БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Геложе Ю.А., Клименко П.П.* Управление процессами в нелинейных системах. – М.: Радио и связь, 2006. – 264 с.
2. *Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В.* Исследование переходных процессов в нелинейном автопилоте // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 5 (106). – С. 55-61.
3. *Геложе Ю.А., Клименко П.П., Максимов А.В.* Исследование переходных процессов в нелинейном автопилоте с гибкой обратной связью // Материалы Всероссийской научной конференции «Теоретические и методические проблемы эффективного функционирования радиотехнических систем». (Системотехника – 20112). – С. 96-102.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Максимов Александр Викторович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: kafmps@ttpark.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634328058; кафедра микропроцессорных систем; доцент.

Геложе Юрий Андреевич – e-mail: rts@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП-17А; тел.: 88634371637; кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Клименко Павел Петрович – кафедра радиотехнических и телекоммуникационных систем; доцент.

Maksimov Aleksandr Viktorovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail:kafmps@ttpark.ru; 81, Petrovskay street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634328058; the department of microprocessor systems; associate professor.

Ghelozhe Yury Andreevich – e-mail: rts@tsure.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371637; the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

Klimenko Pavel Petrovich – the department of radio engineering and telecommunication systems; associate professor.

УДК 681.51

А.А. Колесников, А.А. Кузьменко

НЕЛИНЕЙНЫЙ СИНТЕЗ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОМ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ

Наиболее распространенными генерирующими компонентами электроэнергетических систем являются турбогенераторы. Повышение требований к качеству вырабатываемой электроэнергии, устойчивости, расширению функциональных возможностей турбогенераторов электростанций обуславливают актуальность и необходимость поиска путей совершенствования процессов управления турбогенераторами. В статье рассмотрен нелинейный синтез к построению адаптивных законов управления турбогенератором энергосистемы, которые обеспечивают асимптотическую устойчивость в целом замкнутой системы <<турбогенератор-регулятор>>, параметрическую робастность и инвариантность к внешним возмущениям кусочно-постоянным возмущениям со стороны энергосистемы. На основе указанных законов построен принципиально новый класс автоматических регуляторов. Проведенное компьютерное моделирование полностью подтверждает полученные теоретические выводы.

Турбогенератор; синергетическое управление; инвариантное многообразие; наихудшее возмущение; интегральная адаптация.

A.A. Kolesnikov, A.A. Kuzmenko

TURBOGENERATOR CONTROL LAW'S NONLINEAER SYNTHESIS: INTEGRAL ADAPTATION

Turbogenerators are the most wide-spread components of power systems for power generation. Increasing of requirements to quality of generated energy, stability, and expanding of area of functionality of power station turbo generators, all this facts provide topicality and necessity to find ways of improving the control for turbogenerators. In the paper we explore nonlinear synthesis for design of adaptive control laws for power system turbogenerators providing asymptotical stability of "Turbogenerator–Regulator" closed-loop system in a whole, parameter robustness and invariantness to external piece-constant disturbances from the power system side. By using of this laws the principally new class of automatic regulators were built. The presented computer simulation results completely prove the obtained theoretical conclusions.

Turbogenerator; synergetics control; invariant manifold; the worst disturbance; integral adaptation.

Введение. Наиболее распространенными генерирующими компонентами электроэнергетических систем являются турбогенераторы. Современные электростанции оснащены группами турбогенераторов, работающих параллельно и взаимодействующих через общую электрическую сеть. Основные составляющие элементы турбогенератора – это турбина и синхронный генератор (СГ), находящиеся на одном валу. Такое широкое применение турбогенераторов в качестве источников электроэнергии обусловлено их высоким КПД. Как и всякий технический объект, турбогенератор оснащается автоматическими регуляторами, которые осуществляют функции локального управления, т.е. отвечают за работу отдельных элементов энергоблока. Однако эти средства обладают, как это ни парадоксально, целым рядом скрытых и поэтому *принципиально неустранимых* недостатков, которые связаны вовсе не с техническим или сервисным их исполнением. Этот факт объясняется неспособностью методов классической теории управления решать задачу синтеза управляющих устройств для многомерных, многосвязных и нелинейных систем, которыми являются турбогенераторы. В связи этим для построения эффективных стратегий автоматического управления турбогенераторами необходимо переходить на новые концептуальные основы – методы синергетической теории управления (СТУ) [1, 2]. Согласно принципу У. Эшби, сложность управляющего устройства должна быть больше или сопоставима сложности объекта управления. Тем не менее традиционные регуляторы турбогенераторов, как правило, не выходят за рамки ПИД-регуляторов. Таким образом, налицо явное нарушение принципа У. Эшби. В статье рассмотрен нелинейный синтез адаптивных законов управления турбогенератором энергосистемы, которые обеспечивают подавление внешнего кусочно-постоянного возмущения со стороны энергосистемы.

