

Ха Ань Туан

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОЩНЫМ СИНХРОННЫМ
ГЕНЕРАТОРОМ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2014

Работа выполнена на кафедре систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель

Поляхов Николай Дмитриевич
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им.
В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ),
профессор кафедры систем автоматического
управления

Официальные оппоненты:

Бобцов Алексей Алексеевич
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет
информационных технологий,
механики и оптики, декан факультета
компьютерных технологий и управления

Логинов Александр Гаврилович
кандидат технических наук,
заместитель генерального конструктора –
директор по системам автоматизации
электрических машин ОАО "Силовые
Машины", Санкт-Петербург,

Ведущая организация

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Санкт-
Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(СПб ГУАП)"

Защита состоится « 21 » января 2015г. в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета на сайте СПб ГЭТУ www.eltech.ru

Автореферат разослан « 20 » ноября 2014 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета

Белов М.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В управлении техническими объектами существует много методов, среди которых адаптивное управление занимает лидирующее место. Адаптивные регуляторы применяются, чтобы повысить эффективность функционирования систем в различных условиях, например, при неопределенности информации о динамическом поведении сложных объектов, о внешней среде, при существовании хаотичности и других факторов. В технических системах с хаотическим поведением обычно характерны бифуркации, которые вызывают нежелательные качественные изменения динамики, и как следствие, неустойчивость системы.

Использование адаптивного управления обеспечивает устойчивость, грубость и ограничение области хаотичности технических систем, поэтому такой подход можно считать целесообразным. Однако, несмотря на успехи в этой области, остаются нерешенные вопросы, представляющие как теоретический, так и практический интерес. Это обстоятельство и послужило причиной выбора настоящей темы диссертации. Оно же подтверждает актуальность выбранной темы, заключающейся в обеспечении повышения качества управления мощным (т.е. работающим в энергосистеме) синхронным генератором, подверженному изменениям параметров (параметрическая неопределенность) и хаотичности (бифуркационные процессы) в определенных¹ режимах работы.

Целью диссертационной работы является разработка эффективных алгоритмов адаптивного управления параметрически неопределенными динамическими объектами с последующим применением для повышения качества динамики синхронного генератора.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи

1. Разработать эффективные алгоритмы адаптации для управления техническими объектами с ограниченной неопределенностью.
2. Провести на их основе построение адаптивных регуляторов и исследовать устойчивость и грубость.
3. Провести анализ условий возникновения бифуркации в модели синхронного генератора, описываемой системой обыкновенных дифференциальных уравнений.
4. Провести сравнительные исследования (моделирование в пакете Matlab/Simulink) качества адаптивных регуляторов для систем возбуждения мощного синхронного генератора.

Методы исследования. При решении поставленных задач используются: математический аппарат современной теории автоматического управления, методы

¹ Salam F. Chaos in the one generator system with excitation feedback // Proc. 22th IEEE Conf. on Decision and Control, San Antonio, Tex. 1983. V. 1. P. 360-364.

пространства состояний, теория хаотических систем, метод функций Ляпунова, основные положения адаптивного управления, методы математического моделирования, универсальный программный пакет MATLAB (Toolbox, Simulink).

Основные научные результаты, выносимые на защиту

1. Управляемая диссипативность адаптивного закона сигнального типа.
2. Синтез асимптотически устойчивого безынерционного алгоритма параметрической адаптации.
3. Адаптивная система возбуждения синхронного генератора с усиленной грубостью.

Новизна научных результатов

1. Управляемая диссипативность адаптивного закона сигнального типа, отличающаяся возможностью выбора размера области диссипативности в функции значения малого параметра инерционного фильтра.
2. Синтез асимптотически устойчивого безынерционного алгоритма параметрической адаптации, обеспечивающего:
 - асимптотическую сходимость процессов адаптации,
 - универсальность адаптивного алгоритма для управления конечномерными нестационарными и нелинейными, в том числе с хаотическими свойствами, динамическими объектами.
3. Адаптивная система возбуждения синхронного генератора с усиленной грубостью, обеспечивающая в режиме возникновения бифуркации сокращение размера хаотического аттрактора с возможностью полного подавления.

Научная и практическая ценность работы

1. Развитие теоретических вопросов в синтезе адаптивных регуляторов для управления техническими объектами с ограниченной неопределенностью, и прикладных вопросов в эффективном управлении мощными синхронными генераторами.
2. Подавление хаотичности, повышение грубости и надежности системы регулирования возбуждения синхронного генератора.
3. Предложенные адаптивные регуляторы для систем возбуждения синхронного генератора эффективны во всех режимных условиях и универсальны для синхронных генераторов и турбогенераторов.

Достоверность научных и практических результатов. Достоверность подтверждается корректным использованием методов исследований, применением современных компьютерных средств и программ расчетов, конкретными результатами компьютерного моделирования работы синхронного генератора для различных условий работы, не противоречащих опубликованным результатам, полученным другими авторами.

Реализация результатов работы. Практическая полезность подтверждается актом об использовании в учебном процессе СПбГЭТУ “ЛЭТИ”.

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на конференциях:

1. на международной научно-практической конференции «Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии» г. Тамбов, 28 июня 2013 г.

2. на VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, 7-9 октября 2014 года, г. Саранск.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из них 4 статьи и 2 работы в материалах международных и межрегиональных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 116 с., в том числе 113 с. основного текста, 42 рисунка, 6 таблиц, список литературы из 95 наименований и приложение на 3 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определён круг решаемых задач, дана краткая характеристика работы.

В первой главе приведены основные модели синхронного генератора (СГ), используемые для решения задач управления и основные подходы при построении систем возбуждения СГ. Рассмотрены также основные методы синтеза регуляторов систем возбуждения, которые обеспечивают устойчивость и грубость работы синхронных генераторов в энергосистеме. В качестве основного подхода предложено адаптивное управление для синтеза регуляторов систем возбуждения синхронных генераторов. Обоснованы структуры адаптивных систем с эталонной и настраиваемой моделями и приведены их сравнительные оценки. Метод функций Ляпунова принят в качестве базового метода для синтеза адаптивного регулятора.

Схема включения мощного синхронного генератора в энергосистему представлена на рис.1, где U_G , U_C – напряжения синхронного генератора и сети (шина «бесконечной» мощности), X_l – индуктивное сопротивление линии

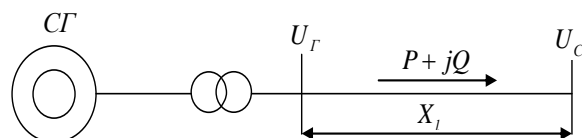


Рис. 1

передачи. В реальности нагрузка энергосистемы значительно изменяется и может вызвать потерю устойчивости. Стандартный автоматический регулятор возбуждения (АРВ), построенный на пропорционально-дифференциальных связях, не обеспечивает постоянство времени регулирования и формы динамических процессов СГ. Поэтому основной задачей является повышение качества функционирования СГ в различных схемно-режимных условиях методами адаптивного управления.

