

Адаптивное управление синхронным генератором на основе безынерционного параметрического алгоритма

ПОЛЯХОВ Н.Д., ХА АНЬ ТУАН

Существующие способы возбуждения синхронных генераторов основаны на построении систем с объектом управления с постоянными параметрами. В реальности же происходят существенные изменения параметров в различных режимах работы, характерных, например, при выдаче и потреблении энергии. В линеаризованной модели синхронного генератора даже в режиме потребления наблюдается изменение знака одного из параметров. Для автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) с взаимосвязанными контурами настройка систем выполняется опытным оператором, причем процедура может быть сложной и занимать много времени. Результатом всегда является установка одной компромиссной настройки АРВ, далеко не оптимальной для всех режимов работы машины. В статье представлен новый алгоритм управления синхронным генератором на основе безынерционной параметрической адаптации. При синтезе алгоритма использован метод функций Ляпунова. Алгоритм, полученный в алгебраической форме, обладает экспоненциальной устойчивостью адаптивных процессов и обрабатывает значительную неопределенность объекта управления (пятикратное уменьшение и увеличение параметров), а также аддитивные возмущения (электромагнитный момент). Проведенное моделирование адаптивного синхронного генератора в среде MATLAB/Simulink показывает стабильность (почти одинаковость) форм основных переходных процессов по частоте и напряжению. Алгоритм не требует предварительного исследования и после несложных расчетов почти готов для практического использования или внедрения.

Ключевые слова: синхронный генератор, система возбуждения, адаптивное управление, функции Ляпунова, параметрическая адаптация

Проблема построения регулятора возбуждения синхронного генератора (СГ), гарантирующего устойчивость энергосистемы и обеспечивающего требуемое качество поддержания напряжения, инвариантность настроек к изменению режима работы генератора и сети, уменьшение времени переходных процессов в режиме малых возмущений и удовлетворительное качество демпфирования электромеханических колебаний, является актуальной, особенно в связи с постоянно ужесточающимися требованиями к быстродействию и точности систем регулирования мощных синхронных генераторов [1, 2].

Существующие разработки систем возбуждения основаны на методах построения систем с объектом управления с постоянными параметрами. В реальности же происходят существенные изменения этих параметров в различных режимных условиях, характерных, например, при выдаче и потреблении энергии. В линеаризованной модели синхронного генератора даже в режиме потребления наблюдается изменение знака одного из параметров [2]. Для автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) с взаимосвязанными контурами настройка систем выполняется опытным оператором, причем процедура может быть сложной и занимать много времени. Результатом всегда является установка одной компромиссной настройки АРВ, дале-

ко не оптимальной для всех режимов работы генератора.

Для улучшения характеристик АРВ привлекались и продолжают привлекаться более «сильные» методы, предназначенные для управления техническими объектами с ограниченной неопределенностью. Прежде всего это адаптивное управление [3]. Однако окончательный выбор из множества адаптивных стратегий для универсального применения на практике так и не установлен ввиду наличия их собственной «негрубости» относительно сходимости адаптивных процессов.

Исследовались также возможности оптимального управления (аналитическое конструирование оптимальных/агрегированных регуляторов) [4, 5]. Отметим, что оптимальные законы при синтезе требуют наличия полного вектора состояния; полученная оптимальность может оказаться не «грубой» к дестабилизирующим факторам. От этих недостатков более свободны робастные законы управления [6, 7], которые могут также применяться для объектов управления с гладкими нелинейностями. Однако робастный регулятор представляет собой динамический (дифференцирующий) фильтр, что в некоторых случаях может быть проблемой в реализации.

Применение систем с нечеткой логикой наиболее эффективно в сложных трудно формализуемых и плохо структурированных процессах, так как воз-

можно управление без использования специфических знаний о динамике их функционирования. Примеры применения нечетких регуляторов в структуре АРВ отражены в [8–11]. Нейронные регуляторы организованы по принципу сети прямого распространения. При обучении (настройке) регулятора используется метод обратного распространения ошибки [12]. Структуры систем управления динамическими объектами, как правило, выполняются на основе идентификаторов объекта управления как математического оператора, причем используются как параллельные с объектом управления схемы, так и последовательные как обратный оператор. В этом случае при идеальной настройке нейронного регулятора результирующая передаточная функция будет близка к единице. Применение нейронных регуляторов для проектирования интеллектуальных АРВ представлено в [13–15].

