

ИДЕНТИФИКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ МИНИ-ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Б.В. Кавалеров

Анализируются методы эквивалентирования электрической нагрузки применительно к задачам полунатурных испытаний систем управления газотурбинных электростанций. Предложена методика редукции модели электрической нагрузки, основанная на прямой идентификации по полной нелинейной математической модели электроэнергетической системы. Представлены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие применимость методики для решения практических задач, возникающих при испытании систем управления

Ключевые слова: газотурбинная мини-электростанция, электрическая нагрузка, идентификация, испытания

1. Введение

Проблема совершенствования систем автоматического управления (САУ) газотурбинных установок (ГТУ), предназначенных для привода синхронных генераторов в составе мини-электростанций мощностью от 2,5 до 20 МВт, по прежнему сохраняет свою актуальность. Сегодня на российском рынке достаточно широко представлены отечественные ГТУ, создаваемые на базе конвертированных авиационных двигателей. В новых условиях эксплуатации к ГТУ предъявляются новые требования по обеспечению заданных показателей качества вырабатываемой электроэнергии в условиях широкого диапазона электрических нагрузок и существенной многорежимности. Среди задач, стоящих перед разработчиками САУ ГТУ сегодня выделяют следующие: необходимость учета влияния электрической нагрузки газотурбинной мини-электростанции (ГТЭС) на этапах проектирования, синтеза и испытания САУ; необходимость учета влияния многорежимности ГТЭС (работа в автономном режиме, на мощную сеть, параллельно с другими ГТЭС); необходимость учета взаимовлияния САУ ГТУ и САУ синхронного генератора в рамках единой САУ ГТЭС. Перечисленные задачи требуют широкого привлечения методов математического моделирования для имитации поведения ГТЭС в меняющихся условиях эксплуатации. Натурные эксперименты, как правило, допустимы лишь в ограниченном диапазоне режимов и должны быть существенно дополнены компьютерным экспериментом. Для проведения компьютерного эксперимента должна быть разработана многорежимная модель электроэнергетической системы (ЭЭС) с возможностью модифицировать в ходе моделирования как состав структурных элементов, так и топологию ЭЭС.

2. Полунатурные испытания

Как известно, в процессе разработки и доводки САУ выделяют следующие этапы [1].

Этап 1. Формулировка цели управления, выбор управляемых переменных и формулировка требований к ним.

Этап 2. Выбор структуры САУ, места включения корректирующих устройств.

Этап 3. Построение математических моделей функционально необходимых элементов.

Этап 4. Выбор эталонных переходных характеристик.

Этап 5. Выбор и обоснование структуры корректирующих устройств.

Этап 6. Расчет численных значений параметров корректирующих устройств.

Этап 7. Исследование синтезированной САУ с точки зрения выполнения ею цели управления.

Этап 8. Моделирование САУ.

Этап 9. Формирование технического задания, предварительное эскизное, техническое проектирования и испытание соответственно макетов, экспериментальных и опытных образцов, запуск серийного производства.

На каждом из этапов используются математические модели. Но функции и характер этих моделей различны. На этапах 1 – 7 используются упрощенные математические модели, что позволяет привлечь хорошо разработанный математический аппарат и получить при принятых допущениях точное решение, которое можно использовать как базовое при реализации следующих этапов создания САУ. В то же время на этапе 8 используется моделирование проектируемой САУ на наиболее функционально полной математической модели с учетом нелинейностей, переменности состава структурных элементов и их параметров, неоднозначности конфигурации и др.; это моделирование является основным инструментом проектирования САУ на этапе, предшествующем аппаратной реализации САУ. На этапе 9 также проводятся испытания, но уже после аппаратной реализации: испытание макетов, экспериментальных и опытных образцов. Здесь требуется исследование натурной САУ, и также на всех характерных режимах.

Таким образом, центральную роль в иерархии математических моделей играет функционально полная многорежимная модель ЭЭС. Вслед за ее созданием на ее основе могут быть получены все

остальные модели для обеспечения различных этапов жизненного цикла САУ ГТУ для малых ГТЭС.