Во второй главе представлен обзор реализации адаптивных регуляторов на основе синтеза алгоритмов настройки параметрического и сигнального типов. Проведено доказательство устойчивости (диссипативность) алгоритма адаптации сигнального типа и синтез системы управления с безынерционным алгоритмом параметрической адаптации, обеспечивающей асимптотическую (экспоненциальную) сходимости процессов адаптации. Безынерционные

сигнальные и параметрические алгоритмы имеют конструктивный характер и практически реализуемы.

Схема адаптивной системы управления техническими объектами с настраиваемой моделью представлена на рис. 2.

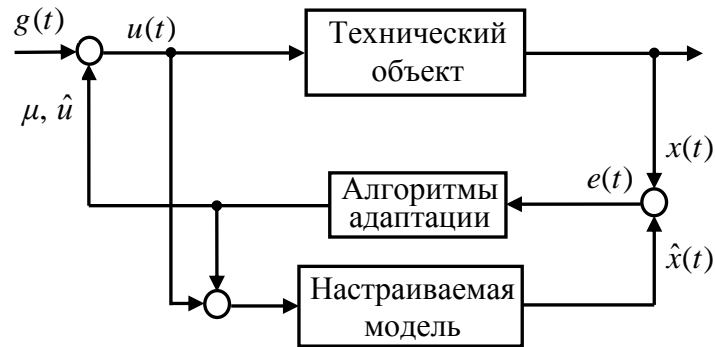


Рис. 2

Алгоритм сигнальной адаптации. Управляемый объект задается в виде

$$\dot{x} = Ax + Bu + \eta = A_0x + B_0u + (A - A_0)x + (B - B_0)u + \eta, \quad (1)$$

где $x = x(t)$ – n -мерный вектор состояния; $u = u(t)$ – m -мерный вектор управления, $m \leq n$; $\eta = \eta(t)$ – ограниченная функция возмущений; A, B – матрицы с ограниченными элементами и в общем случае, зависящие от x, u, t ; A_0, B_0 является результатом линеаризации матриц A, B в режимной точке. Все размерности согласованы.

Из уравнения (1) получаем уравнение

$$\dot{x} = A_0x + B_0u + \sigma + \eta, \quad (2)$$

где $\sigma = (A - A_0)x + (B - B_0)u$.

При управлении объектом (1) принят идентификационный подход в синтезе закона адаптивного управления на основе схемы с настраиваемой моделью.

Уравнение настраиваемой модели имеет вид

$$\dot{\hat{x}} = A_0\hat{x} + B_0u + G(x - \hat{x}) + z, \quad (3)$$

где $\hat{x}(t)$ – n -мерный вектор состояния настраиваемой модели, матрица G – выбирается из условия гурвицевости матрицы $A_H = (A_0 - G)$, поскольку может содержать собственные значения с положительной вещественной частью, $z = z(t)$ – адаптивный сигнал.

Введем ошибку $e(t)$, $e = \hat{x} - x$ (пока примем $\eta = 0$), тогда из выражений (2) и (3) получим дифференциальное уравнение вида

$$\dot{e} = A_H e + (z - \sigma) \quad (4)$$

Выберем квадратичную функцию Ляпунова в виде $V_p = e^T P e$, где постоянная матрица $P = P^T > 0$ и является решением матричного уравнения Ляпунова:

$$A_H^T P + P A_H = -Q, \quad Q = Q^T > 0 \text{ является заданной.}$$

Тогда

$$\dot{V}_p = -V_Q + 2e^T P(z - \sigma), \quad V_Q = e^T Q e. \quad (5)$$

Закон управления $z = z(t)$ выбирается из условия максимальной скорости убывания функции Ляпунова в виде $z = -h \operatorname{sgn} B_0^T P e$.

В правой части дифференциального уравнения (5) для асимптотической устойчивости должно быть выполнено условие $2e^T P(z - \sigma) \leq 0$, которое обеспечивается при $t \rightarrow \infty$, если $z(t) = \sigma(t)$. Однако такое невозможно, так как функция $z(t)$ имеет разрывный характер и для использования в построении адаптивного закона следует применить малоинерционный фильтр с описанием

$$\tau \dot{\hat{\sigma}} + \hat{\sigma} = z, \quad (6)$$

где $\hat{\sigma}$ - непрерывная функция, являющаяся оценкой для $\sigma(t)$, τ - достаточная малая величина.

Пусть $\tilde{e} = \sigma - \hat{\sigma}$. Из выражения (6) получаем:

$$\dot{\tilde{e}} = \dot{\sigma} - \frac{1}{\tau} \tilde{e}. \quad (7)$$

Примем $u = g + \mu$, где $\mu(t)$ - адаптивный закон управления, $g = g(t)$ - внешнее воздействие. Тогда уравнение системы (1) примет вид

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 g + B_0 \mu + \sigma$$

При выполнении условия согласованности $B_0^+ B_0 \mu = \mu$, имеем $\mu = -B_0^+ \sigma$. Оценим влияние введенного фильтра на устойчивость адаптивной системы. Введем функцию Ляпунова $V_p(\tilde{e}) = \tilde{e}^T \tilde{e}$, полная производная по времени которой в силу (7) равна

$$\dot{V}_p(\tilde{e}) = -\frac{2}{\tau} \tilde{e}^T \tilde{e} + 2\tilde{e}^T \dot{\sigma}.$$

Используя известную подстановку $V_p(\tilde{e}) = \rho^2$, получаем

$$\dot{\rho} = -\frac{1}{\tau} \rho + \dot{\sigma}. \quad (8)$$

Решение уравнения (8) имеет вид $\rho(t) = e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}} \rho(t_0) + e^{-\frac{t}{\tau}} \int_{t_0}^t e^{\frac{\delta}{\tau}} \dot{\sigma} d\delta$.

Переходя к оценке $\sup_{x,t} \|\dot{\sigma}\| \leq M$, $M = \text{const}$, получаем, при $t \rightarrow \infty$, $\rho(t) = \tilde{e} \leq \tau M$.

Полученная оценка по влиянию малоинерционного фильтра, указывает на диссипативную (экспоненциального типа) устойчивость, причем размер предельного множества регламентируется выбором значения самого параметра τ .

I Научный результат

Теорема 1. Пусть существуют параметры h , $h \geq \|B^+\| \|\sigma\|$ и $\tau > 0$.

Тогда алгоритм $z = -h \operatorname{sgn} B_0^T P e$ с фильтром $\tau \dot{\hat{\sigma}} + \hat{\sigma} = z$ обеспечивает адаптивность системы (2) при ограниченной неопределенности и регламентируемую параметром τ диссипативность процессов адаптации.