Следует отметить, что нечеткие и нейронные регуляторы систем возбуждения СГ концептуально иные, чем указанные выше АРВ, и поэтому организация настройки и введения в действие сопряжена с необходимостью использования соответствующих моделирующих средств и стендовых испытаний.

В статье задача эффективного управления СГ решена в рамках адаптивного подхода в классе адаптивных систем с моделями, в частности, с настраиваемой моделью (АСНМ) [3] на основе «грубого» безынерционного адаптивного алгоритма с параметрической настройкой и асимптотической сходимостью. Синтез адаптивного алгоритма выполнен на основе метода функций Ляпунова. Моделирование динамических процессов адаптивного СГ осуществлено в среде MATLAB/Simulink.

Модель синхронного генератора. Динамические свойства синхронного генератора как объекта управления описываются следующей системой уравнений в отклонениях [2]:

$$\begin{aligned} \dot{D}E_q(t) &= -\frac{1}{k_3 t_{do}} D E_q(t) - \frac{k_4}{t_d} D d(t) + \frac{1}{t_{do}} D E_f(t); \\ \dot{D}w(t) &= -\frac{k_2}{t_j} D E_q(t) - \frac{k_1}{t_j} D d(t) + \frac{1}{t_j} D M_M(t); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{D}d(t) = D w(t);$$

$$D U(t) = k_5 D d(t) + k_6 D E_q(t),$$

где $D U(t)$, $D d(t)$, $D E_q(t)$, $D w(t)$ – отклонения напряжения СГ, угла расхождения векторов ЭДС E_q и U , ЭДС генератора и угловой частоты от их значений, которыми являются соответственно входные значения настраиваемой модели с номинальными параметрами; $D M_M(t)$ – отклонение механического момента турбины; $D E_f(t)$ – отклонение ЭДС возбуждителя; k_1 – коэффициент, характеризующий изме-

нение электрической мощности при изменении угла ротора в условиях постоянства потокосцепления по продольной оси, т.е. синхронизирующий момент; k_2 – коэффициент, характеризующий изменение электрической мощности при изменении потокосцепления в условиях постоянства угла ротора; k_3 – коэффициент, характеризующий влияние внешнего сопротивления и, следовательно, не зависящий от нагрузки машины; k_4 – коэффициент, характеризующий размагничивающее действие при изменении угла ротора; k_5 – коэффициент, характеризующий изменение напряжения на шинах генератора при изменении угла ротора в условиях постоянства ЭДС; k_6 – коэффициент, характеризующий напряжения на шинах генератора при изменении ЭДС в условиях постоянства угла ротора; t_{do} – постоянная времени СГ по продольной оси разомкнутой обмотки статора; t_j – постоянная инерции.

Из системы (1) после несложных преобразований получим эквивалентную систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{D}U(t) &= -\frac{1}{k_3 t_{do}} D U(t) + k_5 \dot{D}w(t) + \\ &+ \frac{k_5}{k_3 t_{do}} - \frac{k_6 k_4}{t_d} \ddot{D}d(t) + \frac{k_6}{t_{do}} D E_f(t); \\ \dot{D}w(t) &= -\frac{k_2}{k_6 t_j} D U(t) + \frac{k_2 k_5}{k_6 t_j} - \frac{k_1}{t_j} \ddot{D}d(t) + \\ &+ \frac{1}{t_j} D M_M(t); \\ \dot{D}d(t) &= D w(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Появление в системе (2) скобок, которые могут давать при вариации параметров изменение знака, расширяет многообразие движений самой системы, включая и неустойчивые режимы. Проверка законов управления на этой модели целесообразна, поскольку дает возможность получить более глубокое представление относительно их состоятельности, в частности «грубости».

Структурная схема СГ по уравнениям (2) представлена на рис. 1, структурная система адаптивного управления СГ – на рис. 2.

