УДК 681.51

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НЕЛИНЕЙНОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОГЕНЕРАТОРОМ

Ниязов Нуридин Тажибаевич, *к.т.н., профессор, КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 721000, г. Кара-Куль, ул. Сабирова 2, e-mail:* ***niiazov54@mail.ru*** *ORCID ID 0000-0001-8188-2305*

Бакасова Айна Бакасовна*, д.т.н., доцент, Институт автоматики и информационных технологий национальной академии наук КР, Кыргызстан, 720071, г. Бишкек, пр. Чуй 265, e-mail: bakasovaaina@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-5514-893X*

Аннотация: Важной особенностью современной электроэнергетической системы (ЭЭС) является одновременность процессов производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии, быстрота протекания переходных процессов, а также, как правило функционирует в условиях воздействия внешних и внутренних возмущений, что может приводить к нарушению динамической устойчивости. Нужно отметить, что преимущественно нелинейный характер энергообъектов (ЭО), обусловлено применением существенно нелинейных регулирующих устройств и элементов во всей структуре современной ЭЭС. Использование возобновляемой энергии и необходимость учета возмущений требуют принципиально нового синерго-кибернетического подхода к нелинейному адаптивному управлению системами «гидротурбина – синхронный генератор». Показан синергетический синтез нелинейных адаптивных законов управления гидротурбиной и возбуждением синхронного генератора электроэнергетической системы в соответствии с принципом интегральной адаптации синергетической теории управления. Полученные законы управления обеспечивают выполнение технологических инвариантов – стабилизацию напряжения и синхронную работу с сетью, подавление внешнего и параметрического возмущений.

Ключевые слова: нелинейное адаптивное управление, синергетическая теория управления, синерго-кибернетический подход, интегральная адаптация, инвариант, аттрактор, синхронный генератор, гидротурбина.

SYNERGETIC TECHNOLOGY FOR THE NONLINEAR ADAPTIVE CONTROL OF HYDROGENERATORS

Niiazov N.T.*, PhD in Technical Sciences, professor, KSTU named after I.Razzakov, Kyrgyzstan, Kara-Kul, 721000, Sabirova st. 2,* ***e-mail:*** *niiazov54@mail.ru* ***ORCID ID 0000-0001-8188-2305***

Bakasova A.B.*, doctor of technical sciences, associate professor, Institute of Automation and Information Technologies of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Kyrgyzstan, 720071, Bishkek, Chui Ave. 265, e-mail: bakasovaaina@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-5514-893X*

Abstract: An important feature of the modern electric power system (EPS) is the simultaneity of processes of production, conversion, transmission, distribution and consumption of electrical energy, the speed of transient processes, and also, as a rule, operates under the conditions of external and internal disturbances, which can lead to a disruption of the dynamic sustainability. It should be noted that the predominantly non-linear character of energy objects (EO) is due to the use of essentially non-linear regulating devices and elements in the entire structure of modern EPS. The use of renewable energy and the need to take into account perturbations require a fundamentally new synergistic-cybernetic approach to nonlinear adaptive control of the systems "hydro turbine - synchronous generator". Synergetic synthesis of nonlinear adaptive laws governing the hydro

turbine and excitation of a synchronous generator of the electric power system is shown in accordance with the principle of integral adaptation of the synergetic control theory. The obtained control laws ensure the performance of technological invariants - voltage stabilization and synchronous operation with the network, suppression of external and parametric disturbances.

Keywords: nonlinear adaptive control, synergetic control theory, synergistic-cybernetic approach, integral adaptation, invariant, attractor, synchronous generator, hydro turbine.

Введение. Гидроэнергетика является важным и жизненно необходимым возобновляемым ресурсом энергии, что наиболее важно в связи с существенным ростом потребления электрической энергии в XXI веке. Гидравлические электрические станции (ГЭС) относятся к наиболее эффективным источникам электроэнергии, так как используют для её производства непрерывно возобновляемую водную энергию. На ГЭС вырабатывается более 90% всей потребляемой в Кыргызской Республике электроэнергии.

Наиболее распространенными базовыми ЭО современных ЭЭС являются турбо- и гидрогенераторы. Их основными свойствами являются нелинейность, многомерность, колебательность и динамическая взаимосвязь между турбиной и синхронным генератором (СГ). Свойство колебательности проявляется в самораскачивании, самовозбуждении СГ, появление автоколебаний, но особенно наихудшим случаем является воздействие на СГ внешних низкочастотных гармонических и кусочно-постоянных возмущений, которые могут способствовать появлению системных колебаний, что в свою очередь, приводит к нарушению устойчивости ЭЭС, асинхронному ходу и развитию системной аварии [13].