Алгоритм безынерционной параметрической адаптации. Объект управления задан в виде

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \eta(t), \quad (9)$$

где все обозначения такие же, как в уравнении (1); у матрицы $B = \{b_{ij}\}_{n \times m}$ все элементы точно известны, а элементы матрицы $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$ имеют параметрическую (интервальную) неопределенность в области Θ : $\Theta = \{\theta \in R^l : |a_{ij} - a_{ij}^*| \leq \theta_{ij}, i = \overline{1, n}\}$, a_{ij}^* – номинальные значения, $t \in [t_0, \infty]$.

Уравнение настраиваемой модели аналогично (3) и имеет вид

$$\dot{\hat{x}}(t) = A_0 \hat{x}(t) + B_0(u - \hat{u}), \quad (10)$$

где $u = \hat{u} + g$; $\hat{u}(t)$ – m -мерный вектор сигналов адаптации модели, со стационарной правой частью, соответствующей желаемой динамике.

Введем ошибку $e_i(t) = x_i(t) - \hat{x}_i(t)$, $i = \overline{1, n}$.

Из уравнений (9), (10) после несложных преобразований получаем дифференциальное уравнение ошибки

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + B\hat{u}(t) + \hat{\delta}(t) + \eta(t), \quad e(t_0) = e_0 \quad (11)$$

где $\hat{\delta}(t) = [(A - A_0)\hat{x}(t) + (B - B_0)g(t)]$, $g(t)$ – входной сигнал.

Здесь пока также $\eta(t) = 0$. Из уравнения (11) следует уравнение адаптивного регулятора

$$B\hat{u}(t) = \dot{e}(t) - Ae(t) - \delta(t). \quad (12)$$

Уравнение (9) представим в виде

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + B_0 g(t) + \delta(t) + B\hat{u}(t), \quad (13)$$

где $\delta(t) = [(A - A_0)x(t) + (B - B_0)g(t)]$.

На основе уравнений (12), (13), а также с учетом того, что $x \rightarrow \hat{x}$ и $\tilde{\delta}(t) \rightarrow \delta(t)$, при $t \rightarrow \infty$, получаем уравнение (9) в виде

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + B_0 g(t)$$

как результат действия адаптивного регулятора (12).

Рассмотрим уравнение

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + B\hat{u}(t) \quad (14)$$

Закон адаптации $\hat{u}(t)$ ищется таким, чтобы обеспечить асимптотическую устойчивость решения уравнения (14).

Пусть структура регулятора задается в форме линейной обратной связи

$$\hat{u}(t) = Ke(t), \quad (15)$$

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

Уравнение ошибки (14) тогда примет вид

$$\dot{e}(t) = \Gamma(t)e(t), \quad (16)$$

где $\Gamma(t) = (A + BK)$.

Закон настройки элементов матрицы настраиваемых параметров $K(t)$ должен обеспечивать асимптотическую устойчивость решения уравнения (14) с интервально неопределенной матрицей A .

Пусть функция Ляпунова выбрана как $J(t) = 0,5e^T(t)e(t)$.

Ее полная производная по времени имеет вид $\dot{J}(t) = dJ / dt = e^T(t)\dot{e}(t)$.

Для обеспечения асимптотической устойчивости системы (14) достаточно, чтобы $\dot{J}(t) = \Psi(t) < 0$.

С учетом уравнения (16) имеет место

$$\Psi(t) = e^T(t)\dot{e}(t) = e^T(t)\Gamma(t)e(t) = \sum_{i=1}^n e_{ii}^2 \gamma_{ii} + \sum_{i,j=1}^n \gamma_{ij} e_i e_j, \quad i \neq j.$$

$$\text{Обозначим: } \Psi_1(t) = \sum_{i=1}^n \gamma_{ii} e_{ii}^2 \quad \text{и} \quad \Psi_2(t) = \sum_{i,j=1}^n \gamma_{ij} e_i e_j, \quad i \neq j.$$

Лемма. *Существуют постоянные параметры $\gamma_{ii} < 0$ и функция $\gamma_{ij}(t) = \alpha_{ij}^{-1} e_i(t) e_j(t)$, $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$, при которых условие $\Psi(t) < 0$ выполняется.*

Действительно, примем диагональные элементы матрицы $\Gamma(t) = \{\gamma_{ij}\}_{n \times n}$ постоянными и отрицательными, т. е. $\gamma_{ii} < 0$, тогда $\Psi_1(t) < 0, i = \overline{1, n}$.

Теперь, найдем условия для выполнения неравенства $\Psi_2(t) < 0$.

Используем подстановку $\gamma_{ij}(t) = \alpha_{ij}^{-1} e_i(t) e_j(t)$, $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$. Тогда

$$\Psi_2(t) = \sum_{i,j=1}^n \gamma_{ij} e_i e_j(t) = \sum_{i,j=1}^n \alpha_{ij} \gamma_{ij}^2(t), \quad i \neq j. \quad (17)$$

При выборе $\alpha_{ij} < 0$, $i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$, $\Psi_2(t) < 0$.

Из выражения $\Gamma(t) = A + BK(t)$ получаем матрицу настраиваемых параметров $K(t)$, которая, в случае $n = m$ и неособенности матрицы B , имеет вид $K(t) = B^{-1}(\Gamma - A)$ а при $n \neq m$ – в виде $K(t) = B^+(\Gamma - A)$, где $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ – псевдоинверсия к B ;

Так как матрица A в уравнении (9) имеет параметрическую неопределенность, для вычисления матрицы $K(t)$ используются “номинальные” значения θ_i^* .

II Научный результат

Теорема 2. Система $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ обладает асимптотической устойчивостью с законом безынерционной параметрической адаптации $\hat{u}(t) = Ke(t)$, $K(t) = B^{-1}(\Gamma - A)$ или $K(t) = B^+(\Gamma - A)$, где $\Gamma = \{\gamma_{ij}\}_{n \times n}$, $\gamma_{ij} = \alpha_{ij}^{-1} e_i e_j$, $\alpha_{ij} < 0$ при $i \neq j$, и $\gamma_{ij} < 0$ при $i = j$.

² Кожекова Г. А. Расчет адаптивной системы управления для синхронного генератора. Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2010, – № 21 – С. 158-162.

В третьей главе рассмотрена устойчивость адаптивных регуляторов при возникновении бифуркации. Установлено существование бифуркации³ (бифуркационного значения управляющего параметра) в модели синхронного генератора. Приведен также другой, неадаптивный (нечеткий) подход в регламентировании размера хаотических аттракторов.

