

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 681.51

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ
С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВОЗМУЩЕНИЙ*

© 2011 г. И. Б. Фуртат

Санкт-Петербург, Институт проблем машиноведения РАН

Поступила в редакцию 11.01.11 г.

Рассматривается задача робастного управления электрическим генератором по относительной угловой скорости, математическая модель которого представлена системой дифференциально-алгебраических уравнений третьего порядка с априорно неизвестными параметрами. Получен алгоритм управления, обеспечивающий синхронизацию генератора с требуемой точностью. Результаты проиллюстрированы числовым примером.

Введение. На сегодняшний день одной из фундаментальных проблем в теории управления является качественное и эффективное управление процессами генерации электроэнергии. Причины возникновения такой проблемы связаны с рядом факторов: технологический прогресс (повышение уровня автоматизации, появление и развитие новых технологий, интенсивный рост количества малых генерирующих источников энергии); рост запросов потребителей (требование к набору и качеству услуг, уменьшение цен на услуги отраслей); снижение надежности электроснабжения из-за нарастания уровня износа оборудования, высокого уровня потерь при преобразовании, передаче, распределении и использовании энергии; повышение требований к энергоэффективности и экологической безопасности и т.п. Необходимым условием для качественного управления энергосистемами является создание простых и надежных регуляторов для управления электрическими генераторами. На сегодняшний день предложено уже достаточное количество решений этой задачи. Так, на базе нелинейной модели [1–3] в [4, 5] рассмотрено управление электрическим генератором с шинами бесконечной мощности (single machine infinite bus) при кратковременных аварийных ситуациях, связанных со значительным изменением реактивного сопротивления линии электропередачи. Для решения задачи сначала предлагается использовать линеаризацию обратной связью. Для полученной линейной модели вводится робастный закон управления, зависящий от угла ротора, относительной угловой скорости и активной мощности. Однако линеаризация обратной связью содержит параметры генератора, которые могут меняться в процессе его функционирования. К тому же использование в законе регулирования значений угла ротора затруднительно из-за отсутствия соответствующих измерительных устройств [4, 5], и, как отмечено в [6], точное измерение активной мощности в аварийных ситуациях невозможно. Решение, подобное [4, 5], было предложено также в [7], исходя из того, что модель генератора линейная.

В [8] для управления электрическим генератором авторы представляют его модель через гамильтониан системы. Затем формируется функция энергии и синтезируется робастный закон управления, зависящий от угла ротора, относительной угловой скорости, переходной электродвижущей силы (ЭДС), направленной вдоль поперечной оси и параметров модели. Очевидно, что при реализации такого алгоритма необходимо точное знание всех параметров модели и измерение всех функций. В [9] предложен нелинейный адаптивный закон управления турбогенератором при условии измерения вектора состояния, математическая модель которого расширена до системы дифференциальных уравнений седьмого порядка [10]. Решение основано на использовании синергетического подхода [11].

Из вышеперечисленного видно, что по-прежнему остается актуальным вопрос управления генератором в условиях его априорной, параметрической и функциональной неопределенностей. К тому же возникает интерес решить задачу управления генератором, где измерению была бы доступна только угловая скорость ротора. При этом желательно, чтобы закон управления был бы прост и не содержал параметры объекта.

В статье рассматривается модель генератора, предложенная в [1–3] и применяемая при проектировании систем управления в [4, 5]. Предполагается, что начальные условия, параметры и функции генератора неизвестны. Решена задача робастного управления при условии измерения

только относительной угловой скорости генератора. Цель управления состоит в синхронизации генератора с заданной точностью в номинальном режиме и кратковременных аварийных ситуациях. Для решения задачи предлагается использовать подход [12], основанный на введении вспомогательного контура параллельно объекту, который позволяет выделить возмущения, действующие на систему, и обеспечить желаемые характеристики в замкнутой системе управления. Работоспособность предложенных алгоритмов аналитически доказана и проверена на числовых примерах для модели генератора с параметрами и множеством их возможных значений из [4, 5].