В Пермском государственном техническом университете (ПГТУ) по заказу предприятий авиационного двигателестроения разработан программно-моделирующий комплекс для компьютерных экспериментов на основе сложной многорежимной модели ЭЭС. Программный комплекс предназначен для имитации всех основных режимов работы многоагрегатной ГТЭС с произвольной структурой и составом структурных элементов. При этом обеспечена многофункциональная компьютерная поддержка задач проектирования, синтеза, оптимальной настройки и испытаний управляющих алгоритмов САУ ГТУ.

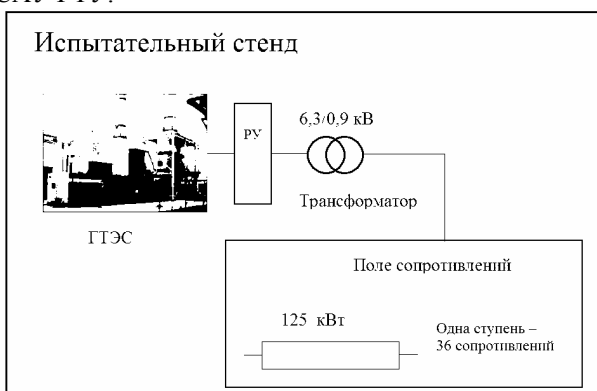


Рис.1. Стенд для испытания ГТЭС

Вслед за отработкой и оптимальной настройкой алгоритмов управления встает задача испытания натурной САУ после ее аппаратной реализации. Эти испытания в настоящее время выполняются на специальных испытательных площадках (рис.1), где размещается опытная ГТЭС в полной комплектации: ГТУ, САУ ГТУ, синхронный генератор (СГ), САУ СГ, редуктор и другие агрегаты. Нагрузку осуществляется за счет нагрузочного поля активных сопротивлений ступенями, например, по 125 кВт, вводимых и выводимых в произвольной последовательности. Реактивная мощность формируется за счет трансформатора. Испытания выполняются исключительно в автономном режиме. Таким образом, функциональность натуральных испытаний существенно ограничена, а экономические затраты велики: помимо затрат на топливо регулярной замене подлежат нагрузочные сопротивления.

Известно, что в авиационной промышленности хорошо себя зарекомендовали полунатурные испытательные стенды САУ. В таких стендах реальный ГТУ заменяется цифровой моделью, связанной через входные и выходные преобразователи координат с агрегатом испытываемой САУ. Полунатурный стенд обеспечивает существенное расширение программ испытаний при сокращении времени испытаний и экономии финансовых средств на проведение испытаний. Но полунатурные испытания предъявляют жесткие требования к цифровой модели ГТУ по

быстродействию. По этой причине в качестве цифровой модели ГТУ применяется быстрорешаемая линейризованная модель, использующая, как правило, метод Эйлера для интегрирования дифференциальных уравнений.



Рис.2. Полунатурный испытательный стенд

СУ ТС – система управления технологической системой стенда, СУЭ – система управления экспериментом, СИД – система идентификации и диагностики, ПК – преобразователи координат.

Технологию полунатурного моделирования целесообразно распространить на испытания САУ ГТУ для ГТЭС, одна из возможных схем испытательного стенда представлена на рис.2. Однако при этом цифровую модель ЭЭС необходимо дополнить цифровой моделью ГТЭС. При этом разработанная полная многорежимная модель ЭЭС не может быть непосредственно использована при полунатурных испытаниях агрегата САУ. Эта модель поэлементно воспроизводит все существенные переходные процессы в ЭЭС, что требует значительных временных затрат при расчетах даже для современной компьютерной техники. Так, из-за воспроизведения сверхпереходных составляющих статорных токов шаг численного интегрирования выбирается, как правило, не более 10 мкс. 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 [2]. В свою очередь натурные агрегаты САУ, как правило, вырабатывают сигналы с периодом от 0,01 до 0,05 с., что налагает соответствующие требования на быстродействие цифровой модели ЭЭС.

В работах [3,4] подробно рассмотрена структура и состав разработанного в ПГТУ программно-моделирующего комплекса. Настоящая статья посвящена созданию на его основе быстрорешаемых моделей для испытания САУ ГТУ. Поэтому здесь лишь кратко подчеркнем существенные для последующего изложения особенности полной многофункциональной модели, используемой в программном комплексе.

3. Сложная динамическая модель ЭЭС.