Синхронный генератор, работающий в энергосистеме, можно представить системой дифференциальных уравнений 7-го порядка следующего вида:

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \omega, \\ \tau\dot{\omega} &= -D\omega + M_M - \frac{1}{(X_l + X_d')} [E_q \sin \delta + E_d \cos \delta], \\ \dot{E}_d &= -\frac{1}{\tau_q} \left(1 + \frac{X_d - X_d'}{X_l + X_d'} \right) E_d + \frac{1}{\tau_q} \left(\frac{X_d - X_d'}{X_l + X_d'} \right) \sin \delta, \\ \dot{E}_q &= -\frac{1}{\tau_d} \left(1 + \frac{X_d - X_d'}{X_l + X_d'} \right) E_q + \frac{1}{\tau_d} E_f + \frac{1}{\tau_d} \left(\frac{X_d - X_d'}{X_l + X_d'} \right) \cos \delta, \\ \dot{E}_f &= -\frac{k_e}{\tau_e} \left(E_f - \frac{1}{k_e} U_R \right), \\ \dot{U}_D &= -\frac{1}{\tau_f} \left(U_D + \frac{k_f}{\tau_e} (k_e E_{fd} - U_R) \right), \\ \dot{U}_R &= -\frac{1}{\tau_a} U_R + \frac{k_a}{\tau_a} (U_0 - U_D - U_I).\end{aligned}$$

В уравнениях втором, шестом и седьмом системы имеются малые постоянные времени, отражающие быструю динамику СГ τ_q, τ_f, τ_a . Поэтому при рассмотрении медленной динамики можно ими пренебречь и тогда получаем упрощенную систему уравнений 4-го порядка

$$\begin{aligned}\dot{\delta} &= \omega, \\ \dot{\omega} &= -\frac{D\omega}{T_j} + \frac{2M_M}{T_j} + \frac{\beta}{T_j(X_l + X_d')} \sin \delta - \frac{2}{T_j(X_l + X_d')} E_q \sin \frac{\delta}{2}, \\ \dot{E}_q &= -\frac{1}{\tau_d} \left(1 + \frac{X_d - X_d'}{X_l + X_d'} \right) E_q + \frac{1}{\tau_d} E_f + \frac{1}{\tau_d} \left(\frac{X_d - X_d'}{X_l + X_d'} \right) \cos \frac{\delta}{2}, \\ \dot{E}_f &= \frac{k_e}{\tau_e} \left(-1 + \frac{k_a k_f}{\tau_e + k_a k_f} \right) E_f + \frac{k_a}{\tau_e + k_a k_f} U_0 - \frac{k_a}{\tau_e + k_a k_f} U_I, \\ U_I &= \left[\left(\alpha \cos \delta + (1 - \alpha) E_q \right)^2 + \left(\alpha + (1 - \alpha) \beta \right)^2 \sin^2 \delta \right]^{1/2}, \quad \alpha = \frac{X_d'}{X_l + X_d'}, \quad \beta = \frac{X_d - X_d'}{X_l + X_d'},\end{aligned}$$

³ E. Abed, N.Tsolas and P. Varaiya, " Study of Non - Linear Oscillations due to Exciter Control Using Hopf Bifurcation ", in Proc. of IEEE 1983 International Symposium on Circuits and Systems, Vol. 3, May 1983, pp. 1410-1413.

где U_i – сигнал обратной связи по напряжению СГ; U_0 – уставка по напряжению, δ , ω , E_q , E_f – угол нагрузки, угловая скорость, э.д.с. по поперечной оси, э.д.с. возбuditеля; D , M_M – коэффициент демпфирования и механический момент, X_d , X_d' – индуктивное сопротивление и переходное индуктивное сопротивление по продольной оси; X_l – индуктивное сопротивление линии передачи; k_a , k_e , k_f – коэффициенты усиления регулятора, возбuditеля и стабилизирующей цепи по производной E_f регулятора; T_j – постоянная инерции ротора; τ_e , τ_d , τ_q – постоянные времени, возбuditеля, статора по продольной и поперечной осям; τ_f , τ_a – постоянная времени стабилизирующей цепи регулятора по производной E_f и постоянная времени усилителя в регуляторе, U_R , U_D – напряжения регулятора и обратной связи по производной E_f .

В качестве модели исследования бифуркаций используется система уравнений 4-го порядка. Так как упрощенная модель является системой дифференциальных уравнений выше третьего порядка и в правых частях присутствуют нелинейности, то необходимое условие существования бифуркации в модели СГ выполняется, другими словами, возможно существование бифуркационного значения управляющего параметра k_f^* в виде варьруемого параметра k_f .

Для моделирования процессов бифуркации значения параметров СГ⁴:

$T_j = 6,5c$, $\tau_d = 4c$, $\tau_e = 0,5c$, $k_e = 0,05$, $D = 0,5c^{-1}$, $M_M = 0,85Hm$, $k_a = 50$, $X_d' = 0,26$, $X_l = 0,46$, $X_d = 1,7$, $X_q' = 0,26$, $X_q = 1,7$ и настраиваемой модели по параметрам, взятыми из модели СГ.

На рис. 3 представлен вид бифуркационного процесса в синхронном генераторе в фазовом пространстве «угол нагрузки (δ) - частота (ω)» – бифуркации рождения цикла. Точка (Б) на рисунке 3 называется бифуркационной точкой, при этом значение $k_f \cong 0,053$ – бифуркационное значение. С целью демонстрации эффективности безынерционного параметрического алгоритма в борьбе с бифуркационными процессами (хаотичностью) проведено моделирование в среде Matlab/Simulink.

$\Delta\omega(o.e.)$

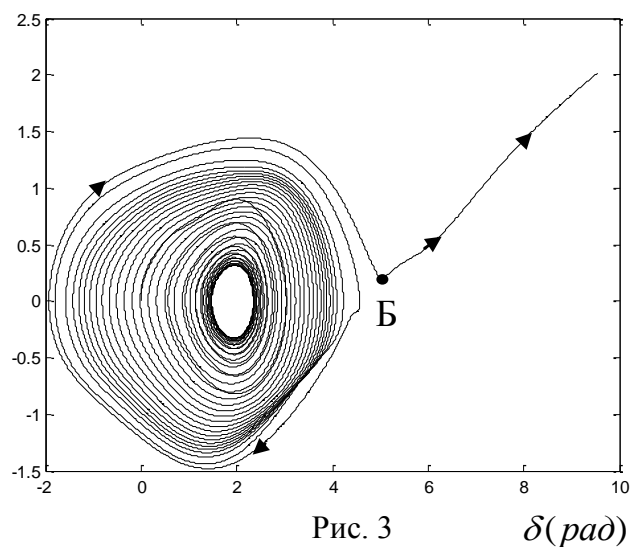
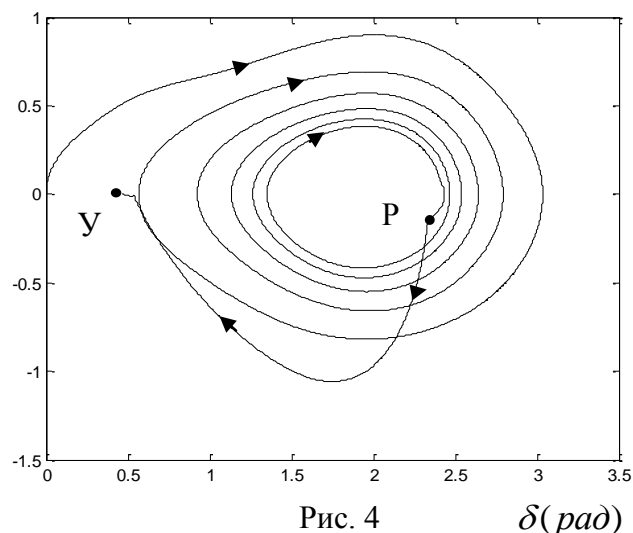