1. Постановка задачи. Рассмотрим электрический генератор, модель которого описывается следующими дифференциально-алгебраическими уравнениями [1–5]

Уравнения движения ротора генератора

$$\begin{aligned} \dot{\delta}(t) &= \omega(t), \\ \dot{\omega}(t) &= -\frac{D}{2H}\omega(t) - \frac{\omega_0}{2H}\Delta P_e(t). \end{aligned} \quad (1.1)$$

Электрическая динамика генератора

$$\dot{E}'_q(t) = \frac{1}{T_{d0}}(E_f(t) - E_q(t)). \quad (1.2)$$

Электрические уравнения

$$\begin{aligned} E_q(t) &= \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} E'_q(t) - \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} V_s \cos \delta(t), \\ E_f(t) &= k_c u_f(t), \\ P_e(t) &= \frac{V_s E_q(t)}{x_{ds}} \sin \delta(t), \\ I_q(t) &= \frac{V_s}{x_{ds}} \sin \delta(t) = \frac{P_e(t)}{x_{ad} I_f(t)}, \\ Q_e(t) &= \frac{V_s}{x_{ds}} E_q(t) \cos \delta(t) - \frac{V_s^2}{x_{ds}}, \\ E_q(t) &= x_{ad} I_f(t), \\ V_t(t) &= \frac{1}{x_{ds}} \sqrt{x_s^2 E_q^2(t) + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d x_{ds} P_e(t) \operatorname{ctg} \delta(t)}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

В (1.1)–(1.3) введены следующие обозначения: $\delta(t)$ – угол поворота ротора генератора относительно синхронной оси вращения рад, $\omega(t)$ – относительная скорость ротора, рад/с, $\Delta P_e(t) = P_e(t) - P_m$, отн. ед., $P_e(t)$ – активная электрическая входная мощность, поступающая на генератор, отн. ед., P_m – входная механическая мощность генератора отн. ед., D – коэффициент демпфирования, отн. ед., H – коэффициент инерции, с, ω_0 – скорость ротора в синхронном режиме, рад/с, $T'_{d0} = T_{d0} x'_{ds} / x_{ds}$ – переходная постоянная времени по продольной оси при разомкнутом статоре, с, T_{d0} – переходная постоянная времени по продольной оси при холостом ходе, с, $x'_{ds} = x_T + 0.5x_L + x'_d$, отн. ед., x_T – реактивное сопротивление трансформатора, отн. ед., x_L – реактивное сопротивление линии электропередачи, отн. ед., x'_d – переходное реактивное сопротивление по продольной оси, отн. ед., $x_{ds} = x_T + 0.5x_L + x_d$, отн. ед., x_{ad} – взаимное сопротивление между обмотками возбуждения и статора, отн. ед., V_s – напряжение на шинах бесконечной мощности, отн. ед., k_c – инерционная постоянная, отн. ед., $u_f(t)$ – напряжение на обмотке возбуждения ротора, отн. ед., $E_q(t)$ – ЭДС генератора по поперечной оси, отн. ед., $E_f(t)$ – эквивалентная ЭДС возбуждения, $E'_q(t)$ – переходная ЭДС по поперечной оси, отн. ед., $I_q(t)$ – ток по поперечной оси, отн. ед., $I_f(t)$ – ток возбуждения, отн. ед., $Q_e(t)$ – реактивная мощность, отн. ед., $V_t(t)$ – напряжение на зажимах статора, отн. ед.

Относительно модели (1.1)–(1.3) сделаны следующие предположения.

1. Неизвестные параметры модели (1.1)–(1.3) образуют вектор υ , $\upsilon \in \Xi$, Ξ – заданное ограниченное множество. В рабочем режиме генератора $\delta(t) \in (0; 180^\circ)$ для $\forall t \geq 0$ и $\forall \upsilon \in \Xi$.