Математическая модель ЭЭС воспроизводит все основные характерные режимы работы ГТЭС: автономный, параллельный, на мощную сеть, и при различных сочетаниях электрической нагрузки. Поэтому математическая модель ЭЭС построена по принципу сложной модели: она состоит из моделей элементов и модели взаимодействия этих элементов. Модель каждого элемента ЭЭС представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, записанных в двухкоординатных осях Парка-Горева для воспроизведения активных и реактивных составляющих электрической нагрузки. Модель каждого элемента записывается в одинаковой векторно-матричной форме:

$$p\mathbf{I} = \pm \mathbf{A}\mathbf{U} - \mathbf{B}\mathbf{I} - \mathbf{H}, \quad (1)$$

где \mathbf{I} , $p\mathbf{I}$ – вектор токов и вектор производных токов элемента; \mathbf{U} – вектор напряжений, приложенных между внешними зажимами элемента; \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; \mathbf{H} – вектор, определяющий воздействие на элемент со стороны средств регулирования электрических параметров.

Математическая модель взаимодействия структурных элементов использует матрицу инцидентности \mathbf{M} , отражающую топологию рассматриваемой локальной системы электроснабжения:

$$\mathbf{M}\mathbf{G}\mathbf{M}^T\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{W} - \mathbf{M}'\mathbf{I}, \quad (2)$$

где \mathbf{M} – клеточная матрица инцидентности, клетками матрицы являются единичные, нулевые матрицы или матрицы преобразований координат; \mathbf{M}^T – транспонированная матрица инцидентности; \mathbf{G} – блочная матрица проводимостей ветвей (элементов), образующих систему; \mathbf{W} – вектор, полученный из правых частей уравнений элементов в форме (1); \mathbf{M}' – матрица, элементами которой являются нулевые клетки или клетки производных элементов матриц преобразования координат; \mathbf{U} – вектор напряжений узлов. Матрицы уравнения (2) формируются следующим образом:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{A}_i \end{pmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{pmatrix} -\mathbf{B}_1\mathbf{I}_1 - \mathbf{H}_1 \\ -\mathbf{B}_2\mathbf{I}_2 - \mathbf{H}_2 \\ \vdots \\ -\mathbf{B}_i\mathbf{I}_i - \mathbf{H}_i \end{pmatrix},$$

матрица \mathbf{G} составляется из матриц \mathbf{A}_i всех элементов моделируемой системы электроснабжения, записанных в форме (1), матрица \mathbf{W} составляется из правых частей уравнений элементов в форме (1).

Математическая модель обеспечивает расчет всех узловых напряжений системы электроснабжения по векторно-матричному уравнению (2) на каждом шаге расчета. Вслед за этим вновь решаются дифференциальные уравнения элементов (1) и находятся мгновенные значения токов каждого элемента. Процесс повторяется

требуемое число раз. Конфигурация моделируемой системы электроснабжения изменяется за счет внесения изменений в матрицу инцидентности \mathbf{M} уравнения (4). Таким образом, пользователь имеет возможность формировать различные конфигурации моделируемых ЭЭС [4].

Установившийся режим является исходным для расчета переходных процессов в системе электроснабжения. Математическая модель для расчета установившегося режима получается из уравнений (1) и (2) при условии $\frac{d}{dt} = 0$. В результате уравнение (1) преобразуется к следующему виду

$$\mathbf{U} = \pm \mathbf{A}\mathbf{I} + \mathbf{H}. \quad (3)$$

Уравнение (2) преобразуется к уравнению, обеспечивающему расчет всех узловых напряжений системы электроснабжения за один шаг расчета

$$\mathbf{M}\mathbf{G}\mathbf{M}^T\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{G}\mathbf{H}, \quad (4)$$

где \mathbf{M} – клеточная матрица инцидентности, \mathbf{G} – матрица, составленная из обращенных матриц \mathbf{A} всех элементов системы, \mathbf{H} – матрица, содержащая напряжения возбуждения всех генераторов системы, \mathbf{U} – вектор напряжений узлов.

4. Эквивалентирование на основе идентификации сложной модели.