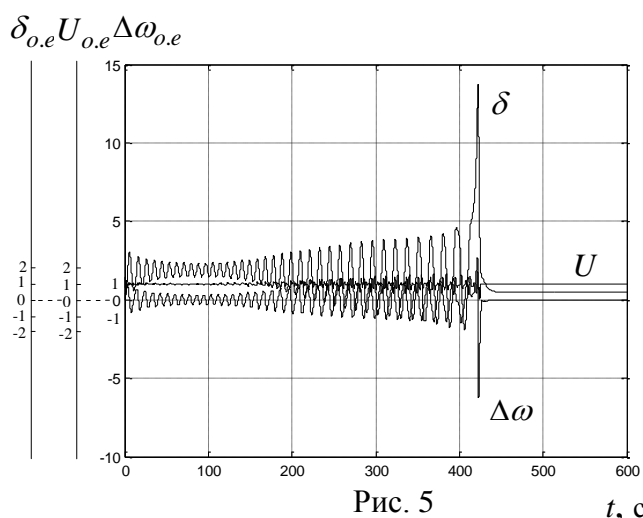
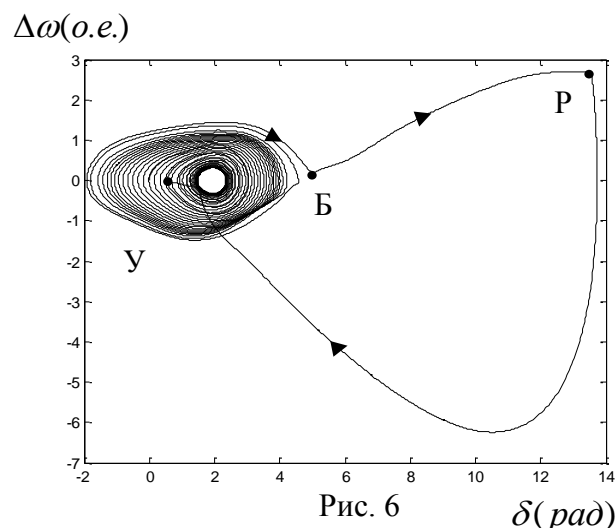
Рис. 3 $\delta(\text{rad})$

⁴ Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость. - М: Энергия, 1980.- 569 с.

Если адаптивный регулятор подключается к СГ (точка Р) до момента возникновения бифуркации, то через малое время СГ приводится к устойчивому режиму, при этом фазовая траектория стремится к устойчивой точке (У) для любых значений k_f (рис. 4).

Рис. 4 $\delta(\text{рад})$

Для уже существующего бифуркационного режима СГ (точка Б) получаем аналогичный результат, когда после подключения адаптивного регулятора (точка Р), бифуркационный режим исчезает и траектория приходит в точку равновесия (точка У), рис. 5, 6 (рис. 5 – переходные процессы и рис. 6 – фазовая траектория).

Рис. 5 $t, \text{с}$ Рис. 6 $\delta(\text{рад})$

Вывод

Адаптивный регулятор на основе алгоритма безынерционной параметрической адаптации эффективно подавляет бифуркационные процессы (хаотичность) в синхронных генераторах.

В четвертой главе приведен синтез систем возбуждения синхронного генератора с алгоритмами безынерционной адаптации сигнального и параметрического типов. Выполнено моделирование работы синхронного генератора в сравнении переходных характеристик при работе со стандартным и адаптивным регуляторами.

Результаты исследования безынерционного алгоритма сигнального типа. Линеаризованная система уравнений синхронного генератора ТГВ-300 МВт имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\alpha_1 x_2 - \alpha_3 x_1 - \alpha_4 x_3, \\ \dot{x}_3 &= -\alpha_2 x_3 + \alpha_5 x_2 + \beta_5 i_f, \\ \Delta U &= -\beta_1 x_1 + \beta_2 x_3, \\ \Delta f_u &= (\beta_3 + \beta_4 \alpha_5) x_2 - \beta_4 \alpha_2 x_3 + \beta_4 \beta_5 i_f, \end{aligned}$$

где x_1, x_2, x_3 – переменные отклонения угла нагрузки $\Delta\delta$, отклонения частоты $\Delta\omega$, э.д.с. по поперечной оси ΔE_q ; $U = U_r$ – напряжение СГ; Δf_u – отклонение частоты напряжения и i_f – ток возбуждения синхронного генератора. Значения коэффициентов α_i, β_j ($i, j = 1 \div 5$) для номинального режима (НР), недо возбуждения (РН) и перевозбуждения (РП) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
	0,019	0,512	-16,94	8,9	0,8	0,15	0,003	0,004	0,066	0,512
	\div 0,45	\div 0,706	\div 21,98	\div 28,7	\div 2,77	\div 0,38	\div 0,2	\div 0,967	\div 0,214	\div 0,706
НР	0,249	0,513	13,98	21,23	1,9	0,308	0,142	0,275	0,159	0,513
РН	0,45	0,513	-10,36	11,5	2,546	0,302	0,01	0,014	0,213	0,513
РП	0,064	0,513	12	10,74	0,961	0,308	0,197	0,756	0,08	0,513

Уравнения настраиваемой модели точно совпадают с уравнениями СГ со значениями коэффициентов для номинального режима, но в правой части третьего уравнения добавляется сигнал адаптации z с алгоритмом

$$z = -h \operatorname{sgn} B_0^T P e = -50 \operatorname{sgn}(2e_1 - 0,15e_2 - 0,0237e_3),$$

где $e_1 = (\Delta \hat{U} - \Delta U)$, $e_2 = (\Delta \hat{f}_u - \Delta f_u)$, $e_3 = (\Delta \hat{\omega} - \Delta \omega)$.

Адаптивная функция осуществляется с помощью компенсационной цепи с малоинерционным фильтром, имеющим передаточную функцию $W_\phi = (1/0,002s + 1)$. Схема моделирования СГ с стандартным АРВ и адаптивным регулятором в среде Matlab/Simulink представлена на рис 7.