2. В процессе функционирования генератора могут произойти кратковременные аварийные ситуации, связанные с внезапным изменением реактивного сопротивления x_L линии передачи [4, 5].

3. Измерению доступна только относительная угловая скорость $\omega(t)$.

В [4, 5] отмечено, что значения $\delta(t) = 0^\circ$ и $\delta(t) = 180^\circ$ не соответствуют рабочему режиму генератора, поэтому они исключены из рассмотрения (предположение 1). Как отмечалось во введении, часто при решении задачи управления генератором предполагается, что параметры объекта частично или полностью известны. Однако в процессе функционирования генератора они могут меняться, поэтому будем решать задачу в условиях неизвестных параметров (предположение 1). Требуется спроектировать систему управления в условиях неопределенности параметров модели (1.1)–(1.3), чтобы были выполнены целевые условия

$$\lim_{t \rightarrow T} \delta(t) = \text{const}, \quad |\omega(t)| < \varepsilon_1 \quad \text{и} \quad |\Delta P_e(t)| < \varepsilon_2 \quad \text{при} \quad t > T, \quad (1.4)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2 > 0$ – заданные числа, T – время, по истечении которого с начала работы системы должны выполняться (1.4). Кроме того, все функции в замкнутой системе должны быть ограниченными.

2. Метод решения. Как и в [4, 5], принимая во внимание (1.3), преобразуем уравнение (1.2), и перепишем (1.1), (1.2) в виде

$$\begin{aligned} \dot{\delta}(t) &= \omega(t), \\ \dot{\omega}(t) &= -\frac{D}{2H} \omega(t) - \frac{\omega_0}{2H} \Delta P_e(t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\Delta \dot{P}_e(t) = -\frac{1}{T'_{d0}} \Delta P_e(t) + \frac{I_q(t)}{T'_{d0}} [k_c u_f(t) + T_{d0}(x_d - x'_d) I_q(t) \omega(t)] + T'_{d0} (Q_e(t) + V_s^2/x_{ds}) \omega(t) - P_m.$$

Введем обозначения в (2.1): $z(t) = [\delta(t), \omega(t), \Delta P_e(t)]^T$,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{2H} & -\frac{\omega_0}{2H} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T'_{d0}} \end{bmatrix}, \quad B(t) = [0, 0, k_c I_q(t)/T'_{d0}]^T,$$

$$L = [0, 1, 0], \quad f(t) = \frac{1}{k_c} \left(T_{d0}(x_d - x'_d) I_q(t) \omega(t) + \frac{(T'_{d0})^2 (Q_e(t) + V_s^2/x_{ds}) \omega(t)}{I_q(t)} - \frac{T'_{d0} P_m}{I_q(t)} \right).$$

Перепишем уравнение (2.1) в форме

$$\dot{z}(t) = Az(t) + B(t)(u_f(t) + f(t)), \quad \omega(t) = Lz(t). \quad (2.2)$$

Как было отмечено во Введении, авторы [4, 5] сначала вводят линеаризацию обратной связью $u_f(t) = v_f(t) - f(t)$. Однако это потребует точного знания параметров и нелинейной функции $f(t)$. Понятно, что на практике даже малое неучтенное изменение любого из параметров или переменной в $f(t)$ приведет к невыполнению такого закона. Поэтому в статье будет решаться задача синхронизации электрического генератора без использования линеаризации обратной связью.