Постановка задачи управления. Запишем расширенную нелинейную модель турбогенератора энергосистемы, работающего на шины большой мощности [3], с учетом модели кусочно-постоянного возмущения:

$$
\begin{aligned}
&\dot{\delta}(t) = s;\\
&\dot{s}(t) = b_1\left(P_T - E_q^2 y_{11}\sin(\alpha_{11}) - E_q U_c y_{12}\sin(\delta-\alpha_{12}) - w_1\right);\\
&\dot{E}_q(t) = b_2\left(-E_q + b_3\cdot s\sin(\delta-\alpha_{12}) + U_1\right);\\
&\dot{P}_T(t) = b_4\left(-P_T + q\cdot C\right);\\
&\dot{q}(t) = b_6\left(-\gamma(q) - b_5 s + h\right);\\
&\dot{h}(t) = b_7\left(-h + U_2\right);\\
&\dot{w}_1(t) = \xi\, s,
\end{aligned}
\tag{1}
$$

здесь $\equiv \dfrac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования; δ – угол поворота ротора синхронного СГ относительно синхронной оси вращения; $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ – скольжение; ω – частота вращения СГ, ω_0 – синхронная частота вращения, P_T – механическая мощность турбины; E_q – синхронная ЭДС СГ; $C = const$ – давление пара перед турбиной; q – перемещение сервомотора регулирующего клапана, изменяющего доступ энергоносителя (пара) в турбину; k_ω – коэффициент передачи измерительной части первичного регулятора скорости; $\gamma(q)$ – функция, учитывающая ограничение на перемещение сервомотора; h – сигнал вторичного регулятора скорости турбины; U_1 – напряжение, прикладываемое к обмотке возбуждения СГ; U_2 – управляющее воздействие на вторичный регулятор скорости турбины; Tj – постоянная времени инерции турбогенератора; T_{d0} – постоянная времени обмотки возбуждения СГ; $T_П$ – постоянная времени парового объема турбины; T_c – постоянная времени первичного регулятора скорости турбины; T_B – постоянная времени вторичного регулятора скорости турбины; x_d – синхронное сопротивление СГ, x'_d – переходное сопротивление СГ; U_c – напряжение шин большой мощности; y_{11} – модуль собственной проводимости турбогенератора, y_{12} – модуль взаимной проводимости СГ с шина ми постоянного напряжения $U_c = const$, α_{11}, α_{12} – углы, дополняющие до π/2 аргументы собственных и взаимных проводимостей соответственно; b_i, $i = \overline{1,7}$ – константы, w_1 – оценка неизмеряемого кусочно-постоянного возмущения $M(t) = const$, действующего на турбогенератор со стороны энергосистемы; ξ – постоянный коэффициент. Кусочно-постоянное возмущение означает, что на разных интервалах времени это возмущение принимает постоянное значение, т.е. $M(t) = M_0$, здесь M_0 – амплитуда. В энергосистемах $M_0 > 0$ означает, что произошел наброс мощности (например, увеличение потребления мощности нагрузкой, подключение дополнительных потребителей). Если же $M_0 < 0$, то происходит сброс мощности (например, отключение части потребителей).

На рис. 1 показана структура исследуемой энергосистемы, которая состоит из турбины и СГ, работающего через линию электропередачи на шины бесконечной мощности (неизменного напряжения).

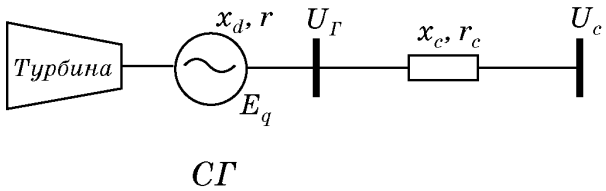

Рис. 1. Структура энергосистемы

Турбогенератор, представленный системой уравнений (1), имеет два канала управления. Следовательно, согласно основному методу СТУ – методу аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [1, 2], для него можно задать не более двух независимых инвариантов. Набор естественных инвариантов формируется, исходя из решаемой турбогенератором технологической задачи:

1) стабилизация выходного напряжения СГ

$$U_{Г0} - U_{Г} = 0, \tag{2}$$

где $U_{Г0}$ – заданное значение напряжения СГ;

2) стабилизация частоты вращения турбогенератора $\omega = \omega_0$, что в рамках модели (1) означает

$$s = 0\,. \tag{3}$$

Таким образом, постановка задачи управления турбогенератором энергосистемы (1) заключается в следующем: необходимо синтезировать нелинейные адаптивные законы управления турбогенератором U_1, U_2 в функции координат состояния расширенной системы (1), которые обеспечивают выполнение технологических инвариантов (2), (3) и подавление внешнего кусочно-постоянного возмущения $M(t) = M_0$ без оценивания этого возмущения.