Указанные особенности сложной многорежимной модели ЭЭС заставляют обратиться к методам эквивалентирования электрической нагрузки при создании быстрорешаемой модели. К сожалению здесь не приемлем обычный подход, заключающийся в замене комплексной нагрузки эквивалентным узлом, содержащим, например, один эквивалентный асинхронный двигатель и одну эквивалентную сосредоточенную статическую нагрузку [5]. Дело в том, что электрическая машина (синхронная и асинхронная) и в этом случае описывается системой дифференциальных уравнений высокого порядка (7 – 10 при наличии демпферных и эквивалентных роторных контуров), что требует значительного времени расчета из-за большого числа сложных систем дифференциальных уравнений и малого шага интегрирования по условиям устойчивости решения.

В связи с этим предложен метод эквивалентирования на основе идентификации по внешним динамическим характеристикам узла электрической нагрузки.

В этом случае процедура построения быстрорешаемой модели включает три основных этапа.

1) Выбор на основе сложной динамической модели ЭЭС набора характерных переходных процессов (динамических характеристик) для заданного узла комплексной нагрузки.

2) Идентификация матрицы коэффициентов быстрорешаемой модели по результатам полученной динамической характеристики.

3) Воспроизведение на быстрорешаемой модели заданных динамических характеристик.

Следует отметить, что строгая идентификация возможна лишь для математических моделей линейных относительно параметров, что определяется принципом суперпозиции. В случае нелинейных моделей возможны некоторое приближенные подходы, опирающиеся, как правило, на знание природы и свойств моделируемых систем. Таким образом, нелинейность, а также нестационарность исходной модели ЭЭС является существенной трудностью при решении задачи эквивалентирования методами идентификации.

Идентификационные модели обычно ищутся в виде системы линейных уравнений:

$$Y = AX, \quad (5)$$

где Y – вектор выходных переменных, X – вектор входных переменных, A – матрица коэффициентов, размерностью $n \times n$, которую следует идентифицировать. Если в результате наблюдений над сложной нелинейной моделью известны n векторов Y и X , то матрица A может быть идентифицирована по n наблюдениям.

$$A = Y_{\Sigma} X_{\Sigma}^{-1}, \quad (6)$$

где Y_{Σ} и X_{Σ} – матрицы, составленные из n векторов Y и X соответственно.

Если наблюдений больше чем n – применяется метод наименьших квадратов [6]:

$$A = Y_{\Sigma} X_{\Sigma}^T (X_{\Sigma} X_{\Sigma}^T)^{-1}, \quad (7)$$

или $A = Y_{\Sigma} X_{\Sigma}^{+}$, где матрица X_{Σ}^{+} – псевдообратная матрица, такая, что $X_{\Sigma} X_{\Sigma}^{+} X_{\Sigma} = X_{\Sigma}$. Она является наилучшей аппроксимацией (по методу наименьших квадратов) соответствующей системы линейных уравнений [7].

Принимая во внимание нелинейный характер исходной сложной динамической модели ЭЭС, определим два возможных способа построения эквивалентной идентификационной модели.

Способ Е. Этот способ заключается в идентификации параметров матрицы F , которая является матрицей перехода системы. При этом уравнение (5) записывается следующим образом:

$$V(k+1) = FV(k), \quad (8)$$

где $V(k)$ – расширенный вектор состояния системы в k -й момент времени, $V(k+1)$ – расширенный вектор состояния системы в $k+1$ -й момент времени, F – матрица перехода из состояния в момент k в новое состояние в момент $k+1$. Уравнение (8) описывает динамику системы на промежутке времени $[k, k+1]$. Вектор V включает в себя как входные, так и выходные переменные идентифицируемой системы. Нелинейность исходной сложной модели будет проявляться в нестационарности матрицы F . В связи с этим матрицу F приходится идентифицировать последовательно для отдельных промежутков времени, считая ее стационарной для каждого из этих промежутков. Выбор числа промежутков, на

протяжении которых матрица F предполагается постоянной, определяется исходя из априорной информации.

Способ А. Этот способ состоит в преобразовании системы (5) к виду:

$$I(k) = A(k)U(k), \quad (9)$$

где $I(k)$ – вектор выхода на k -м промежутке расчета, $U(k)$ – вектор входа на k -м промежутке расчета, A – идентифицируемая матрица постоянных коэффициентов.

Главное отличие моделей (8) и (9) состоит в том, что модель (8) описывает динамику системы, а модель (9) – статику. Воспроизведение динамики с помощью модели (9) возможно, используя концепцию мгновенных схем [8], при этом на отдельном относительно малом промежутке времени все переменные I , U считаются постоянными, тем самым производится редукция исходной динамической модели к набору статических. В дальнейшем будем называть этот подход – квазидинамическим.