Постановка задачи. Уравнение генератора задается в виде

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t), \quad (3)$$

где $x(t)$ – n -мерный вектор состояния; $u(t)$ – m -мерный вектор управления, $m \leq n$; матрица управления технического объекта $B = \{b_{ij}\}_{n \times m}$, все элементы которой точно известны; матрица состояния

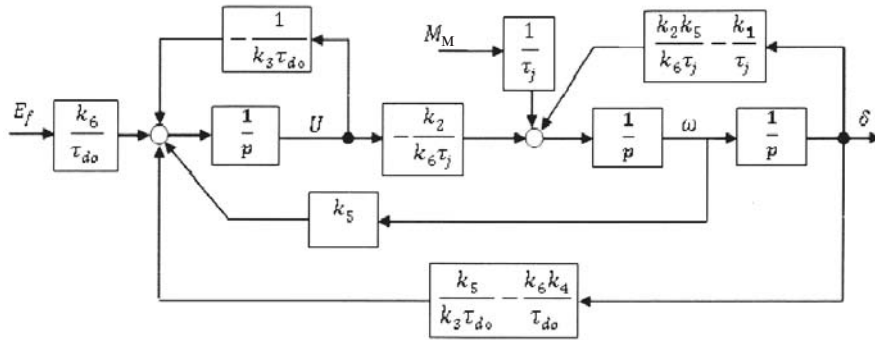


Рис. 1

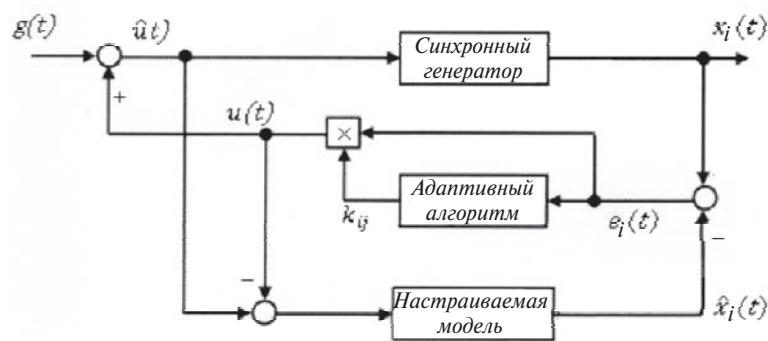


Рис. 2

$A = \{a_{ij}\}_{n \times m}$ имеет ограниченную параметрическую неопределенность $\hat{Q} \hat{Q}$, где ограниченное подмножество $Q = \{q_{ij} | a_{ij} - a_{ij}^* | \leq q_{ij}, i, j = \overline{1, n}\}$, a_{ij}^* – номинальное значение; $\hat{t} \in [t_0, \infty]$.

Уравнение настраиваемой модели:

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + B_0 (u - u), \quad (4)$$

где $x(t)$ – n -мерный вектор состояния настраиваемой модели; $u(t)$ – m -мерный вектор сигналов адаптации настраиваемой модели; A_0, B_0 – постоянные матрицы, отражающие желаемую динамику СГ.

Обозначим компоненты вектора ошибки управления в виде $e_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t)$.

Из (3) и (4) после несложных преобразований получаем дифференциальное уравнение по ошибке:

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t) + d(t); e(t_0) = e_0, \quad (5)$$

где $d(t) = [(A - A_0)x(t) + (B - B_0)g(t)]$; $g(t)$ – программное управление.

Из уравнения (5) получаем

$$Bu(t) = e(t) - Ae(t) - d(t). \quad (6)$$

Уравнение (3) представим в виде

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_0 \hat{x}(t) + B_0 g(t) + \tilde{d}(t) + Bu(t), \quad (7)$$

где $\tilde{d}(t) = (A - A_0)x(t) + (B - B_0)g(t)$.

Подставляя выражение (6) в (7), получаем

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_0 \hat{x}(t) + B_0 g(t) + \tilde{d}(t) + e(t) - Ae(t) - d(t).$$

Поскольку при $t \in \mathbb{R}_+$ $e(t) \in 0$ и $x(t) \in \mathbb{R}^n$, то как следствие $\tilde{d}(t) \gg d(t)$, тогда уравнение замкнутого СГ (3) приведет к виду $\dot{\hat{x}}(t) = A_0 \hat{x}(t) + B_0 g(t)$. Как видно, описание СГ представлено постоянными матрицами, указанными в (4). Это и есть конечная цель управления.

Построение алгоритма адаптации. Рассмотрим уравнение

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + Bu(t). \quad (8)$$

Закон адаптации $u(t)$ определяется таким образом, чтобы обеспечить асимптотическую устойчивость решения уравнения (8).

