

Kolesnikov Alexander Anatol'evich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: office.ccsd@gmail.com.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634318090.

УДК 681.511.4

А.А. Кузьменко

НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ: СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

В статье на основе синергетического подхода к проблеме нелинейного системного синтеза изложен метод синтеза нелинейных законов управления для электроэнергетической системы (ЭЭС), обеспечивающих подавление внешнего кусочно-постоянного возмущения, действующего на ЭЭС со стороны энергосистемы.

Электроэнергетическая система; турбогенератор; синергетическая теория управления; инвариант; возмущение; астатический закон управления.

A.A. Kuzmenko

ELECTRICAL POWER SYSTEM NONLINEAR CONTROL: SYNERGETICS APPROACH

Basing on synergetics approach to problem of nonlinear system synthesis we expose method of electrical power system (EPS) nonlinear control laws synthesis, providing suppression of external piecewise-constant disturbance acts to EPS from the side of power system.

Electrical power system; turbogenerator; synergetics control theory; invariant; disturbance; zero-constant-error control law.

Современный мир технологий немислим без электроэнергетики. Значительное место по-прежнему занимают электростанции, работающие на твердом или жидком топливе. Наиболее распространенными генерирующими компонентами ЭЭС 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. Современные ЭЭС представляют собой комплекс различных подсистем, связанных между собой процессами интенсивного динамического взаимодействия и обмена энергией, веществом и информацией. Указанные макросистемы являются нелинейными, многомерными и многосвязными, в которых протекают сложные переходные процессы и возникают критические и хаотические режимы. Проблемы управления такими динамическими макросистемами являются весьма актуальными, чрезвычайно сложными и практически недоступными для существующих в энергетике методов автоматического управления [1, 2]. Традиционные методики построения алгоритмов управления ЭЭС обычно строятся по принципу так называемой «компенсации» нелинейностей моделей или их игнорирования, сепарирования имеющихся каналов управления, нейтрализации перекрестных связей и т.п. Подобные вынужденные искусственные приемы, вы-

званные ограниченными возможностями известных методов классической теории управления, в конечном итоге, весьма негативно сказываются на способности систем управления отвечать современным требованиям к ЭЭС с точки зрения качества производимой энергии, устойчивости ЭЭС в целом. Традиционные регуляторы ЭЭС – это ПИД-регуляторы, синтез которых осуществляется либо по линеаризованной модели объекта управления, либо по переходной функции [2]. Отсюда следует, что область применения таких регуляторов ограничивается как нормальными режимами работы ЭЭС, так и режимами, при которых действуют небольшие возмущения – область малых отклонений. При возникновении значительных отклонений от стационарных состояний (наличие больших возмущений, аварийных ситуаций) существенное влияние на поведение объекта управления оказывают нелинейности, отброшенные при линеаризации. Таким образом, настройки регулятора оказываются не адекватными исходной модели. В этой ситуации регулятор не может обеспечить сохранение асимптотической устойчивости. К тому же турбогенераторы характеризуются многорежимностью функционирования, связанной с существенным изменением нагрузки. Это означает, что одни и те же настройки регуляторов при разных режимах функционирования могут ухудшать качество процессов и результирующую устойчивость системы. Преодолеть основной недостаток традиционных регуляторов ЭЭС, связанный с фиксированностью параметров регуляторов для определенного режима, пытаются, преимущественно, используя методы нечеткой логики и искусственные нейронные сети [1]. Основным достоинством таких систем является возможность пополнения баз знаний за счет накопления опыта при обучении, а также при возникновении новых схемно-режимных условий. Однако в нечетких системах возникает проблема «проклятия размерности» – число правил пропорционально степени числа входных переменных. Проведенный обзор литературы показал, что в большинстве работ настройки нечетких регуляторов выбираются на основании опытных знаний экспертов, общих представлений о физике протекания процессов или методом проб и ошибок. Подобный подход не гарантирует нахождения оптимальных настроек регулятора, в сильной степени зависит от человеческого фактора и к тому же требует больших временных затрат.

Таким образом, в современной ситуации, обусловленной высокой степенью развития вычислительной, микропроцессорной и информационно-измерительной техники, для преодоления недостатков существующих систем управления ЭЭС и решения перечисленных выше проблем следует переходить на принципиально новые *синергетические алгоритмы управления ЭЭС*, которые учитывают следующие особенности:

- 1) структурную сложность, проявляющуюся в многомерности, многосвязности и параметрической неопределенности объектов энергосистем;
- 2) многорежимность функционирования, связанная с существенным изменением нагрузок и изменением конфигурации ЭЭС;
- 3) сильное проявление в переходных и экстремальных режимах нелинейных свойств объектов ЭЭС, что приводит к существенным погрешностям расчетов и даже к качественным искажениям результатов.

В этой связи, для построения эффективных стратегий автоматического управления турбогенераторами нами разрабатываются синергетические алгоритмы управления ЭЭС, в основе синтеза которых лежит синергетическая теория управления (СТУ) [3]. Суть СТУ заключается в формировании в фазовом пространстве синтезируемых систем целевых аттракторов, на которые неизбежно попадают все траектории движения замкнутой системы «объект–регулятор». Синергетический

подход позволяет разработать новые методы целевого воздействия на процессы самоорганизации в нелинейных динамических системах и позволяет построить универсальные объективные нелинейные законы управления, законы противоаварийного и адаптивного управления ЭЭС. При этом синергетический синтез алгоритмов управления осуществляется аналитически по наиболее полным нелинейным моделям объектов управления.

