

**М.И. Вольников, С.В. Селезнева, В.А. Кузьмин**

## **ПРИМЕНЕНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА СИНТЕЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРАМИ**

*Рассматривается возможность совершенствования автоматизированной системы управления турбогенератором в пиковых режимах для улучшения показателей устойчивости, повышения быстродействия и экономичности работы энергосистем. Для реализации управления предлагается использовать нелинейные модели объекта управления и проводить синтез системы управления методами на новых концептуальных основах, позволяющие учесть явления взаимосвязанности и нелинейности процессов в энергоагрегатах.*

Турбогенератор, синергетический метод синтеза, система управления, система возбуждения, законы управления, адекватность, методы управления, повышение быстродействия

**M.I. Volnikov, S.V. Selezneva, V.A. Kuzmin**

## **APPLICATION OF SYNERGETICS METHOD OF SYNTHESIS FOR UPGRADING OF MANAGEMENT BY TURBOGENERATORS**

*In the article the ways of perfection of control system are shown by a turbogenerator in the different modes. As a result there is an increase of stability, fast-acting and economy of work of the power systems. For realization of management it is suggested to use the nonlinear models of management object and conduct the synthesis of control system methods on new conceptual bases, allowing to take into account the phenomena of associateness and non-linearity of processes in power aggregates.*

Turbogenerator, synergetics method of synthesis, control system, system of excitation, management laws, adequacy, management methods, increase of fast-acting

Частота вращения энергоагрегатов определяет частоту переменных напряжения и тока, являющуюся показателем качества электроэнергии. Согласно нормативам, указанным в приказе №524 «О повышении качества первичного и вторичного регулирования частоты электрического тока в ЕЭС России» по РАО ЕЭС от 18.09.2002 г., отклонения частоты не должны превышать значения  $f = \pm 0,05$  Гц в нормальных и  $\pm 0,2$  Гц в аварийных условиях ( $f_{\text{ном}} = 50$  Гц). Указанное практическое постоянство частоты переменного тока обуславливает необходимость обеспечения постоянства частоты вращения всех энергоагрегатов, работающих параллельно, что достигается автоматическим регулированием частоты вращения и связанной с ней активной мощности энергоагрегатов.

В настоящее время на отечественных синхронных турбогенераторах широко распространены системы управления возбуждением, разработанные в 70-80-х годах прошлого столетия и основанные на применении аналоговых конструктивных решений. Проведенный анализ систем управления турбогенераторами на ТЭЦ-1 ТГК-6 вывел следующие недостатки:

- устаревшая элементная база;
- несоответствие технических характеристик системы уровню, соответствующего ГОСТ 21558-2000, который был введен в связи с выходом России на международный рынок и повышения требований к качеству электроэнергии;
- низкое быстродействие системы управления;

– неадекватность линеаризованных моделей систем управления в пиковых и аварийных ситуациях.

Для устранения перечисленных недостатков возникла необходимость в разработке автоматизированной системы управления турбогенератором на основе микропроцессорной элементной базы в пиковых и аварийных режимах, для улучшения показателей устойчивости, повышения быстродействия, качества и экономичности работы энергосистем.

Для управление частотой и мощностью турбогенератора возможны следующие методы управления:

- одноканальное – путем воздействия на турбину, при неизменном возбуждении синхронного генератора;
- двухканальное – согласованное управление возбуждением турбогенератора и механической мощностью его турбины.

Нелинейные методы синтеза систем управления частотой и мощностью электроэнергетической системы (ЭЭС) такие, как метод с использованием функций Ляпунова интервального типа и координирующее управление на основе принципа сравнения, так или иначе, опираются на линеаризованные на интервале исходные нелинейные модели ЭЭС. Поэтому система управления обеспечивает выполнение целей управления и устойчивость системы только в области адекватности интервальной модели. В этих методах управление частотой вращения и активной мощностью турбогенераторов ЭЭС осуществляется только по одному каналу – воздействием на турбину, т.е. подразумевается, что управление возбуждением синхронным генератором (СГ) является неизменным и ЭДС СГ  $E_{qi} = const$ . Поэтому использование двухканального согласованного управления турбогенератором, работающим на энергосистему большой мощности, позволяет существенно повысить динамические свойства ЭЭС и избежать вырожденных режимов движения (соответственно особых управлений).

Об использовании двухканального согласованного управления турбогенератором, особенно в аварийных режимах, в своих работах указывал и профессор В.А. Веников [1]. Поэтому необходимо одновременное согласование управления возбуждением турбогенератора и механической мощностью его турбины от одного комплексного управляющего устройства.