С использованием модели (8) (или (9)) и процедуры идентификации производится эквивалентирование электрической нагрузки сложной модели (1), (2). При этом критерием эквивалентности является совпадение внешних динамических характеристик поведения исходной сложной модели и ее эквивалента.

В качестве внешних динамических характеристик выбраны внешние (статорные) токи узла нагрузки, составляющие вектор $I = (I_d, I_q)^T$, и напряжение узла нагрузки, также составляющее вектор $U = (U_d, U_q)^T$. Двухкомпонентность векторов позволяет учесть и восстановить активную и реактивную составляющую мощности нагрузки по результатам расчета переходного процесса и получить другие параметры (угол нагрузки, коэффициент мощности и пр.).

В результате становится возможным объединить в рамках одной модели вида (8) или (9) не только однородные, но и разнородные электроприемники, например, в одном узле могут быть учтены 5 асинхронных двигателя и 7 элементов статической нагрузки. После идентификации получается модель узла нагрузки, имеющая в качестве выхода вектор $I = (I_d, I_q)^T$, совпадающий в динамике вплоть до заданной погрешности с выходом полной поэлементной модели ЭЭС. При этом модель вида (8) требует однократного определения матрицы F на каждом промежутке расчета, в свою очередь модель вида (9) требует хранения k матриц A . Погрешность (в стационарном случае) определяется принятым шагом дискретности при идентификации и моделировании. Стационарный случай означает, что, например, все асинхронные двигатели работают с постоянными (не обязательно равными, как в [5]) скольжениями, кроме того не происходит изменения сопротивлений в статической нагрузке, иными словами все элементы идентифицируемых матриц являются стационарными.

В нестационарном случае (при зависимости коэффициентов матриц \mathbf{F} и \mathbf{A} от времени) необходимо учитывать эту нестационарность при проведении идентификации. При этом, как отмечалось выше, необходимо иметь априорную информацию о природе нелинейности и нестационарности, которую, в свою очередь можно получить по сложной нелинейной модели ЭЭС. Не снижая общности рассматриваемой методики в качестве примера рассмотрим решение задачи идентификации для такого существенно нелинейного и нестационарного элемента каким является асинхронный двигатель (АД).

5. Быстрорешаемая модель асинхронного двигателя

Математическая модель асинхронного двигателя в составе сложной модели ЭЭС описывается векторно-матричным уравнением (1), полученным по следующей (с общепринятыми допущениями) системе дифференциальных уравнений асинхронного двигателя:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_d}{dt} = -\omega\Psi_q - rI_d + U_d, \\ \frac{d\Psi_q}{dt} = \omega\Psi_d - rI_q + U_q, \\ \frac{d\Psi_D}{dt} = -r_2I_D - (\omega - \omega_{AD})\Psi_Q, \\ \frac{d\Psi_Q}{dt} = -r_2I_Q + (\omega - \omega_{AD})\Psi_D, \\ \frac{d\omega_{AD}}{dt} = \frac{1}{T_j}(M_C - M), \\ M = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d, \end{cases} \quad (10)$$

где ω – угловая скорость ротора синхронного генератора или синхронная скорость для узла, к которому подключен асинхронный двигатель, ω_{AD} – угловая скорость асинхронного двигателя, r – активное сопротивление обмотки статора, r_2 – активное сопротивление обмотки ротора, M_C – момент нагрузки на валу двигателя, M – электромагнитный момент двигателя (вращающий), Ψ_d, Ψ_q – потокосцепления статора по продольной и поперечной осям, Ψ_D, Ψ_Q – потокосцепления роторной обмотки по продольной и поперечной осям, I_d, I_q – токи статора по продольной и поперечной осям, I_D, I_Q – токи ротора по продольной и поперечной осям, U_d, U_q – напряжение на обмотке статора по продольной и поперечной осям.