Пусть структура регулятора (закон управления) задается в виде линейной обратной связи

$$u(t) = K(t)e(t), \quad (9)$$

где $K = \{k_{ji}\}_{m \times n}$ – матрица настраиваемых параметров.

Определим алгоритм настройки параметров k_{ji} методом функций Ляпунова [16].

Пусть функция Ляпунова выбрана в виде $J(t) = \frac{1}{2} e^T(t)e(t)$, тогда ее полная производная по времени имеет вид $\dot{Y}(t) = \dot{J}(t) = e^T(t)\dot{e}(t)$.

Для обеспечения асимптотической устойчивости системы (8) достаточно выполнения условия

$$\dot{Y}(t) < 0. \tag{10}$$

Подставляя выражение (8) в (6), получаем

$$\dot{e}(t) = W(t)e(t); \quad W(t) = (A + BK),$$

тогда

$$\dot{Y}(t) = e^T(t)W(t)e(t) = \sum_{i=1}^n \dot{a}_{ii}^2 w_{ii}^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n w_{ij} e_i e_j.$$

Пусть

$$\dot{Y}(t) = Y_1(t) + Y_2(t), \quad \text{где } Y_1(t) = \sum_{i=1}^n \dot{a}_{ii}^2 w_{ii}^2;$$

$$Y_2(t) = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n w_{ij} e_i e_j.$$

Очевидно, если $Y_1(t) < 0$ и $Y_2(t) < 0$, то условие (9) выполняется.

Применим подход [14] к определению элементов матрицы $W(t) = \{w_{ij}\}_{n \times n}$, а именно, w_{ii} - выбираются постоянными и отрицательными ($w_{ii} < 0$) и, следовательно, $Y_1(t) < 0, i = \overline{1, n}$;

$$w_{ij}(t) = a_{ij}^{-1} e_i(t) e_j(t); \quad a_{ij} < 0, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j, \tag{11}$$

тогда

$$Y_2(t) = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n w_{ij} e_i e_j = \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n a_{ij} w_{ij}^2 < 0.$$

Матрица настраиваемых параметров при $n = m$

$$K(t) = B^{-1}(W - A); \tag{12}$$

при $m \neq n$

$$K(t) = B^+(W - A). \tag{13}$$

С учетом параметрической неопределенности матрицы A ($\hat{Q} \hat{Q}$) для вычисления матрицы $K(t)$ используются номинальные значения a_{ij}^2 .

Основной результат. Асимптотическая устойчивость системы (3) достигается при использовании структуры АСНМ с законом управления (12), (13) и алгоритмом настройки параметров $K(t)$ по уравнению (11).

Моделирование адаптивного синхронного генератора. Из (2) и (8) запишем выражение векторов и матриц модели синхронного генератора:

$$e(t) = [DU(t), Df(t), Dd(t)]^T = [e_1(t), e_2(t), e_3(t)]^T;$$

$$DU(t) = U(t) - \overset{\$}{U}(t); \quad Df(t) = f(t) - \overset{\$}{f}(t);$$

$$Dd(t) = d(t) - \overset{\$}{d}(t);$$

$$u(t) = [DE_f(t), DM_M(t)]^T = [u_1(t), u_2(t)]^T;$$

матрицы A и B имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} \dot{e} & 1 & k_5 & k_6 k_4 & \dot{u} \\ \dot{e} & -\frac{1}{k_3 t_{do}} & k_5 & -\frac{k_6 k_4}{k_3 t_{do}} & \dot{u} \\ \dot{e} & -\frac{k_2}{k_6 t_j} & 0 & \frac{k_1}{t_j} & \dot{u} \\ \dot{e} & -\frac{k_2}{k_6 t_j} & 0 & \frac{k_1}{t_j} & \dot{u} \\ \dot{e} & 0 & 1 & 0 & \dot{u} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \dot{e} & k_6 & \dot{u} \\ \dot{e} & t_{do} & 0 \\ \dot{e} & 0 & \frac{1}{t_j} \\ \dot{e} & 0 & \frac{1}{t_j} \\ \dot{e} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Переменные $\overset{\$}{U}(t), \overset{\$}{f}(t), \overset{\$}{d}(t)$ соответствуют аналогичным переменным настраиваемой модели, параметры которой отвечают выбранной (эталонной) динамике замкнутой системы с синхронным генератором.