В настоящее время системы управления частотой вращения и активной мощностью энергоагрегатов, как правило, проектируются в виде отдельных линейных подсистем. Линеаризованные системы адекватны только в небольшой области отклонения от установившегося состояния. В пиковых и аварийных ситуациях, когда энергоагрегаты работают в режимах больших отклонений, значительно проявляются их нелинейные свойства. Это означает, что для эффективного управления необходимо рассматривать нелинейные модели объекта на всем интервале изменения параметров системы и проводить синтез системы управления методами, которые в полной мере позволяют учесть явления взаимосвязанности и нелинейности процессов в энергоагрегатах.

Для синтеза векторных законов управления энергоагрегатами с учетом нелинейных моделей динамики, необходимо переходить на новые концептуальные основы. Такой концепцией является синергетическая теория управления, развитая в трудах профессора А.А. Колесникова [2]. Принципы и методы новой синергетической теории управления, базируются на концепции направленной самоорганизации и динамической декомпозиции многомерных систем. Идея использования синергетического подхода в управлении состоит в переходе от непредсказуемого поведения по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению вдоль желаемых инвариантов - целевых аттракторов (синергии), к которым подстраиваются все остальные переменные системы

Методы синергетической теории управления позволяют в аналитическом виде получить законы управления для нелинейных многомерных, многосвязных объектов, к которым, собственно, и относятся энергоагрегаты.

При синтезе законов управления турбогенератором может быть использована следующая общепринятая динамическая модель турбогенератора [1]:

$$\begin{aligned} d\delta/dt &= s; \\ T_j ds/dt &= P_T - E^2 y_{11} \sin \alpha_{11} - E U_c y_{12} \sin(\delta - \alpha_{12}) + F(t); \\ T_{d0} dE/dt &= -E + U_c y_{12} T_{d0} (x_d - x'_d) s \sin(\delta - \alpha_{12}) + U_1; \\ T_c dP_T/dt &= -P_T - s/\sigma + U_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\delta$  – угол между ЭДС СГ и напряжением сети;  $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$  – скольжение;  $E$  – синхронная ЭДС СГ по оси  $q$ ;  $P_T$  – механическая мощность турбины;  $U_1$  – управление по каналу возбуждения (напряжение, прикладываемое к обмотке возбуждения СГ);  $U_2$  – управление по каналу регулирования частоты вращения турбины;  $F(t)$  – внешнее возмущение;  $\omega_0$  – частота сети;  $y_{11}, y_{12}$  – модуль собственной и взаимной проводимости СГ соответственно;  $\alpha_{11}, \alpha_{12}$  – дополнительный угол соответственно собственной и взаимной проводимости СГ;  $x_d, x'_d$  – синхронное и переходное сопротивление СГ по оси  $d$ ;  $T_{d0}$  – постоянная времени обмотки возбуждения,  $T_{\bar{n}}$  – постоянная времени первичного регулятора скорости турбины,  $T_j$  – постоянная времени инерции турбогенератора;  $U_c$  – напряжение сети;  $\sigma$  – коэффициент статизма (отношение изменения числа оборотов энергоагрегата к вызвавшему его изменению нагрузки) первичного регулятора турбины.

Введя переменные состояния в (1):

$$x_1 = \delta; x_2 = s; x_3 = E; x_4 = P_T$$

и обозначив:

$$\begin{aligned} a_1 &= y_{11} \sin \alpha_{11}; a_2 = U_c y_{12}; a_3 = U_c y_{12} T_{d0} (x_d - x'_d); a_4 = 1/\sigma; \\ b_1 &= 1/T_j; b_2 = 1/T_{d0}; b_3 = 1/T_c, \end{aligned}$$

с учетом введенных переменных и констант получаем систему нелинейных дифференциальных уравнений с двумя каналами управления, описывающие динамику турбогенератора

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= x_2; \\ dx_2/dt &= b_1 (x_4 - a_1 x_3^2 - a_2 x_3 \sin(x_1 - \alpha_{12}) + F(t)); \\ dx_3/dt &= b_2 (-x_3 + a_3 x_2 \sin(x_1 - \alpha_{12}) + U_1); \\ dx_4/dt &= b_3 (-x_4 + a_4 x_2 + U_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Задача синтеза векторного закона управления состоит в необходимости нахождения  $U_1$  и  $U_2$ , которые бы:

- 1) обеспечивали стабилизацию частоты вращения и ЭДС турбогенератора;
- 2) гарантировали асимптотическую устойчивость замкнутой системы в целом;
- 3) обеспечивали необходимое демпфирование переходных процессов.