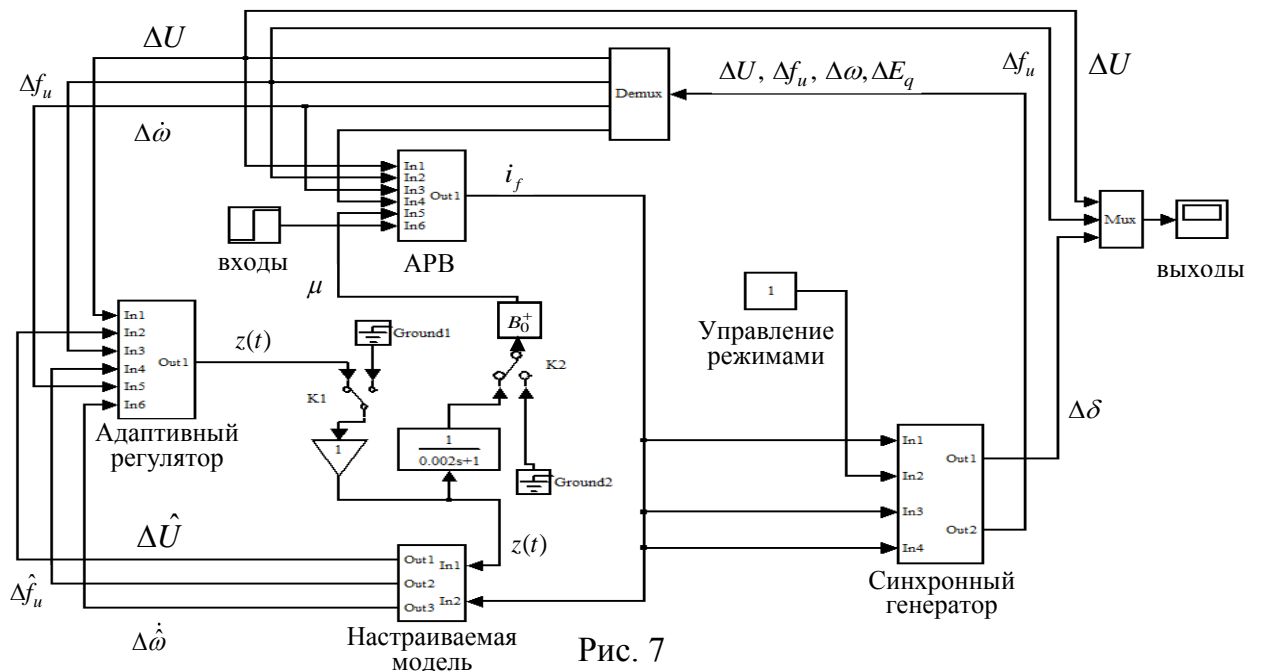


Рис. 7

Результаты моделирования СГ представлены на рис 8, 9, где переходные характеристики СГ без адаптера представлены на рис 8, а переходные характеристики СГ после подключения адаптивного регулятора представлены на рис 9, где кривые 1, 2, 3 соответствуют переходным характеристикам СГ в номинальном режиме, в режиме недо возбуждения и в режиме перевозбуждения. Эффективность адаптивного регулятора подтверждается *значительным сужением разброса временного интервала переходных процессов и стабилизацией их форм* для СГ в трех режимов. Сравнение времени переходных характеристик СГ без адаптивного регулятора и с адаптивным регулятором представлено в табл. 3.

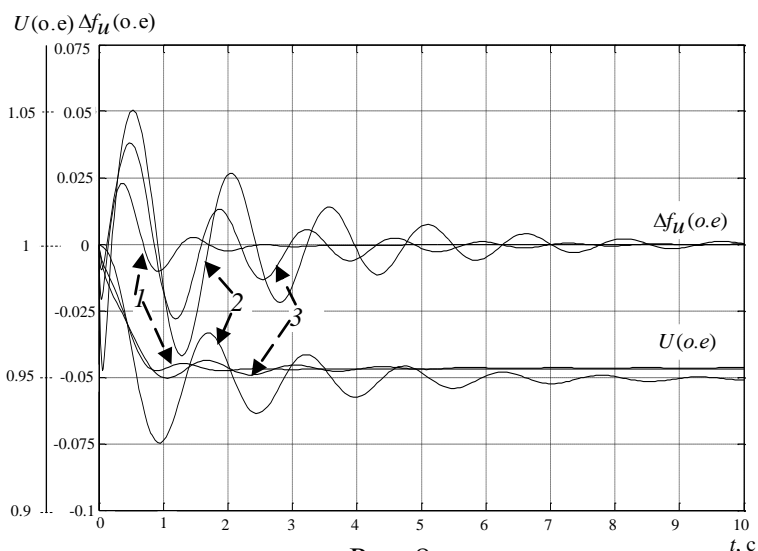


Рис. 8

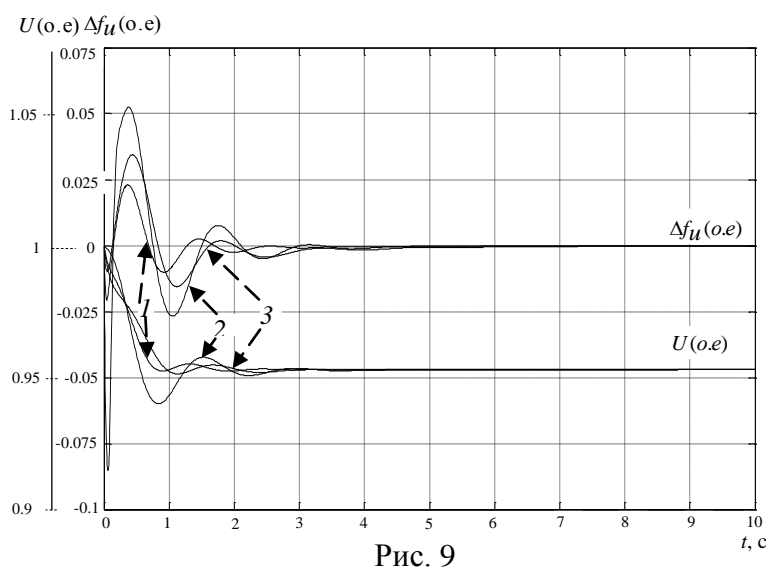


Рис. 9

Таблица 3

Режим работы СГ	Время переходного процесса, с					
	ΔU		Δf_u		$\Delta \delta$	
	без адаптации	с адаптацией	без адаптации	с адаптацией	без адаптации	с адаптацией
РН	8,5	2,4	9,5	3	9,5	3
НР	2	2	2,5	2,5	3	3
РП	3,5	2,2	7	3	8	3

Из результатов моделирования видно, что переходные характеристики СГ с адаптацией имеют разброс в интервале (2 – 3)с, разброс переходных характеристик системы без адаптации достигает (2 – 9,5)с. Данные результаты подтвердили, что адаптивный регулятор хорошо стабилизирует формы процессов при изменении режима работы сети, уменьшая перерегулирование и время регулирования напряжения и отклонения частоты по сравнению со стандартными настройками.