Для решения воспользуемся подходом, предложенным в [12] и обобщенным на класс нестационарных объектов в [13]. Преобразуем уравнение (2.2) к форме вход–выход

$$Q(p)\omega(t) = R(p, t)(u_f(t) + f(t)). \quad (2.3)$$

Здесь $Q(p)$, $R(p, t)$ – линейные дифференциальные операторы порядков 3 и 1 соответственно, полученные при переходе от (2.2) к (2.3), $p = d/dt$ – оператор дифференцирования. Разложим $R(p, t)$ и $Q(p)$ на составляющие [13]

$$R(p, t) = R_0(p) + \Delta R(p, t), \quad Q(p) = Q_0(p) + \Delta Q(p), \quad (2.4)$$

где $R_0(p)$, $Q_0(p)$ – произвольные стационарные линейные дифференциальные операторы порядков 3 и 1 соответственно, $\Delta R(p, t)$ и $\Delta Q(p)$ – остатки разложения. Пусть $Q_0(\lambda)/R_0(\lambda) = Q_m(\lambda)$, $Q_m(\lambda)$ – гурвицев полином, λ – комплексная переменная в преобразовании Лапласа. Учитывая разложение (2.4), перепишем (2.3) в виде

$$Q_m(p)\omega(t) = u_f(t) + \varphi(t), \quad (2.5)$$

где $\varphi(t) = R_0^{-1}(p)[\Delta R(p, t)u_f(t) - \Delta Q(p)\omega(t) + R(p, t)f(t)]$ – функция, содержащая в себе неопределенности объекта (1.1).

Следуя [12], введем вспомогательный контур

$$Q_m(p)\bar{\omega}(t) = \chi u_f(t), \quad (2.6)$$

$\chi > 0$. Вычитая из (2.5) выражение (2.6), составим функцию рассогласования $\zeta(t) = \omega(t) - \bar{\omega}(t)$ в виде

$$Q_m(p)\zeta(t) = \psi(t),$$

где $\psi(t) = (1 - \chi)u_f(t) + \varphi(t)$ – новая функция возмущения, включающая в себя априорную, функциональную и параметрическую неопределенности исходной модели электрического генератора (1.1).

Зададим закон управления в виде

$$u_f(t) = -\chi^{-1}Q_m(p)\bar{\zeta}(t) = -\chi^{-1}\bar{\psi}(t). \quad (2.7)$$

В (2.7) $\bar{\zeta}(t)$ и $\bar{\psi}(t)$ – оценки сигналов $\zeta(t)$ и $\psi(t)$ соответственно. Для реализации закона управления (2.7) рассмотрим наблюдатель

$$\dot{\xi}(t) = G_0\xi(t) + D_0(\bar{\zeta}(t) - \zeta(t)), \quad \bar{\zeta}(t) = L_1\xi(t), \quad (2.8)$$

где $\xi(t) \in R^2$ – оценка величины $\theta(t) = [\zeta(t), \dot{\zeta}(t)]^T$. Параметры в (2.8) определяем, согласно [14]:

$$G_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_0 = -[d_1\mu^{-1}, d_2\mu^{-2}]^T, \quad \text{коэффициенты } d_1, d_2 \text{ выбираются так, чтобы матрица } G = G_0 - DL_1$$

была гурвицевой, $D = [d_1, d_2]^T$, $L_1 = [1, 0]$, $\mu > 0$ – достаточно малая величина.

Для оценки точности наблюдения введем вектор отклонений $\bar{\eta}(t) = \Gamma^{-1}(\xi(t) - \theta(t))$, где $\Gamma = \text{diag}\{\mu, 1\}$. Продифференцировав $\bar{\eta}(t)$ по времени с учетом уравнения (2.8), получим

$$\dot{\bar{\eta}}(t) = \mu^{-1}G\bar{\eta}(t) + b\zeta^{(2)}(t), \quad \bar{\Delta}(t) = \mu L_1\bar{\eta}(t).$$

Здесь $b = [0, 1]^T$. Преобразуем предпоследнее уравнение в эквивалентное относительно выхода $\bar{\Delta}(t)$

$$\dot{\eta}(t) = \mu^{-1}G\eta(t) + \bar{b}\zeta(t), \quad \bar{\Delta}(t) = \mu L_1\eta(t), \quad (2.9)$$