Рассмотрим один из вариантов синтеза системы  $F(t) = 0$  (отсутствие внешнего возмущения)

Для него можно задать не более двух независимых инвариантов [2], набор которых формируется исходя из решаемой турбогенератором технологической задачи. Например, при стабилизации ЭДС турбогенератора [3]

$$x_3 - x_3^0 = 0,$$

где  $x_3^0$  – заданное значение ЭДС турбогенератора.

Законы управления примут вид [4]:

$$\begin{aligned} U_1 &= k_0 x_3 + k_1 (x_3 - x_3^0) + k_2 x_4 + k_4 (x_1 - x_1^0) + k_5 x_2 + (k_6 x_2 - k_7) \sin(x_1 - \alpha_{12}) - k_8; \\ U_2 &= k_9 x_4 + k_{11} (x_3 - x_3^0) + k_{10} x_3^2 - k_{16} (x_1 - x_1^0) + k_{17} x_2 + (k_{12} x_3 + k_{13}) \sin(x_1 - \alpha_{12}) + \\ &+ k_{18} x_2 \cos(x_1 - \alpha_{12}) + k_{19} \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} p_0 &= b_{11} b_{22} - b_{12} b_{21}; p_1 = 1/(p_0 b_2); p_2 = b_{11} b_{22}/T_2 - b_{11} b_{22}/T_1; p_3 = b_{12} b_{22}/T_2 - b_{12} b_{22}/T_1; \\ p_4 &= \gamma/(b_1 T_3); p_5 = p_4((T_3 \gamma + 1)/T_3); p_6 = \gamma/(b_3 T_3); p_7 = p_6((T_3 \gamma + 1)/T_3); \\ p_8 &= b_{11} b_{22}/T_2 - b_{12} b_{21}/T_1; p_9 = 1/(p_0 b_3); p_{10} = 1 - p_7 - p_8 p_9; p_{11} = b_{11} b_{21}/T_2 - b_{11} b_{21}/T_1; \\ p_{12} &= p_6/(b_0 b_1); p_{13} = a_4 - p_7 p_8 p_9/b_1 - p_0 p_{12}; k_0 = p_0; k_1 = p_1 p_2; k_2 = p_1 p_3; k_4 = k_1 p_4; k_5 = k_2 p_5; \\ k_6 &= -p_0 a_3; k_7 = -k_2 a_3; k_8 = k_2 (x_3^0)^2; k_9 = p_{10}; k_{10} = a_1 p_7; k_{11} = p_9 p_{11}; k_{12} = a_2 p_7; k_{13} = p_8 p_9 a_2 x_3^0; \\ k_{16} &= p_8 p_{12}; k_{17} = p_{13}; k_{18} = a_2 x_3^0/b_3; k_{19} = p_8 p_9 a_1. \end{aligned}$$

Следует отметить, что использование нелинейных моделей для синтеза синергетических законов управления позволяет учесть естественно-физические свойства объекта управления, а также за счет нелинейности модели увеличить быстродействие системы управления, что невозможно в линейных системах.

В реальных энергосистемах турбогенераторы часто подвержены внешним возмущениям  $F(t)$ . При этом наихудшим типом возмущений являются низкочастотные гармонические возмущения, т.к. они способствуют появлению системных колебаний.

Для решения этой задачи, необходимо расширить фазовое пространство невозмущенного объекта дифференциальными уравнениями

$$dw_1/dt = w_2; dw_2/dt = -\Omega^2 w_1; F(t) = w_1(t), \quad (4)$$

которые описывают указанные возмущения.

Уравнения объекта управления получаются путем расширения системы уравнений (2) уравнениями возмущения (4), где  $w_1, w_2$  – переменные состояния модели возмущения,  $\Omega$  – частота возмущения.

Сравнительный анализ результатов моделирования турбогенератора с традиционным ПИ-законом регулирования и синергетическими законами управления (рисунок 1) показывает преимущества синергетического подхода, которые заключаются в следующем:

- замкнутая система асимптотически устойчива в целом, т.е. во всей физически допустимой области изменения координат турбогенератора;
- система обладает повышенным быстродействием при меньшей колебательности, что говорит о непротиворечивости целей управления в режимах малых и больших отклонений;
- система управления обеспечивает компенсацию гармонического возбуждения, влияние которого не отражается на скольжении и напряжении СГ.