По выражению (13)

$$K = B^+(W - A) = \begin{bmatrix} \dot{e} & k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dot{u} \\ \dot{e} & k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dot{u} \end{bmatrix}, \quad W(t) = \{w_{ij}\}_{n \times n};$$

$$w_{ij}(t) = a_{ij}^{-1} e_i(t) e_j(t); \quad w_{ii} < 0, \quad i, j = \overline{1, 3}.$$

Сигналы адаптивного управления:

$$u_1(t) = k_{11} e_1(t) + k_{12} e_2(t) + k_{13} e_3(t);$$

$$u_2(t) = k_{21} e_1(t) + k_{22} e_2(t) + k_{23} e_3(t).$$

Моделирование системы адаптивного управления СГ выполнено в среде MATLAB/Simulink при следующих значениях параметров СГ: $k_1 = 1,773$; $k_2 = 0,854$; $k_3 = 0,346$; $k_4 = 1,49$; $k_5 = 0,038$; $k_6 = 0,584$; $t_{do} = 4$ с; $t_j = 2,5$ с.

В результате

$$A = \begin{bmatrix} \dot{e} & 0,723 & 0,038 & -0,19 & \dot{u} \\ \dot{e} & -0,585 & 0 & 5 & \dot{u} \\ \dot{e} & 0 & 1 & 0 & \dot{u} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \dot{e} & 0,146 & 0 & \dot{u} \\ \dot{e} & 0 & 0,4 & \dot{u} \\ \dot{e} & 0 & 0 & \dot{u} \end{bmatrix}$$

$$B^+ = \begin{bmatrix} \dot{e} & 6,85 & 0 & 0 & \dot{u} \\ \dot{e} & 0 & 2,5 & 0 & \dot{u} \end{bmatrix}$$

Выберем номинальные значения элементов матрицы A с учетом особенности эквивалентной модели генератора (изменение знака разностей в скобках) и наличия неопределенности, а именно: $a_{ij}^* = [0,723 \ 0,038 \ -0,19; -0,585 \ 0 \ 5; 0 \ 1 \ 0]$.

Для получения хорошего качества процессов адаптивного управления выбраны следующие настроенные параметры адаптера: $a_{12} = -10$; $a_{13} = -3$;

$a_{21} = -6$; $a_{23} = -4$. Кроме того, компоненты k_{11} , k_{22} выбраны произвольно (но с отрицательными значениями): $k_{11} = -18$, $k_{22} = -8$. Тогда алгоритмы адаптации имеют вид:

$$k_{12} = 6,85(-10^{-1}e_1e_2 - 0,046);$$

$$k_{13} = 6,85(-3^{-1}e_1e_3 + 0,17);$$

$$k_{21} = 2,5(-6^{-1}e_2e_1 + 0,26); k_{23} = 2,5(-4^{-1}e_2e_3 - 5).$$

Эффективность адаптивного алгоритма исследована при изменении нескольких значений элементов матрицы A синхронного генератора и рассмотрении переходных процессов по частоте и напряжению. Значения элементов a_{12} , a_{21} , a_{23} одновременно увеличиваются или снижаются в 5 раз. Тогда

$$A = \begin{pmatrix} \dot{e} & 0,723 & 0,19 & -0,19\dot{u} \\ \dot{e} & -2,925 & 0 & 25\dot{u} \\ \dot{e} & 0 & 1 & 0 \\ \dot{e} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ или}$$

$$A = \begin{pmatrix} \dot{e} & 0,723 & 0,0076 & -0,19\dot{u} \\ \dot{e} & -0,117 & 0 & 1\dot{u} \\ \dot{e} & 0 & 1 & 0 \\ \dot{e} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Результаты моделирования переходных процессов СГ с тремя наборами параметров (с уменьшением/увеличением в 5 раз и номинальными значениями) в среде MATLAB/Simulink представлены на рис. 3 и 4: на рис. 3,а – переходные процессы син-