Далее все потокосцепления выражаются через токи и соответствующие индуктивные сопротивления в предположении отсутствия насыщения. При необходимости учет насыщения несложен [9]. Как видим, в модели присутствуют статорные (внешние) токи и роторные (внутренние) токи. При проведении идентификации целесообразно редуцировать модель асинхронного двигателя, приняв в рассмотрение только внешние токи, т.е. исключить из рассмотрения роторные токи. Для этого преобразуем модель из формы (1) к

форме $\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A} \mathbf{V}$, при этом матрица коэффициентов модели \mathbf{A} будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{\alpha} & 0 & -\frac{r}{\alpha} & \frac{-\omega(x_s - S \frac{x_m^2}{x_r})}{\alpha} & \frac{x_m r_2}{\alpha x_r} & \frac{x_m \omega(S-1)}{\alpha} \\ 0 & \frac{1}{\alpha} & \frac{\omega(x_s - S \frac{x_m^2}{x_r})}{\alpha} & -\frac{r}{\alpha} & \frac{x_m \omega(S-1)}{\alpha} & \frac{x_m r_2}{\alpha x_r} \\ -\frac{x_m}{x_r \beta} & 0 & \frac{x_m r}{\beta x_s} & \frac{-x_m \omega(S-1)}{\beta} & -\frac{r_2}{\beta} & \frac{\omega(Sx_r - \frac{x_m^2}{x_s})}{\beta} \\ 0 & -\frac{x_m}{x_r \beta} & \frac{x_m \omega(S-1)}{\beta} & \frac{x_m r}{\beta x_s} & \frac{\omega(Sx_r - \frac{x_m^2}{x_s})}{\beta} & -\frac{r_2}{\beta} \end{pmatrix}$$

где x_s, x_r, x_m – индуктивные сопротивления статорной и роторной обмоток и эквивалентной ветви намагничивания, α, β – коэффициенты: $\alpha = x_s - x_m^2 / x_r$, $\beta = x_r - x_m^2 / x_s$, $S = (\omega - \omega_{AD}) / \omega$ – скольжение асинхронного двигателя, векторы переменных и

производных: $\mathbf{V} = (U_d \ U_q \ I_d \ I_q \ I_D \ I_Q)^T$,

$$\dot{\mathbf{V}} = (\dot{I}_d \ \dot{I}_q \ \dot{I}_D \ \dot{I}_Q)^T$$

Асинхронный двигатель при пуске обладает существенной нелинейностью и нестационарностью (входящее в матрицу \mathbf{A} скольжение S при пуске меняется от 1 до 0). Переходный процесс, рассчитанный по сложной нелинейной модели, и результат идентификации представлены на рис.3.

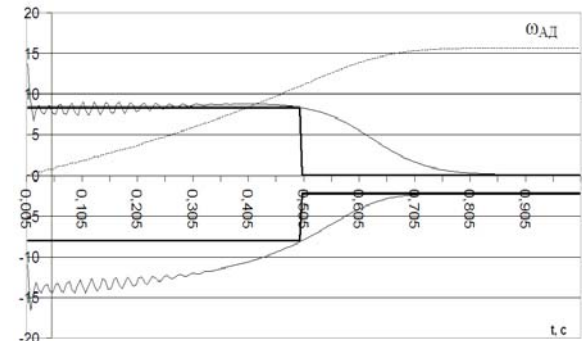


Рис.3. Пуск асинхронного двигателя, идентификация двумя матрицами \mathbf{A}

Как видно из рис.3. (здесь применена идентификация по способу А), пусковые токи на протяжении пуска первоначально достаточно плавно изменяются, а затем быстро уменьшаются, когда частота вращения достигает номинального значения и скольжение стремится к нулю. При этом параметры матрица \mathbf{A} резко изменяются, что делает невозможным идентифицировать одной матрицей весь переходный процесс. Поэтому на рис.3. показана идентификация с помощью двух матриц \mathbf{A} по уравнению (9). Тонкими линиями выделены токи I_d, I_q исходной сложной модели, жирными линиями – токи идентификационной модели. Две матрицы \mathbf{A} потребовались здесь для того, чтобы учесть нестационарность матрицы \mathbf{A} исходной модели. В том случае, если используется большее количество матриц, приближение получается лучше (рис.4.)