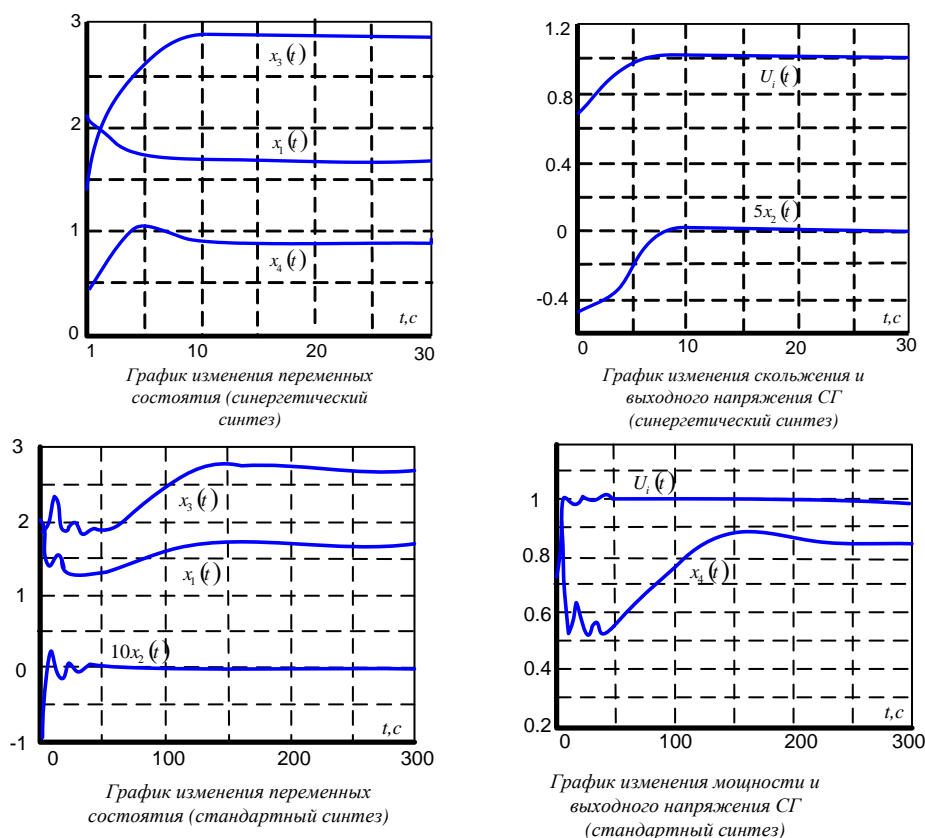


Рисунок 1 – Результаты моделирования турбогенератора

Таким образом, синтезированные базовые законы синергетического управления позволяют построить новый класс векторных регуляторов частоты и мощности, обеспечивающих высокие динамические свойства турбогенераторов в режимах больших и малых отклонений и в условиях действия внешних резонансных возмущений.

Рассмотренные методы позволяют устранить вышеизложенные недостатки, существующие в системах управления турбогенераторами, повысить их надежность, быстродействие и качество электроэнергии.

1 Энергетические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем / В.А. Веников [и др.]; под ред. В.А. Веникова, Э.Н. Зуева и М.Г. Портного. – М.: Высшая школа, 1982.

2 Современная прикладная теория управления. Ч II: Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.

3 Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы / А.А. Колесников [и др.]. – М.: Едиториал УРСС/КомКнига, 2006.

1 Power systems: Management by transient behaviors of the electroenergy systems / V.A. Venikov [and other]; under a release of V.A. Venikov, E.N. Zuev and M.G. Portnov. – M: Higher school, 1982.

2 Modern applied theory of management. P.II: Synergetics approach is in the theory of management / Under a release of A.A. Kolesnikov. – Taganrog: P.h. TRTU, 2000.

3 Synergetics methods of management by the difficult systems: power systems / A.A. Kolesnikov [and other]. – M.: Editorial URSS/KomBook, 2006.

Вольников Михаил Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление» Пензенской государственной технологической академии  
Тел: +79273651772(сот), 8(8412)-49-61-59 (кафедра «Автоматизация и управление», ПГТА)

Селезнева Светлана Вячеславовна – аспирант, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и управление» Пензенской государственной технологической академии

Кузьмин Владислав Алексеевич – студент Пензенской государственной технологической академии

Mikhail I. Volnikov – Ph.D., Associate Professor Department of Automation and control, Penza State Technological Academy

Svetlana V. Selezneva – Postgraduate, Department of Automation and control, Penza State Technological Academy

Vladislav A. Kuzmin – student of Penza State Technological Academy