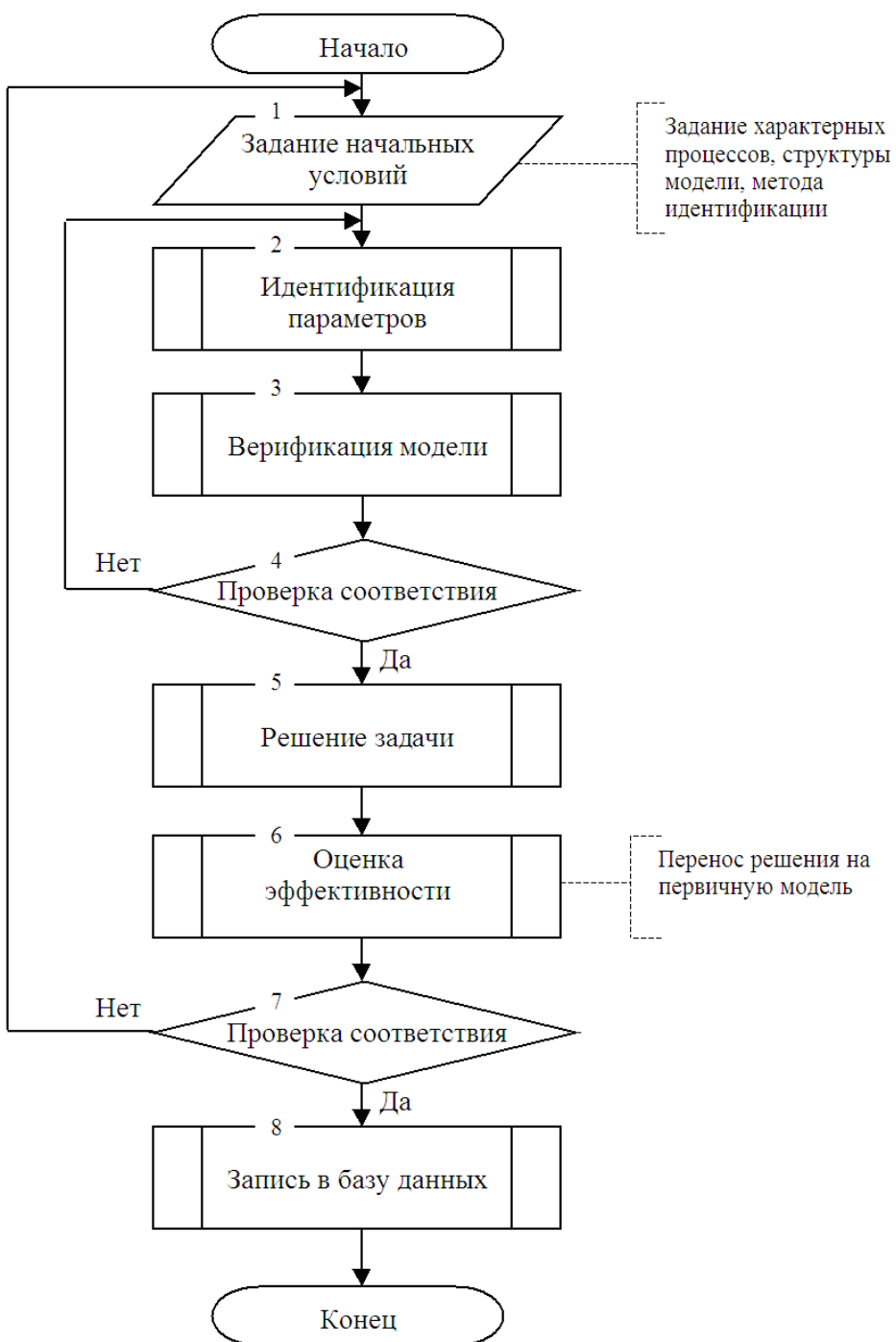


Рис. 3. Процесс создания и коррекции быстрорешаемой модели для задач испытания и настройки САУ

Используем для идентификации данные, взятые с одинаковым шагом в 0,1 с. Результаты расчета на исходной и быстрорешаемой моделях представлены на рис. 4.