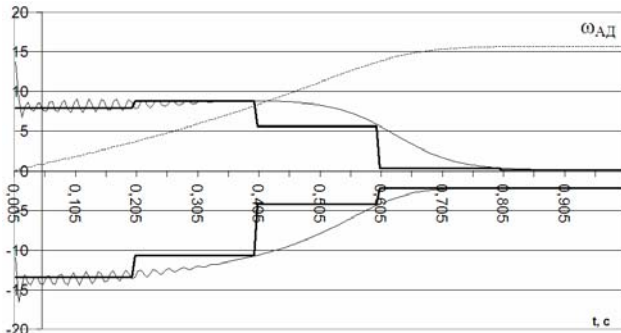


Рис.4. Пуск асинхронного двигателя, идентификация пятью матрицами А

Если АД работает при постоянном скольжении, а также, если не меняются сопротивления статической нагрузки, если можно пренебречь насыщением и изменением частоты сети, т.е. если исходная модель является стационарной, идентификационная модель состоит только из одной матрицы А. В целом же затраты на моделирование существенно сокращаются, так как вместо решения взаимосвязанных систем дифференциальных уравнений используется ряд статических моделей, квазидинамически имитирующих режим узла комплексной нагрузки. Аналогично учитывается произвольное число статических элементов и асинхронных двигателей, поскольку идентификация производится по внешним характеристикам. Число матриц А выбирается исходя из априорной информации (предварительно рассчитанного переходного процесса на сложной нелинейной модели). В качестве примера на рис. 5. Показана идентификационная модель для комплексной нагрузки.

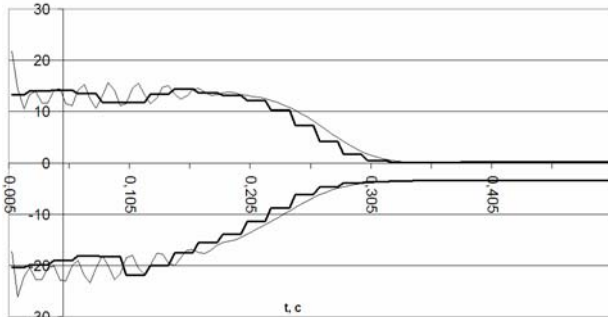


Рис.5. Идентификация узла комплексной нагрузки

Теперь рассмотрим идентификацию способом F для пуска АД. При попытке идентифицировать модель в форме (8) применение одной матрицы перехода F (так же как ранее одной матрицы А) не позволяет получить адекватный результат, поскольку в исходной модели эта матрица нестационарна (рис.6.)

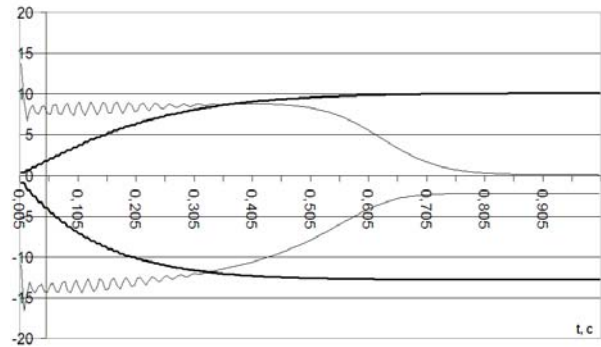


Рис.6. Пуск асинхронного двигателя, идентификация одной матрицей F

Для достижения адекватного воспроизведения переходного процесса в данном случае необходимы по крайней мере две матрицы F (рис. 7.).

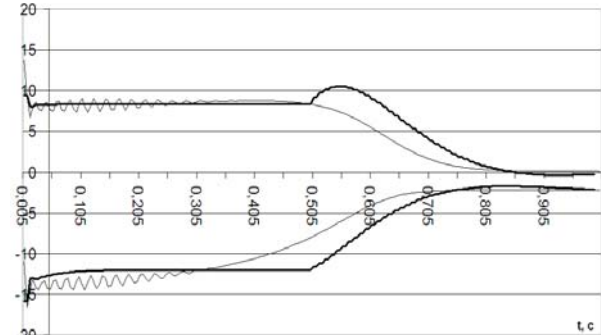


Рис.7. Идентификация двумя матрицами F

Увеличение числа дополнительных матриц F обеспечивает требуемый уровень адекватности воспроизведения динамических характеристик.

6. Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Быстрорешаемые идентификационные модели позволяют адекватно воспроизводить динамические режимы узлов нагрузки ЭЭС, в том числе, при нестационарности характеристик элементов нагрузки.