Основными типовыми внешними возмущениями в реальных ЭЭС являются гармонические и кусочно-постоянные. К ним относятся - отключение мощных нагрузок или трансформаторов, линии электропередачи, короткие замыкания, лавина частоты и напряжения, перетоки мощности на межсистемных связях ЭЭС, параметрические возмущения, самораскачивание, самовозбуждение. Кусочно-постоянное возмущение $M(t)$, действующее на СГ,говорит о том, что на разных интервалах времени это возмущение принимает постоянное значение $M(t) = M_0 = const$, здесь M_0 - амплитуда [6]. В ЭЭС $M_0 < 0$ означает, что произошел наброс мощности (отключения части источников питания, например, И1 (рис. 1) [2], увеличение потребляемой мощности или подключение дополнительных нагрузок). Если $M_0 > 0$, то происходит сброс мощности, т.е. отключение части потребителей, например, П1 (рис. 1).

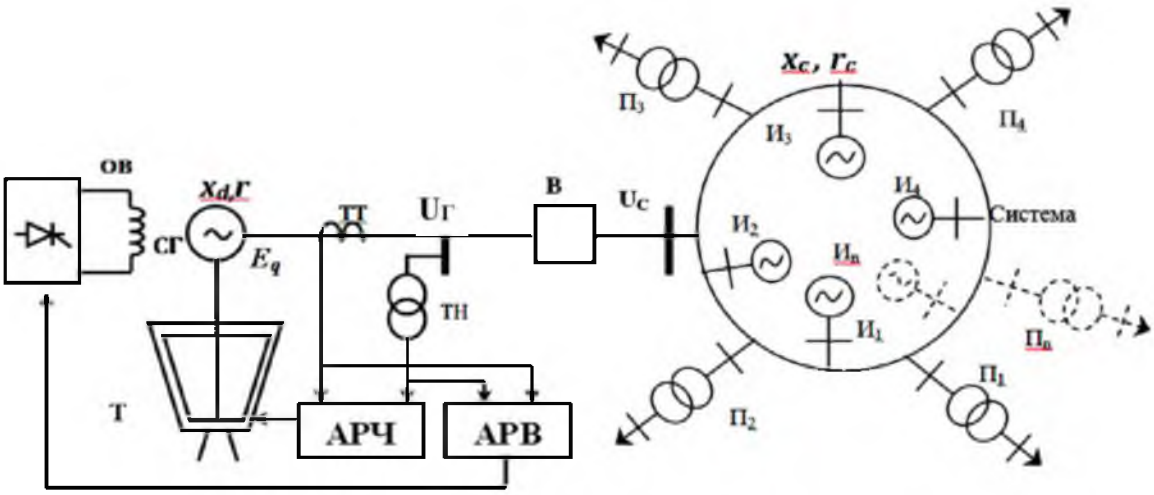

Рис. 1. Схема ЭЭС с внешними возмущениями

ГЭС представляет собой чрезвычайно сложную нелинейную систему, поскольку она включает в себя подсистемы трёх типов: гидравлическую, механическую и электрическую. В

связи с широким применением ГЭС в качестве инструмента регулирования нагрузки в ЭЭС, гидроагрегаты подвержены частым сменам режимов работы [16]. При этом в проточном тракте этих ГЭС развиваются переходные процессы, характеризующиеся сильными нелинейными колебаниями расхода и давления, которые представляют серьезную опасность для станций. В связи с этим задача изучения методов управления гидротурбинами и учет нелинейных явлений в проточном тракте ГЭС, является актуальным.

Регулирование гидротурбин имеет много общего с регулированием других двигателей (паровые и газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания и др.), однако условия работы системы регулирования гидротурбины значительно сложнее и отличаются рядом специфических особенностей. Рассмотрим физические сущности этих особенностей.

Кавитация в гидротурбинах. Кавитация представляет собой сложное физическое явление. Различают две фазы: во-первых, выделение из воды растворенного в ней воздуха в виде пузырьков и образование пара в тех местах потока, где давление понижается до давления парообразования так, что в потоке возникают полости или каверны, заполненные пузырьками пара и воды, и во-вторых, конденсация пара в указанных кавернах, когда они, снесённые потоком, попадают в зону повышенного давления [3].

При сильном развитии кавитация охватывает всю область рабочего колеса и в очень короткий срок разрушает его и окружающие его детали. Кроме разрушения деталей, находящихся в зоне кавитации, снижается КПД, пропускная способность рабочего колеса и мощность турбины. Явление кавитации сопровождается характерным треском, шумами и резкими ударами. В больших турбинах удары при кавитации иногда вызывают сотрясение фундамента и здания станции. При некоторых формах кавитации, особенно в радиально-осевых турбинах, в проточной части возникают низкочастотные пульсации давления с большой амплитудой, приводящие к опасным вибрациям всего агрегата и здания ГЭС [18].