Результаты исследования безынерционного параметрического алгоритма. Эквивалентные уравнения синхронного генератора (полученные на основе уравнений, см. сноску 2) имеют вид:

$$\Delta \dot{U}(t) = -\frac{1}{k_3 \tau_d} \Delta U(t) + k_5 \Delta \omega(t) + \left(\frac{k_5}{k_3 \tau_d} - \frac{k_6 k_4}{\tau_d} \right) \Delta \delta(t) + \frac{k_6}{\tau_d} \Delta E_{fd}(t),$$

$$\Delta \dot{\omega}(t) = -\frac{k_2}{k_6 T_j} \Delta U(t) + \left(\frac{k_2 k_5}{k_6 \tau_j} - \frac{k_1}{T_j} \right) \Delta \delta(t) + \frac{1}{T_j} \Delta M_M(t),$$

$$\Delta \dot{\delta}(t) = \Delta \omega(t),$$

где $\Delta M_M(t)$ – отклонение механического момента турбины. Здесь k_i ($i = \overline{1,6}$) – коэффициенты, характеризующие свойства СГ. Моделирование системы адаптивного управления СГ выполнено в среде MATLAB/Simulink при следующих значениях параметров СГ и настраиваемой модели (табл. 4):

Таблица 4

Параметры	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	τ_d, c	T_j, c
Синхронный генератор	1,773	0,854	0,346	1,49	0,038	0,584	4	2,5
Настраиваемая модель	10,9	2,7435	0,13	0,4655	0,1	1,9512	4	2,5

В результате $A = \begin{bmatrix} -0,723 & 0,038 & -0,19 \\ -0,585 & 0 & 0,687 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0,146 & 0 \\ 0 & 0,4 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B^+ = \begin{bmatrix} 6,85 & 0 & 0 \\ 0 & 2,5 & 0 \end{bmatrix}$.

Номинальные значения элементов матрицы A , с учетом особенности эквивалентной модели генератора (изменение знака разностей в скобках) и наличия неопределенности, выбраны как:

$$a_{ij}^* = [-0,723 \ 0,038 \ -0,19; -0,585 \ 0 \ 5; 0 \ 1 \ 0].$$

Для получения хорошего качества процессов адаптивного управления выбраны следующие параметры адаптера: $\alpha_{12} = -10$; $\alpha_{13} = -3$; $\alpha_{21} = -6$; $\alpha_{23} = -4$.

Кроме этого, компоненты k_{11} , k_{22} выбираются в ходе моделирования произвольно (но с отрицательными значениями): $k_{11} = -18$ и $k_{22} = -8$. Тогда алгоритмы адаптации имеют следующий вид:

$$k_{12} = 6,85(-10^{-1} e_1 e_2 - 0,038), \quad k_{13} = 6,85(-3^{-1} e_1 e_3 + 0,19),$$

$$k_{21} = 2,5(-6^{-1} e_2 e_1 + 0,585), \quad k_{23} = 2,5(-4^{-1} e_2 e_3 - 5).$$

Законы адаптивного алгоритма получены в виде

$$\hat{u}_1(t) = k_{11} e_1(t) + k_{12} e_2(t) + k_{13} e_3(t),$$

$$\hat{u}_2(t) = k_{21} e_1(t) + k_{22} e_2(t) + k_{23} e_3(t),$$

где $\hat{u}(t) = [\hat{u}_1(t) \ \hat{u}_2(t)]^T = [\Delta E_{fd}(t) \ \Delta M_M(t)]^T$, $e_1(t) = \Delta U(t)$, $e_2(t) = \Delta \omega(t)$, $e_3(t) = \Delta \delta(t)$.

Эффективность адаптивного алгоритма исследована при изменении нескольких значений элементов матрицы A синхронного генератора и рассмотрении переходных процессов по частоте и напряжению. Значения коэффициентов

одновременно увеличиваются или снижаются в 5 раз. Тогда получаем

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0,723 & 0,19 & -0,19 \\ -2,925 & 0 & 3,435 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ или } A_2 = \begin{bmatrix} -0,723 & 0,0076 & -0,19 \\ -0,117 & 0 & 0,137 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Схема моделирования СГ с адаптивным регулятором в среде Matlab/Simulink представлена на рис 10.

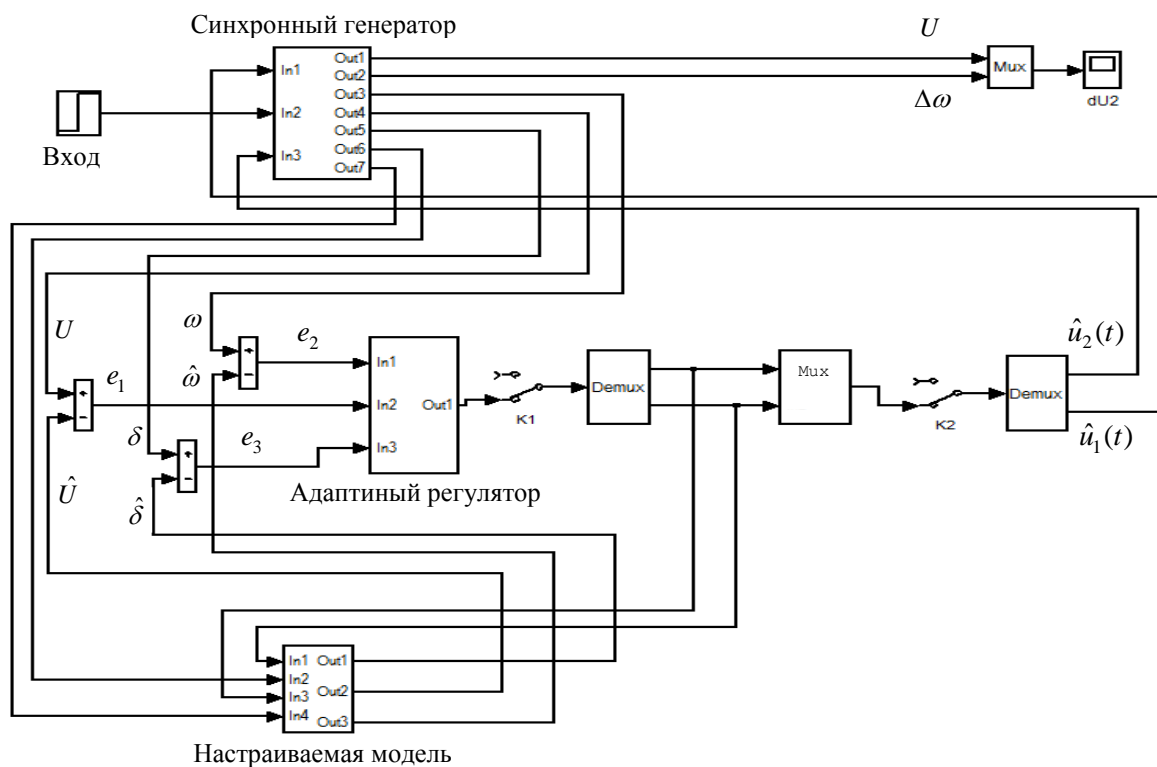
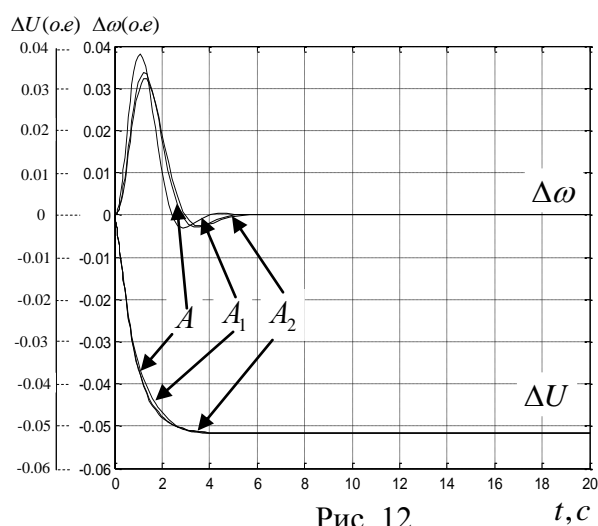
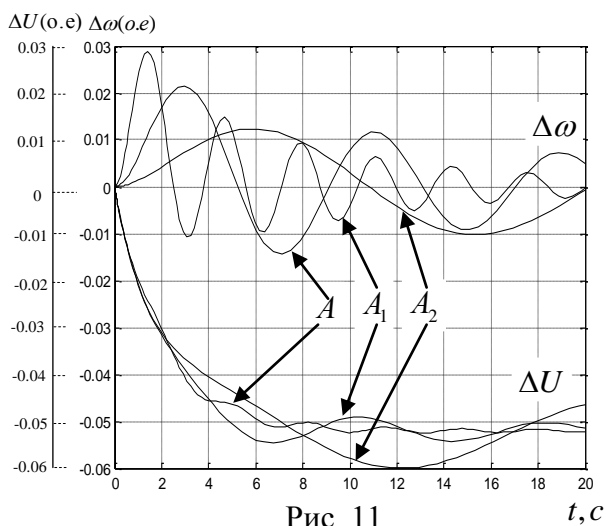