где $\bar{b} = [1, 0]^T$. Последние два уравнения эквивалентны относительно переменных $\eta_1(t) = \bar{\eta}_1(t)$ в виду того, что являются различными векторно-матричными формами записи одного уравнения $(p^2 + d_1\mu^{-1}p + d_2\mu^{-2})\bar{\eta}_1(t) = p^2\zeta(t)$. Принимая во внимание уравнения (2.7) и (2.9), преобразуем (2.5) к форме пространство – состояние

$$\dot{x}(t) = A_mx(t) + \mu b g^T \Delta(t), \quad \omega(t) = L_1x(t), \quad (2.10)$$

где $x(t) \in R^2$, $A_m \in R^{2 \times 2}$ – матрица в форме Фробениуса с характеристическим многочленом $Q_m(\lambda)$, $\Delta(t) = [\eta_1(t), \dot{\eta}_1(t), \ddot{\eta}_1(t)]^T$, g – вектор, составленный из коэффициентов полинома $Q_m(\lambda)$.

У т в е р ж д е н и е. Пусть выполнены условия предположений 1–3. Тогда для чисел $\chi > 0$, $\mu_0 > 0$ и

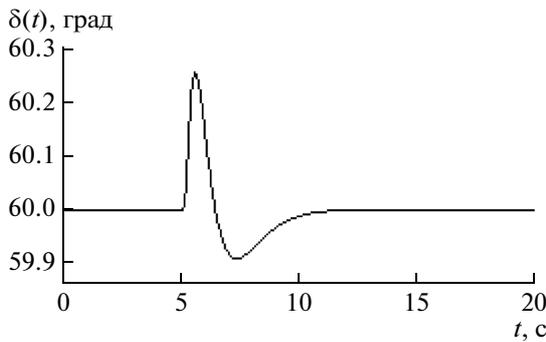


Рис. 1. Переходной процесс по $\delta(t)$

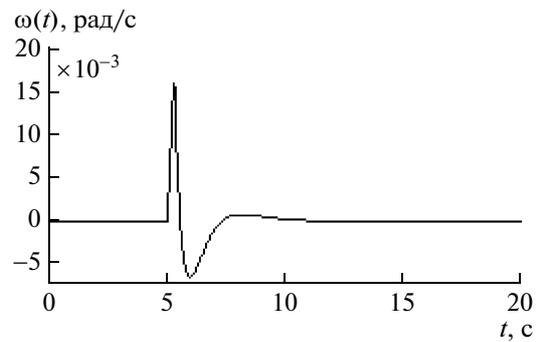


Рис. 2. Переходной процесс по $\omega(t)$

$$\mu_0 \leq \frac{\|Q_2\|}{2\|Hb\|^2}, \tag{2.11}$$

где матрицы P, H определяются из решений уравнений

$$A_m^T P + PA_m = -Q_1, \quad G^T H + HG = -Q_2, \quad Q_1 = Q_1^T > 0, \quad Q_2 = Q_2^T > 0, \tag{2.12}$$

система управления (2.6)–(2.8) при $\mu \leq \mu_0$ обеспечивает выполнение целевого условия (1.4) при $t > T$.

3. Результаты моделирования. Рассмотрим модель генератора (1.1)–(1.3). Класс неопределенности Ξ задан неравенствами [4, 5]: $0.28165 < 1/T_{d0}' \leq 0.75105$, $|T_{d0}'(Q_e(t) + V_s^2/x_{ds})| \leq 0.2347$, $1 \leq x_d \leq 3$, $0.1 \leq x_d' \leq 0.4$, $0.1 \leq x_T \leq 0.2$.