Синтез нелинейных законов управления. Адаптивные законы управления, построенные методом АКАР, представляют собой совокупность базисных нелинейных законов и некоторой адаптивной компоненты («надстройки»), обеспечивающей подавление негативных возмущений. При построении базовых законов управления делается предположение об измеримости всех переменных состояния и действующих возмущений. В действительности не все переменные измеримы, а возмущения вообще являются, как правило, неизмеримыми. Для их оценки в законе управления требуется построение либо наблюдателей (адаптивное управление с динамическими наблюдателями), либо возможно подавлять эти возмущения без измерения возмущений (интегральная адаптация). Рассмотрим синтез нелинейных законов адаптивного управления турбогенератором, базирующийся на принципе интегральной адаптации. Процедура синтеза подробно изложена в [2, 4] и в данном случае включает в себя три этапа.

I этап. На этом этапе синтеза для системы (1) мы можем выполнить только инвариант (2), а для выполнения инварианта (3) необходимо на следующих этапах синтеза осуществить последовательное определение «внутренних» управлений методом АКАР [1, 2]. Таким образом, формируется первая совокупность макропеременных

$$\psi_1 = U_{А0}^2 - U_{А}^2,$$
$$\psi_2 = h - \varphi_1(\delta, s, P_T, q),$$

которая должна удовлетворять решениям системы функциональных уравнений $T_i\dot{\psi}_i(t) + \psi_i = 0, i = 1,2.$

На этом этапе найдем выражение для закона управления возбуждением U_1:

$$U_1 = E_q - b_3 \cdot s\sin(\delta - \alpha_{12}) - \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial \delta} s + \frac{1}{T_1}\psi_1\right) \Bigg/ \left(\frac{\partial \psi_1}{\partial E_q} b_2\right). \tag{4}$$

II этап. Задаем макропеременную

$$\psi_3 = q - \varphi_2\left(\delta, s, P_T, w_1\right),$$

которая должна удовлетворять решению дифференциального уравнения

$$T_3\dot{\psi}_3(t) + \psi_3 = 0.$$

III этап. Для выполнения инварианта (3) зададим финишную макропеременную

$$\psi_4 = \xi\, s + \gamma_1 w_1,$$

которая должна удовлетворять решению дифференциального уравнения

$$\ddot{\psi}_4\left(t\right) + \lambda_1\dot{\psi}_4(t) + \lambda_2\psi_4 = 0.$$

На каждом этапе получаем свою декомпозированную систему, которая описывает поведение системы с учетом попадания на соответствующие инвариантные многообразия. На III этапе находим выражение для «внутреннего управления» $\varphi_2\left(\delta, s, P_T, w_1\right)$, зная которое получим выражение $\varphi_1\left(\delta, s, P_T, q, w_1\right)$. Тогда окончательное выражение для закона управления U_2 имеет вид

$$\begin{aligned} U_2 &= h + \frac{1}{b_7}\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial\delta}\dot{\delta}(t) + \frac{\partial\varphi_1}{\partial s}\dot{s}(t) + \frac{\partial\varphi_1}{\partial P_T}\dot{P}_T(t) + \frac{\partial\varphi_1}{\partial q}\dot{q}(t) + \frac{\partial\varphi_1}{\partial w_1}\dot{w}_1(t)\right) - \\ &- \frac{1}{T_2 b_7}\psi_2 = h - \frac{1}{T_2 b_7}\left(h - \varphi_1\left(\delta, s, P_T, q\right)\right) + \frac{1}{b_7}\frac{\partial\varphi_1}{\partial w_1}\xi s + \\ &+ \frac{1}{b_7}\left(\frac{\partial\phi_1}{\partial P_T}b_4\left(-P_T + Cq\right) + \frac{\partial\varphi_1}{\partial q}b_6\left(-\gamma(q) - b_5 s + h\right)\right) + \\ &+ \frac{1}{b_7}\left(\frac{\partial\varphi_1}{\partial s}b_1\left(P_T - E_{q0}^2 y_{11}\sin\left(\alpha_{11}\right) - E_{q0}U_c y_{12}\sin\left(\delta - \alpha_{12}\right) - w_1\right) + \frac{\partial\varphi_1}{\partial\delta}s\right). \end{aligned} \tag{5}$$