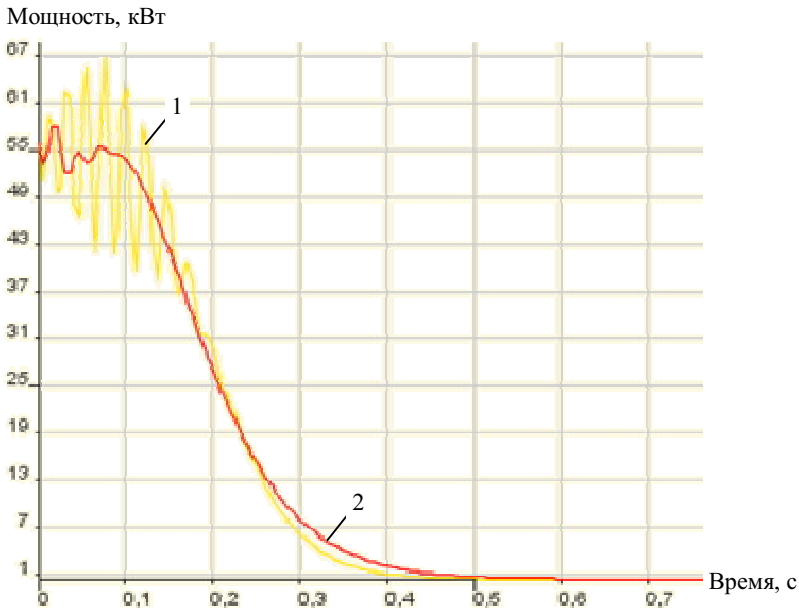


Рис. 4. Графики переходного процесса мощности:
1 – исходный модельный, 2 – модельный

Выводы

В результате проведенных исследований было обнаружено, что чем больше берется количество точек для выполнения идентификации на каждом участке постоянных коэффициентов матрицы F , тем хуже становится адекватность быстрорешаемой модели. Это может быть объяснено малой скоростью изменения переменных, некорректностью задачи идентификации, а также хорошо известными особенностями методов обработки временных рядов [7]. Тем не менее показатели качества, которые получены при проверке модели на адекватность (менее 2 %), позволяют сделать вывод, что рассмотренная быстрорешаемая модель ЭЭС (5) является адекватной. При необходимости увеличения точности модели целесообразно увеличивать количество точек и применять в расчете дополнительные режимные параметры, косвенно влияющие на объект, например (6).

Полученная модель ЭЭС позволяет существенно сократить время расчета по сравнению с первичной структурно-сложной моделью.

При проведении тестирования быстрорешаемой модели время расчета для двухэлементной системы сократилось более чем в 600 раз.

Библиографический список

1. Кавалеров Б.В., Ромодин А.В. Мини-электростанции на базе конвертированных авиационных двигателей: проблемы управления и испытания САУ ГТУ // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Амосова. – 2011. – Т.8, № 3. – С.42–49.

2. Верлань А.В., Галкин В.В. Имитация динамики энергетических объектов в системах испытания программных средств управления. – Киев: Наукова думка, 1991. – 184 с.

3. Кавалеров Б.В. Математическое моделирование в задачах автоматизации испытаний систем управления энергетических газотурбинных установок // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – №1. – С. 74 –83.

4. Кавалеров Б.В. Автоматизация испытаний САУ ГТУ газотурбинных мини-электростанций при проектировании и настройке // Автоматизация в промышленности. – 2011. – №1. – С. 12–17.

5. Автоматизация процесса испытания авиационных ГТД на базе SCADA-системы LabView / Д.А. Ахмедзянов, Р.Р. Ямалиев, А.Е. Кишалов, А.В. Суханов // Известия УГАТУ. – Т.13, № 2 (35). – С. 61–68.

6. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / А.А. Шевяков, Т.С. Мартянова, В.Ю. Рутковский [и др.]; под общей ред. А.А. Шевякова, Т.С. Мартяновой. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

7. Большакова А.А., Каримов Р.Н. Методы обработки многомерных данных и временных рядов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 552 с.

Получено 05.09.2011