Рис. 10

Результаты моделирования переходных процессов СГ с тремя наборами элементов матриц A , A_1 , A_2 (с уменьшением/ увеличением в 5 раз и номинальными значениями) в среде MATLAB/Simulink представлены на рис. 11, 12, где на рис. 11 – переходные процессы синхронного генератора без адаптации, на рис. 12 – переходные процессы синхронного генератора с адаптацией.



Исходя из результатов моделирования видно, 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.

III Научный результат

Адаптивная система управления синхронным генератором с безынерционным алгоритмом адаптации полностью подавляет бифуркационные процессы и обеспечивает узкую локализацию (почти совпадение) переходных процессов синхронного генератора при значительных вариациях его параметров, что можно обобщить как «адаптивное управление СГ с усиленной грубостью».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В виду решения задачи демпфирования только электромеханических процессов, выбраны и обоснованы основные исследовательские модели синхронного генератора, записанные на основе уравнений Парка - Горева в форме дифференциальных уравнений с выполнением процедур упрощения и понижения порядка. Структурные схемы моделей синхронного генератора адаптированы для моделирования в пакете MatLab/Simulink.
2. В разработках автоматических регуляторов возбуждения остаются базовыми методы линейной теории управления в синтезе алгоритмов управления, причем используются исключительно стандартные ПД- законы. Однако в задачах управления синхронным генератором с неопределенностью (параметрическими возмущениями) эти методы малоэффективны.
3. Для стабилизации динамических характеристик синхронного генератора с системой возбуждения в различных режимных условиях наиболее целесообразно введение адаптивного управления на основе систем с моделями и безынерционными алгоритмами. Применение интеллектуальных методов управления (нейронные сети и нечеткие системы) на данной стадии развития АРВ еще не оправданно в виду их сложности в синтезе и дальнейшей эксплуатации.
4. Недостатком адаптивных алгоритмов в схемах с эталонной/настраиваемой моделью и параметрической адаптации является то, что сходимость алгоритмов экспоненциально устойчиво по переменным ошибки, но по процессам параметрической адаптации имеется только устойчивость по Ляпунову, что указывает на негрубость сходимости процессов параметрической адаптации.
5. В сигнальных алгоритмах идентификации/адаптации процесс представлен разрывной функцией, поэтому для использования его в качестве адаптивного управления необходимо введение усредняющего (малоинерционного) фильтра. Однако сходимость адаптивного процесса имеет характер диссипативности. Доказано, что размер предельного множества прямо зависит от значения параметра фильтра.
6. Синтезированный закон безынерционной параметрической адаптации обладает асимптотической (здесь, экспоненциальной) сходимостью процессов с нулевым

временем адаптации, грубой к неучтенным возмущениям и любым параметрическим отклонениям. Алгоритм предпочтителен для практического применения, так как беспрепятственно реализуется и универсален для управления техническими объектами.

7. Для подавления бифуркационных процессов в синхронных генераторах целесообразно использовать регуляторы, которые построены на основе адаптивного управления. Адаптивный регулятор на основе безынерционной параметрической адаптации эффективно (до полного исчезновения) подавляет бифуркацию в синхронных генераторах.

8. Адаптивная система управления синхронным генератором с безынерционным параметрическим алгоритмом обеспечивает узкую локализацию (почти, совпадение) переходных процессов синхронного генератора при значительных вариациях его параметров, что можно считать такое свойство, как адаптивное управление с усиленной грубостью.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ха Ань Туан. Адаптивное управление синхронным генератором на основе безынерционного параметрического алгоритма адаптации [Текст]/ Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан// Журнал «Электричество», 2014, №12– С.47-52.
2. Ха Ань Туан. Адаптивное управление синхронным генератором в режиме возникновения бифуркации [Текст]/ Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан// Интернет-Журнал «Науковедение», 2014. – Вып.5.
3. Ха Ань Туан. Управление техническими объектами на основе безынерционной параметрической адаптации [Текст]/ Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан// Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Сер. «Автоматизация и управление», СПб., 2014. – Вып.7. – С.52–55.
4. Ха Ань Туан. Улучшение переходных характеристик синхронного генератора на основе адаптивного управления [Текст]/ Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан, Нгуен Тиен Тханг// Интернет-Журнал «Науковедение», 2014. – Вып.1.

В других изданиях

5. Ха Ань Туан. Адаптивное управление мощным синхронным генератором в режимах выдачи и потребления мощности [Текст]/ Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан// VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу, 7-9 октября 2014 года, г. Саранск.
6. Ха Ань Туан. Улучшение переходных характеристик синхронного генератора на основе адаптивного управления [Текст]/ Н.Д. Поляхов, Ха Ань Туан// Материалы Международной научно–практической конференции «Актуальные научные вопросы и современные технологии», 28 июня 2013 г., г. Тамбов: ТРОО, 2013. Ч.3. –С.134–138.