Таким образом, нами синтезированы законы управления (4), (5) для турбогенератора (1), обеспечивающие выполнение технологических инвариантов (2) и (3) и подавление внешнего кусочно-постоянного возмущения. Условия устойчивости замкнутой системы (1), (4), (5):

$$T_i > 0, i = \overline{1,3}; \quad \lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0; \ \gamma_1 > 0.$$

Результаты моделирования. Результаты моделирования замкнутой системы (1), (4), (5) с внешним кусочно-постоянным возмущением, представленны на рис. 2, приведены на рис. 3–5.

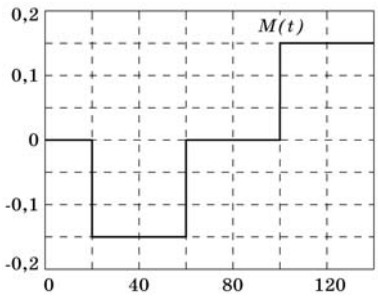

Рис. 2. График изменения внешнего возмущения $M(t)$

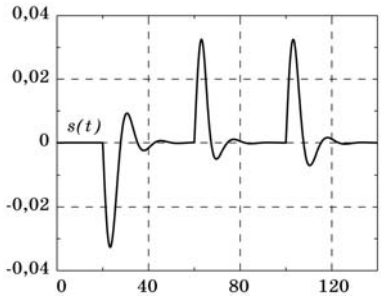

Рис. 3. График изменения скольжения $s(t)$

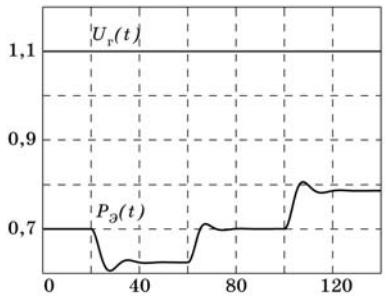

Рис. 4. Графики изменения выходного напряжения $U_Г(t)$ и электрической мощности $P_Э(t)$

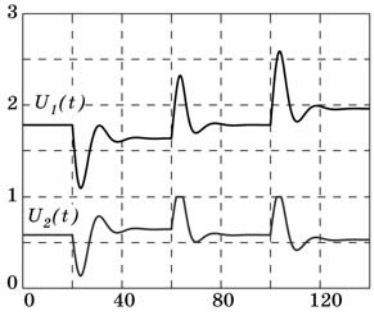

Рис. 5. Графики изменения управлений $U_1(t), U_2(t)$

Из результатов моделирования видно, что синтезированные законы управления обеспечивают выполнение целей управления: стабилизацию частоты вращения (3) и выходного напряжения СГ (2). При этом обеспечивается подавление кусочно-постоянного возмущения. Благодаря законам управления (4), (5), выходное напряжение СГ оказывается нечувствительным к этому возмущению. На основе указанных законов построены принципиально новые классы автоматических регуляторов, обеспечивающих асимптотическую устойчивость в целом замкнутых систем «турбогенератор–регулятор», их параметрическую робастность и инвариантность к внешним возмущениям. Внедрение синергетических регуляторов в практику управления турбогенераторами позволит принципиально улучшить статические и динамические свойства энергосистем в аварийных и экстремальных режимах их работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006.
2. *Колесников А.А., Кузьменко А.А. и др.* Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы. – М.: КомКнига, 2006.
3. *Козлов В.Н., Шашихин В.Н.* Синтез координирующего робастного управления взаимосвязанными синхронными генераторами // Электричество. – 2000. – № 9. – С. 20-26.
4. *Кузьменко А.А.* Синергетический синтез динамических регуляторов для энергосистем, функционирующих в условиях кусочно-постоянных возмущений // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 1.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Колесников Анатолий Аркадьевич – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, ГСП-284; тел.: 88634360707; кафедра синергетики и процессов управления; зав. кафедрой.

Кузьменко Андрей Александрович – кафедра синергетики и процессов управления; доцент.

Kolesnikov Anatoly Arkad'evich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com; GSP-284, 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360707; the department of synergetic and control processes; department head.

Kuz'menko Andrey Alexandrovitch – the department of synergetic and control processes; associate professor.