Постановка задачи управления. Запишем исходную нелинейную модель турбогенератора ЭЭС, работающего на шины большой мощности [1]:

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

здесь $\frac{d}{dt}$ – 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; $G(q)$ – функция, учитывающая ограничение на перемещение сервомотора; h – сигнал вторичного регулятора скорости турбины; U_1 – управляющее напряжение, прикладываемое к обмотке возбуждения СГ; U_2 – управляющее воздействие на вторичный регулятор скорости турбины; $M(t)$ – возмущение, действующее на турбогенератор; $b_i, i = \overline{1,7}$ – константы, связанные с постоянными времени турбогенератора и параметрами СГ и сети.

Действующее на турбогенератор внешнее возмущение $M(t)$ относится к классу кусочно-постоянных возмущений, т.е. $M(t) = M_0 = const$, здесь M_0 – амплитуда. В энергосистемах $M_0 > 0$ означает, что произошел наброс мощности (увеличение потребления мощности нагрузкой, подключение дополнительных потребителей и т.п.). Если же $M_0 < 0$, то происходит сброс мощности (например, отключение части потребителей) [2]. Согласно методу АКАР, первоначально необходимо представить возмущающее воздействие $M(t) = M_0$ как частное решение некоторого дополнительного дифференциального уравнения. При построении астатических законов управления, целесообразно сформировать модель кусочно-постоянного возмущения с учетом целей управления. Поскольку внешнее возмущение входит аддитивно во второе уравнение системы (1), а одной из целью

управления является $s=0$, то целесообразно использовать следующую модель возмущения:

$$\dot{w}(t) = \xi s,$$

где w – оценка неизмеряемого возмущения $M(t) = const$, ξ – некоторый постоянный коэффициент. Из этого выражения следует, что при стабилизации частоты вращения $s=0$, неизмеряемое внешнее кусочно-постоянное возмущение будет «подавлено».

Турбогенератор, представленный системой уравнений (1), имеет два канала управления – U_1, U_2 . Следовательно, согласно основному методу СТУ – методу аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [3], для него можно задать не более двух независимых инвариантов – аттракторов, которые формируются, исходя из решаемой турбогенератором технологической задачи:

1) стабилизация выходного напряжения СГ

$$U_{Г0} - U_{Г} = 0, \quad (2)$$

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

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

$$s = 0. \quad (3)$$

Таким образом, постановка задачи управления турбогенератором ЭЭС (1) заключается в следующем: необходимо синтезировать нелинейные законы управления U_1, U_2 , которые обеспечивают помимо выполнения целей управления – технологических инвариантов (2), (3), подавление неизмеряемого внешнего кусочно-постоянного возмущения $M(t) = M_0 = const$ и устойчивость замкнутой системы в целом.

На рис. 1-4 представлены результаты моделирования ЭЭС с синергетическими нелинейными законами управления ЭЭС [4], обеспечивающие асимптотическую устойчивость в целом замкнутой системы «турбогенератор–регулятор», выполнение технологических задач, возложенных на турбогенератор, и инвариантность к внешнему возмущению. Внедрение синергетических законов управления в практику управления турбогенераторами позволит принципиально улучшить статические и динамические свойства энергосистем в аварийных и экстремальных режимах их работы.

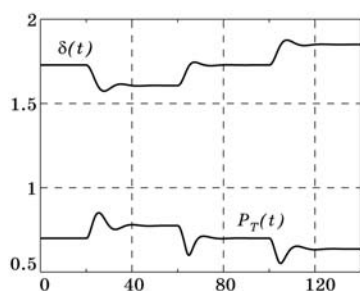


Рис. 1. Графики изменения механической мощности $P_T(t)$ и угла $\delta(t)$

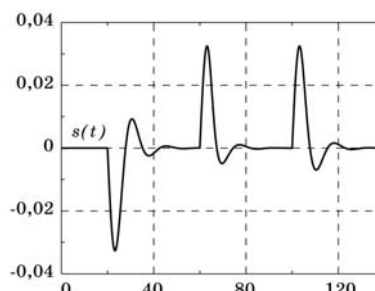


Рис. 2. График изменения скольжения $s(t)$

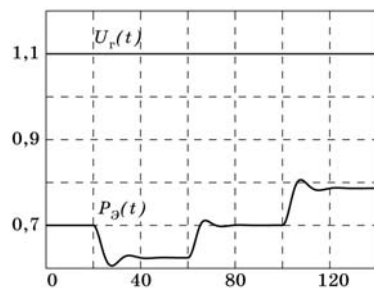


Рис. 3 Графики изменения выходного напряжения $U_{Г}(t)$ и электрической мощности $P_{Э}(t)$

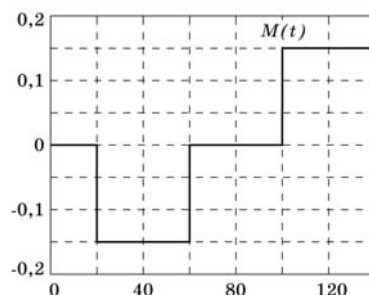


Рис. 4. График изменения внешнего возмущения $M(t)$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов В.Н., Шашихин В.Н. Синтез координирующего робастного управления взаимосвязанными синхронными генераторами // Электричество. – 2000. – № 9. – С. 20-26.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1984. – 536 с.
3. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
4. Кузьменко А.А. Синергетическое управление электроэнергетическими системами. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006.

Кузьменко Андрей Александрович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: andrew.kuzmenkosipu@gmail.com.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634318090.

Kuzmenko Andrey Alexandrovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: andrew.kuzmenkosipu@gmail.com.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: +78634318090.

УДК 621.384.3:622.412

А.В. Вовна, А.А. Зори, М.Г. Хламов

СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Разработаны структура и алгоритмы функционирования информационно-измерительной системы контроля концентрации метана в угольных шахтах.

Синтез; базисные функции; измеритель; быстродействие; точность; концентрация; метан; угольная шахта.