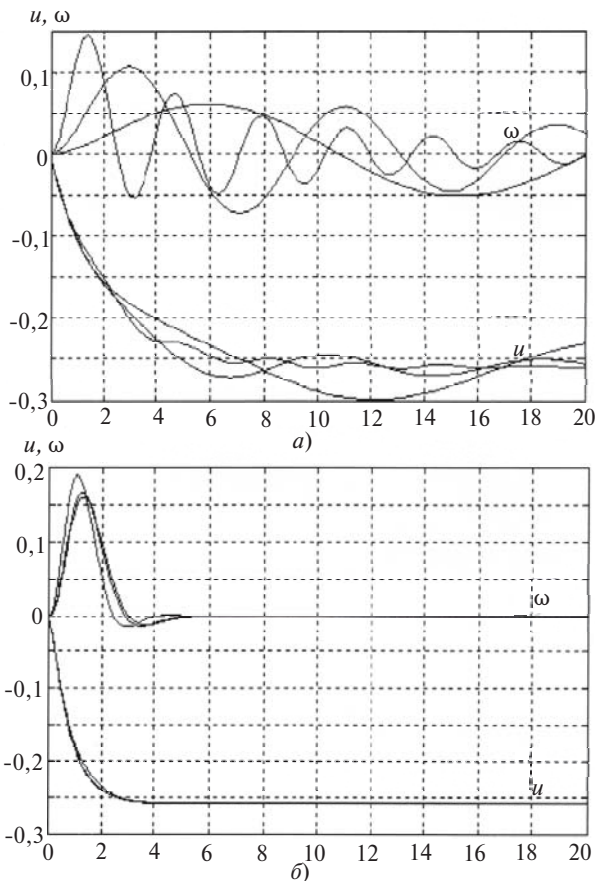


Рис. 3

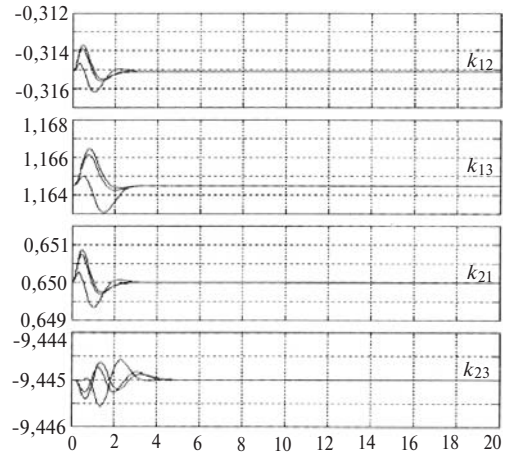


Рис. 4

хронного генератора без адаптации, рис. 3,б – с адаптацией; на рис. 4 – динамика элементов k_{ij} матрицы настраиваемых параметров. Результаты моделирования показывают, что переходные характеристики СГ с адаптацией (время переходного процесса 3,5–4,5 с) на рис. 3 локализованы в достаточно узкой окрестности кривых, что намного лучше переходных характеристик СГ без адаптации. Кривые на рис.4 отражают процессы перестройки параметров в темпе переходных процессов СГ и интересны только в плане сохранения своих значений после адаптации.

Вывод. В отличие от инерционных градиентных алгоритмов, предложенный алгоритм обладает экспоненциальной (диссипативной) сходимостью, а следовательно «грубостью» и является безынерционным, поскольку синтезирован в виде алгебраического уравнения. Моделированием подтверждена достаточная «грубость» адаптивного алгоритма как способность алгоритма «собирать» в узкую окрестность кривые переходных процессов по напряжению и частоте при значительных изменениях параметров синхронного генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. – М.: Энергия, 1980, 569 с.
2. Юрганов А.А., Кожевников В.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов. СПб: Наука, 1996, 183с.
3. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. –Л.: Энергоатомиздат, 1984, 216 с.
4. Синецын А.С., Кузьменко А.А. Использование принципа интегральной адаптации для повышения устойчивости системы возбуждения синхронного генератора. – Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности», 2013, вып. № 3 (49), с. 1–8: <http://ipb.mos.ru/ttb>
5. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерации электроэнергии. –М.: Изд. дом МЭИ, 2011, 280 с.
6. Борцов Ю.А., Бурмистров А.А., Логинов А.Г., Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Хляжков В.А. Робастные регуляторы систем возбуждения мощных синхронных генераторов. –Электричество, 2003, № 7, с. 29–36.

7. Патент № 2195764 (РФ). Устройство регулирования возбуждения синхронного генератора / Ю.А.Борцов, А.А.Бурмистров, А.Г.Логинов, Н.Д.Поляхов, И.А.Приходько. — БИ, 2002, № 36.