Определим $Q_m(p)$ в виде $Q_m(p) = p^2 + 4p + 4$. Тогда уравнение вспомогательного контура (2.6) примет вид

$$\bar{\omega}(t) = -\frac{\chi}{p^2 + 4p + 4} u_f(t).$$

Выберем в (2.8) $D = [d_1, d_2]^T = [4, 4]^T$ и сформируем наблюдатель

$$\dot{\xi}_1(t) = -\xi_2(t) - 4\mu^{-1}(\xi_1(t) - \zeta(t)), \quad \dot{\xi}_2(t) = -4\mu^{-2}(\xi_1(t) - \zeta(t)).$$

Тогда закон управления (2.7) определится как

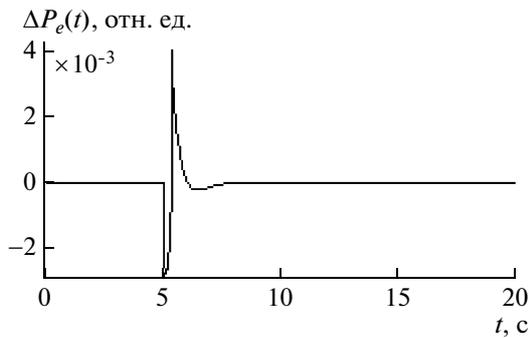
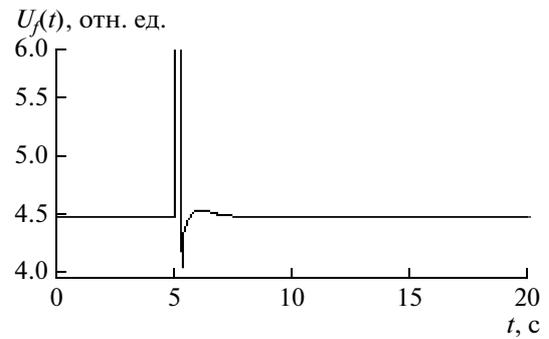
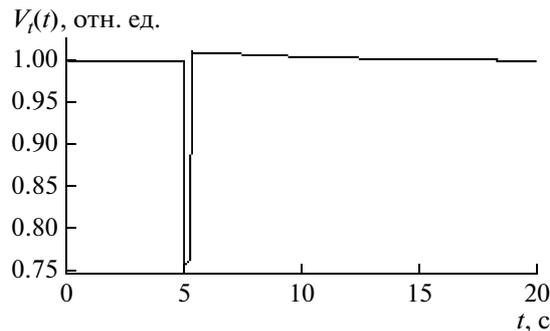
$$u_f(t) = \chi^{-1}(\dot{\xi}_2(t) + 4\xi_2(t) + 4).$$

Найдем μ из условия (2.11). Задав $Q_1 = 0.0001I_2$, $Q_2 = I_2$, имеем $\mu_0 \leq 11.22$. Выберем $\mu = 1/30$, $\chi = 2$ и подставим их во вспомогательный контур, наблюдатель и закон управления.

При моделировании рассмотрим аварийную ситуацию, связанную с внезапным изменением реактивного сопротивления линии передачи x_L : до аварийной ситуации $x_L = 0.4853$ отн. ед.; в момент времени $t = 5$ с. $x_L = 4$ отн. ед.; при $t = 5.3$ с срабатывают блокираторы и подключают резервную линию передачи с $x_L = 0.4853$ отн. ед.

Выберем генератор (1.1)–(1.3), задав в нем параметры [4, 5]: $\omega_0 = 314.159$ рад/с, $D = 5$ отн. ед., $H = 4$ сек, $T_{d0} = 6.9$ с, $x_d = 1.863$ отн. ед., $x_d' = 0.257$ отн. ед., $x_T = 0.127$ отн. ед., $P_{m0} = 0.9$ отн. ед., $V_{t0} = 1$ отн. ед., $\delta(0) = \pi/3$ рад, $\omega(0) = 0$ рад/с и $\Delta P_e(0) = 0$ отн. ед., $1/T_{d0}' = 0.7$ 1/с, $T_{d0}'(Q_e(t) + V_s^2/x_{ds}) = 0.3$ отн. ед. Ограничения на управление, согласно [4, 5], составляют $-3 \leq u_f(t) \leq 6$ отн. ед. На рис. 1–5 приведены переходные процессы по углу ротора $\delta(t)$, относительной угловой скорости $\omega(t)$, активной мощности $\Delta P_e(t)$, закону управления $u_f(t)$ и напряжению на зажимах статора $V_t(t)$.