2. Быстрорешаемые идентификационные модели предоставляют значительную экономию времени расчета, что обеспечивает возможность их применения в полунатурных системах испытаний САУ.

3. В случае линейности всех характеристик элементов нагрузки для идентификации достаточно одной матрицы F.

4. При моделировании нестационарных режимов необходимо использовать априорную информацию о протекающем процессе.

5. Способы F и A имеют свои особенности. Способ A не требует итерационного расчета переходного процесса и позволяет ограничиться расчетом в заданные моменты времени. В свою очередь способ F при использовании нескольких матриц способен обеспечить плавность переходных процессов и в отдельных случаях позволяет ограничиться одной матрицей F. Оба способа при увеличении количества матриц A и F в идентификационной модели позволяют достичь

предварительно заданной точности воспроизведения переходного процесса.

6. Разработанная методика идентификации позволяет учесть нелинейности системы, поскольку применяемая идентификационная модель должна быть линейна только по отношению к параметрам модели [6].

7. Чтобы избежать плохой обусловленности обращаемой матрицы (получение псевдообратной матрицы) в случае медленного изменения переменных (режим близкий к установившемуся) целесообразно накладывать на входной сигнал дополнительный идентифицирующий сигнал малой амплитуды приближающийся по своим характеристикам к «белому шуму».

8. Напряжение системы (ввиду обратного влияния на коэффициенты идентифицируемых матриц) должно быть достаточно близким к исходным экспериментальным значениям, что обеспечивается полунатурными испытаниями по предварительно заданной программе.

9. Двухкомпонентность векторов идентификационной модели (по осям d и q) позволяет непосредственно учесть активную и индуктивную составляющую электрической нагрузки.

10. Полученные эквивалентные идентификационные модели (8) или (9) в отличие от традиционных моделей не представимы в виде какой-либо электрической цепи, поскольку идентифицированные матрицы F и A не связаны с конкретными значениями активных и индуктивных сопротивлений, тем не менее эти модели позволяют достаточно точно и с небольшими затратами времени учесть характер внешних переходных процессов узлов электрической нагрузки

7. Заключение

Разработан подход к созданию на основе сложной нелинейной модели ЭЭС быстрорешаемых идентификационных моделей электрической нагрузки для полунатурных испытаний алгоритмов управления миниГТЭС. Результаты компьютерного моделирования подтверждают работоспособность быстрорешаемых моделей.

Пермский государственный технический университет

IDENTIFICATION OF ELECTRIC LOAD MODEL FOR TESTING OF CONTROL SYSTEMS OF GAS-TURBINE MINI POWER PLANTS

B.V. KavaleroV

There are analyzed methods of obtaining of equivalent for electrical load modeling oriented for testing of gas-turbine mini plants. There is proposed the method of reduction of electric load by identification of full nonlinear power system model. The results of computer modeling are shown that admit the adaptability of this method for practice tasks of testing of control systems

Key words: gas-turbine power plants, electric loads, identification, testing

Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5 тт. Т3: Синтез регуляторов систем автоматического управления/ Под ред. К.А.Пупкова и Н.Д.Егулова. – М:Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 616 с.
2. Шмидт И.А., Кавалеров Б.В., Один К.А., Шигапов А.А. Сопряжение программных сред в задачах моделирования и тестирования систем управления энергетическими газотурбинными установками// Информационно-управляющие системы. – 2009, № 5 (42). С.25 – 31.
3. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б. Программный комплекс для математического моделирования автономных мини-электростанций//Электричество. – 2007., № 3. С. 2 – 7.
4. Винокур В.М., Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б., Сапунков М.Л. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем: моногр. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 299 с.
5. Жуков В.В. Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 192 с.
6. Эйхгофф П. Основы идентификации систем управления. Оценка параметров и состояния. М.: Мир, 1975. – 685 с.
7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 560 с.
8. Старошук Л.В. Эквивалентирование электрических систем – М.: Изд-во МЭИ, 1987. – 44 с.
9. Кавалеров Б.В., Кузнецов М.И., Шигапов А.А. Математическое моделирование автономных систем электроснабжения с учетом насыщения электрических машин//Электротехника. – 2009, №11. С.13 –18.

Статья выполнена 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 40МВт на многоцелевом адаптивном экологичном стенде»).