8. Борцов Ю.А., Юрганов А.А., Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Соколов П.В. Исследование нечетких стабилизаторов возбуждения синхронного генератора. — Электричество, 1999, № 8, с. 50–55.

9. Борцов Ю.А., Юрганов А.А., Приходько И.А., Кожевников В.А. Экспериментальное исследование нечеткого стабилизатора возбуждения синхронного генератора. — Электротехника, 1999, № 3, с.1–5.

10. Приходько И.А. Нечеткие структуры систем возбуждения синхронного генератора. — Электричество, 2002, № 2, с. 46–50.

11. Агамалов О.Н. Моделирование переходных процессов системы возбуждения турбогенератора АЭС средствами нейрон-нечеткой идентификации. — Энергетика, 2008, №4, с. 79–92.

Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 11, pp. 47–53.

12. Кунцевич В.М., Лычек М.М. Синтез систем автоматического управления с помощью функций Ляпунова. — М.: Наука, 1977, 400 с.

13. Кожекова Г.А. Расчет адаптивной системы управления для синхронного генератора. — Изв. КГТУ им. И. Раззакова, 2010, № 21, с. 158–162.

14. Shamsollahi P., Malik O.P. An adaptive power system stabilizer using on-line trained neural network. — IEEE Transaction on energy conversion, 1997, vol. 12, №4, pp. 382–387.

15. Zhang Y., Malic O.P., Hope G.S., Chen G.P. Application of an inverse input/output mapped ANN as a power system stabilizer. — IEEE Trans. on energy conversion, September 1994, vol. 9, № 3, pp.433–439.

16. Min L.C., Qing L. An enhanced adaptive neural network control scheme for power systems. — IEEE Trans. on energy conversion, June 1997, vol.12, No. 2, pp. 166–174.

[03.07.14]

Adaptive Control of a Synchronous Generator Based on an Inertia-Free Parametric Algorithm

N.D. POLYAKHOV and HA AN TUAN

The existing methods for exciting synchronous generators are based on constructing systems with a controlled plant having constant parameters. In reality, the plant parameters und ergoessential changes indifferent mode sof operation, e.g., those typical for power generation and consumtion. In the linearized model of a synchronous generator, achangein the signofone of the parameters is observed even in the power consumption mode. For automatic excitation controllers (AECs) with interconnected loops, the systems are tuned by an experienced operator; the tuning procedure may be quite complicated and may take much time. Asaresult, asinglecompromisetuningof the AEC is setup, whichis far from being the optimal one for all modes of machine operation. The article present sanew algorithm for control of asynchronous generator on the basis of inertia-free parametric adaptation. In synthesizing the algorithm, the method of Lyapunov functions is used. The algorithm, which is obtainedinalge braic form, has exponential stability of adaptive processes and is robust to a significant uncertainty of the controlled plant (it adapts to five-fold decrease and increase of the parameters) and to additive disturbances (the electromagnetic torque). The performed modeling of anadaptives ynchronous generator in the MATLAB/Simulink environmentshows stability (almost identity) of the patterns of the main frequency and voltage transients. The algorithm does not requirepre liminary investigationandaftercarrying out some straightforward calculations becomes almost ready for practical use or application.

Key words: synchronous generator, excitation system, adaptive control, Lyapunov functions, parametric adaptation

REFERENCES

1. Anderson P., Fuad A. *Upravleniye energosistemami i ustoichivost'* (Controlling of power systems and stability). Moscow, Publ. «Energiya», 1980, 569 p.

2. Yurganov A.A., Kozhevnikov V.A. *Regulirovaniye vozvuzhdeniya sinkhronnykh generatorov* (Field control of synchronous generators). St. Petersburg. Publ. «Nauka», 1996, 183 p.

3. Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. *Elektromekhanicheskiye sistemy s adaptivnym i modal'nyim upravleniyem* (Electromechanical systems with adaptive and model control). Leningrad, Publ. «Energoatomizdat», 1984, 216 p.

4. Sinitsin A.S., Kuz'menko A.A. *Internet-zhuznal «Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti» (Internet Journal «Technologies of Technospheric Safety»):* <http://ipb.mos.ru/ttb>, 2013, iss. 3(49), pp. 1–8.

5. Kolesnikov A.A., Veselov G.E., Kuz'menko A.A. *Novyye tekhnologii proektirovaniya sovremennykh system upravleniya protsessami generatsii elektroenergii* (New Technologies for Designing Modern Systems for Control of Electric Power Generation

Processes). Izdat. Dom MEI (Moscow. Publ. house of the Moscow Power Engineering Institute), 2011, 280 p.