Из результатов моделирования видно, что предложенная система управления обеспечивает лучше показатели качества переходных процессов по сравнению с [4, 5], где измерению был до-

Рис. 3. Переходной процесс по $\Delta P_e(t)$ Рис. 4. Переходной процесс по $u_f(t)$ Рис. 5. Переходной процесс по $V_f(t)$

ступен весь вектор состояния и частично известны параметры модели генератора. Причем для управления генератором достаточно измерять относительную угловую скорость ротора $\omega(t)$. Выбором параметров χ во вспомогательном контуре (2.6), законе управления (2.7), μ в наблюдателе (2.8) можно получить требуемые величины ε_1 и ε_2 в целевом условии (1.4).

Заключение. На базе модели [1–5] предложен алгоритм робастного управления по относительной угловой скорости ротора в условиях априорной, параметрической и функциональной неопределенности модели генератора и кратковременных аварийных ситуациях. Для компенсации неопределенностей модели предложено использовать подход [12]. Получены условия выбора параметров регулятора. Приведенный алгоритм прост в реализации, расчете параметров и позволяет компенсировать неопределенности модели генератора с заданной точностью.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения. Перепишем уравнения (2.9) и (2.10) в виде

$$\dot{x}(t) = A_m x(t) + \mu_2 b g^T \Delta(t), \quad \mu_1 \dot{\eta}(t) = G \eta(t) + \mu_2 \bar{b} \zeta(t), \quad (\text{П.1})$$

где $\mu_1 = \mu_2 = \mu$. Воспользуемся первой леммой в [15]. Для этого рассмотрим (П.1) при $\mu_2 = 0$. Очевидно, что в этом случае система (П.1) асимптотически устойчива и из [15] следует ограниченность сигналов $\Delta(t)$ и $\zeta(t)$. Доказательство ограниченности всех функций в замкнутой системе аналогично доказательству в [12, 13]. Рассмотрим теперь (П.1), когда $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$. Выберем функцию Ляпунова в виде

$$V(t) = x^T(t) P x(t) + \eta^T(t) H \eta(t). \quad (\text{П.2})$$

Принимая во внимание (2.12), возьмем производную по времени от (П.2) вдоль траекторий (П.1)

$$\dot{V}(t) = -\varepsilon^T(t) Q \varepsilon(t) + 2\chi^{-1} \mu_0 x^T(t) P \bar{b} g^T \Delta(t) - \mu_0^{-1} \eta^T(t) Q_2 \eta(t) + 2\mu_0 \eta^T(t) H \bar{b} \zeta(t). \quad (\text{П.3})$$

Воспользуемся оценками

$$2\chi^{-1}\mu_0x^T(t)P\bar{b}g^T\Delta(t) \leq 2\chi^{-1}\mu_0\left(x^T(t)P\bar{b}g^Tg\bar{b}^TPx(t) + |\Delta(t)|^2\right),$$

$$2\mu_0\eta^T(t)Hb\zeta(t) \leq 2\mu_0\left(\eta^T(t)Hbb^TH\eta(t) + |\zeta(t)|^2\right).$$

С учетом последних неравенств правую часть в (П.3) можно оценить как

$$\dot{V}(t) \leq -x^T(t)(Q_1 - 2\chi^{-1}\mu_0P\bar{b}g^Tg\bar{b}^TP)x(t) - \mu_0^{-1}\eta^T(t)(Q_2 - 2\mu_0^2Hbb^TH)\eta(t) + \mu_0\phi,$$

где $\phi = 2\sup_t(|\Delta(t)|^2 + |\zeta(t)|^2)$. Легко видеть, что всегда существуют числа $\chi > 0$ и $\mu_0 > 0$, такие, что в силу условий (2.11) производную функцию Ляпунова можно переписать как

$$\dot{V}(t) \leq -\gamma V(t) + \mu_0\phi,$$

где

$$\gamma = \min\left\{\frac{\lambda_{\min}(Q_3)}{\lambda_{\max}(P)}, \frac{\lambda_{\min}(Q_4)}{\mu_0\lambda_{\max}(H)}\right\}, \quad Q_3 = Q_1 - 2\chi^{-1}\mu_0P\bar{b}g^Tg\bar{b}^TP > 0 \quad \text{и} \quad Q_4 = Q_2 - 2\mu_0^2Hbb^TH > 0.$$

Решив последнее неравенство, получим

$$V(t) \leq e^{-\gamma t}V(0) + \mu_0\gamma^{-1}(1 - e^{-\gamma t})\phi. \tag{П.4}$$

Из (П.4) следует, что $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t) \leq \mu_0\gamma^{-1}\phi$. Тогда, в силу структуры (П.3) и (П.4)

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 \leq \sqrt{e^{-\gamma T}V(0) + \mu_0(1 - e^{-\gamma T})\gamma^{-1}\phi}. \tag{П.5}$$

Эта оценка достаточна груба. Но из нее видно, что, уменьшая число μ_0 , можно уменьшить требуемые значения ε_1 и ε_2 в целевом условии (1.4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bergan A.R.* Power Systems Analysis. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
2. *Pai M.A.* Power system stability. N. Y.: North Holland, 1981.
3. *Anderson P.M., Fouad A.A.* Power system control and stability. Iowa: Iowa State University Press, 1977.
4. *Wang Y., Xie L., Hill D.J., Middleton R.H.* Robust nonlinear controller design for transient stability enhancement of power systems // Proc. of the 31st Conf. on Decision and Control. Arizona, 1992. P. 1117–1122.
5. *Guo Y., Hill D.J., Wang Y.* Global transient stability and voltage regulation for power systems // IEEE Trans. on Power Systems. 2001. V. 16. № 4. P. 678–688.
6. *Павлов Г.М., Меркурьев Г.В.* Автоматика энергосистем. СПб: Издание Центра подготовки кадров РАО “ЕЭС России”, 2001.
7. *Qu Z., Dorsey J.F., Bond J., McCalley J.D.* Application of robust control to sustained oscillation in power systems // IEEE Trans. On Circuits and Systems. I. Fundamental theory and applications. 1992. V. 39. № 6. P. 470–476.
8. *Astolfi A., Galaz M., Ortega R. et al.* Transient stabilization of multimachine power systems with nontrivial transfer conductance // IEEE Trans. On Automatic Control. 2005. V. 50. № 1. P. 60–75.
9. *Кузьменко А.А.* Нелинейное адаптивное управление турбогенератором // Изв. РАН. ТИСУ. 2008. № 1. С. 112–119.
10. *Козлов В.Н., Шашихин В.Н.* Синтез координирующего робастного управления взаимосвязанными синхронными генераторами // Электричество. 2009. № 9. С. 20–26.
11. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994.
12. *Цыкунов А.М.* Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // АиТ. 2007. № 7. С. 103–115.
13. *Фуртат И.Б., Цыкунов А.М.* Робастное управление нестационарными нелинейными структурно неопределенными объектами // Проблемы управления. 2008. № 5. С. 2–7.
14. *Atassi A.N., Khalil H.K.* A separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. Automat. Control. 1999. V. 44. № 9. P. 1672–1687.
15. *Брусин В.А.* Об одном классе сингулярно возмущенных адаптивных систем. 1 // АиТ. 1995. № 4. С. 119–127.