6. Bortsov Yu.A., Burmistrov A.A., Loginov A.G. Polyakhov N.D., Prikhod'ko I.A., Khlyamkov V.A. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2003, No. 7, pp. 29–36.

7. Патент No. 2195764 (RF). *Ustroistvo regulirovaniya vozvuzhdeniya sinkhronnogo generatora* (Field control device synchronous generator)/Yu.A. Bortsov, A.A. Burmistrov, A.G. Loginov, N.D. Polyakhov, I.A. Prikhod'ko. Bulletin, 2002, No. 36.

8. Bortsov Yu.A., Yurganov A.A., Polyakhov N.D., Prikhod'ko I.A., Sokolov P.V. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1999, No. 8, pp. 50–55.

9. Bortsov Yu.A., Yurganov A.A., Prikhod'ko I.A. Kozhevnikov V.A. *Elektrotehnika (Electrical Engineering)*, 1999, No. 3, pp. 1–5.

10. Prikhod'ko I.A. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2002, No. 2, pp. 46–50.

11. Agamalov O.N. *Energetika (Power Engineering)*, 2008, No. 4, pp. 79–92.

12. **Kuntsevich V.M., Kychak M.M.** *Sintez system avtomaticheskogo upravleniya s pomoshch'yu funktsii Lyapunova* (Synthesis of automatic control systems via Lyapunov functions). Moscow. Publ. «Nauka», 1977, 400 p.

13. **Kozhekova G.A.** *Raschet adaptivnoi sistemy upravleniya dlya sinkhronnogo generatora* (Calculating of adaptive system control for synchronous generator). *Izv. Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* (News of the Kaliningrad State Technical University), 2010, No. 21, pp. 158–162.

14. **Shamsollahi P., Malik O.P.** An adaptive power system stabilizer using on-line trained neural network. — *IEEE Transaction on energy conversion*, 1997, vol. 12, No. 4, pp. 382–387.

15. **Zhang Y., Malic O.P., Hope G.S., Chen G.P.** Application of an inverse input/output mapped ANN as a power system stabilizer. — *IEEE Trans. on energy conversion*, September 1994, vol.9, No. 3, pp. 433–439.

16. **Min L.C., Qing L.** An enhanced adaptive neural network control scheme for power systems. — *IEEE Trans. on energy conversion*, June 1997, vol.12, No. 2, pp. 166–174.

Авторы: Поляхов Николай Дмитриевич окон-

ский электротехнический институт «ЛЭТИ» в 1970

Authors: Polyakhov Nikolai Dmitriyewich (St. Petersburg, Russia) – Doctor Techn. Sci., Professor of the St. Petersburg State Power Engineering Institute «LETI».

Kha An' Tuan (Khanoi, V'yetnam) – Ph. D. Student in the Department of the St. Petersburg State Power Engineering Institute «LETI».

* * *

чил Ле-
нин-
град

*г. В 1987 г. защитил докторскую диссертацию. Про-
фессор
С*

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Подписка в России и странах СНГ принимается в отделениях связи.

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648

тел./факс: (495)362-7485

E-mail: etr1880@mail.ru;

l.s.kudinova@rambler.ru

Зарубежная подписка

на журнал «Электричество»

оформляется через фирмы-партнеры ЗАО «МК-Периодика» или непосредственно

в ЗАО «МК-Периодика» по адресу:

Россия, 111524 Москва, Электродная ул., 10, стр. 3

ЗАО «МК-Периодика»;

тел. (495) 672-70-12; факс (495) 306-37-57

E-mail: info@periodicals.ru

Internet: <http://www.periodicals.ru>

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC «МК-Periodica» in your country or to JSC «МК-Periodica» directly.

Address: Russia, 111524 Moscow; 10, str.3, Elektrodная ul.

JSC «МК-Periodica»

Tel.: (495) 672-70-12; fax (495) 306-37-57

E-mail: info@periodicals.ru

Internet: <http://www.periodicals.org>

а
д-

ан

кт-Петербургского государственного электротехнического университета (ЛЭПИ).

Ха Ань Туан окончил Технический институт им. Ле Куи Дон в 2005 г. Аспирант кафедры систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».