При больших нагрузках и бескавитационных режимах работы турбины впуск воздуха менее желателен, так как при этом возможно снижение мощности и КПД турбины. Вопрос о необходимости впуска воздуха из-за вибраций и для смягчения кавитации обычно решается опытным путем во время наладки агрегата перед сдачей его в эксплуатацию. Исследуются зависимости кавитационного шума гидротурбин от открытия направляющего аппарата (НА) при различных напорах. После обработки и анализа полученных данных, определяют характерные зоны более благоприятных условий для работы агрегата. В этих зонах достаточно высокие значения КПД, умеренные вибрации и пульсации давления [21,25].

Гидравлический удар. Через регулирующий орган гидротурбины проходит большое количество воды. Для крупных гидротурбин расход воды достигает нескольких сот кубических метров в секунду, что приводит к большим размерам регулирующих органов. Кроме того, при сбросе нагрузки НА реактивной турбины возникает разрежение в полости рабочего колеса, достигающее в некоторых условиях полного вакуума. При этом может произойти разрыв потока. Особенно велико разрежение в гидротурбинных установках с относительно длинной отсасывающей трубой и относительно коротким напорным трубопроводом. Вслед за понижением давления полость рабочего колеса заполняется водой, движущейся из отсасывающей трубы к зоне разрежения (обратная волна) с достаточно высокой скоростью. Удар обратной волны о рабочее колесо может привести к разрушению турбины.

Гидравлический удар вызывает изменение давления (напора) воды, что придает работе системы регулирования гидротурбин дополнительные особенности, которые накладывают определенные ограничения на работу системы регулирования гидротурбины [3]. Для предотвращения такого явления, как гидроудар на турбинах устанавливаются клапаны срыва вакуума. При резком и быстром движении в сторону закрытия НА, эти клапаны автоматически открываются и впускают в полость рабочего колеса воздух под атмосферным давлением. Вакуум под рабочим колесом срывается, и удар от обратной волны смягчается [3].

Эффект гидравлического удара ставит проблему управления еще более остро. Традиционные для этих систем ПИД-регуляторы и линейные методы оптимального управления, которые синтезируются в соответствии с линеаризованной моделью системы, в определенных условиях, могут быть неэффективны, особенно при довольно различных условиях эксплуатации и при наличии возмущений. При достаточно сильных возмущениях такие линейные регуляторы могут даже оказывать негативное воздействие на общую устойчивость системы. Это обуславливает необходимость применения вместо традиционных принципов и методов управления ЭО ЭЭС принципиально новых – синерго-кибернетических [7,8], которые характеризуются использованием наиболее полных нелинейных многомерных и многосвязных моделей, обеспечивают в управляемой системе выполнение желаемых технологических инвариантов – аттракторов, повышение устойчивости (технологической безопасности) ЭЭС.

Для линейных систем адаптивное управление, как правило, строится в соответствии с классическими методами линейной теории адаптивного управления. В настоящее время адаптивность и робастность систем управления обеспечивается за счет совместного применения традиционных линейных регуляторов и методов H_∞-управления, искусственных нейронных сетей [5 ,9, 17, 20] или методов теории нечетких систем управления. В последнее время нелинейная теория управления добилась значительного прогресса в области энергетики. В [14] отмечается, что за последнее время методы нелинейной теории управления находят все большее применение в области управления ЭО ЭЭС. Так во введении к статьям [22, 23] к современным нелинейным методам теории управления, наиболее часто используемым для построения робастных систем управления ЭО ЭЭС, в том числе систем возбуждения СГ, отнесены прямой метод Ляпунова, метод линеаризации обратной связью, метод пассификации, метод энергетических функций др. Авторы [23] предлагают использовать скользящие режимы для обеспечения робастности ЭЭС к возмущениям.

В работе [15] нелинейное управление используется для управления турбиной генератора, позволяя заметно улучшить динамическую устойчивость системы. Однако в этой и большинстве других работ не рассматриваются возмущения, которые могут оказывать очень большое влияние на устойчивость нелинейных систем. В самом деле, реальные системы постоянно подвержены внутренним (параметрическим) и/или внешним возмущениям со стороны технологической и природной среды. Неопределенные параметры и изменчивая структура системы должны рассматриваться как внутренние возмущения. Таким образом, так называемые робастные законы управления должны принимать эти возмущения во внимание.

В работе в области робастного управления [4], рассмотрено построение робастного SIMO-регулятора для нелинейной модели гидрогенератора. Синтезированный с помощью полиномиальной H_∞-оптимизации регулятор, предназначен для управления скоростью гидротурбины. Данный подход демонстрирует лучшее качество управления, нежели классические ПИ и ПИД-регуляторы, но тем не менее, из-за высокого порядка полученного робастного регулятора, он является довольно сложным и, следовательно, сомнительным с практической точки зрения [8].

В условиях воздействия наихудших возмущений (гидроудар, кусочно-постоянное, гармоническое) возникает необходимость построения нелинейных законов управления гидротурбиной, которые при минимальной информации о структуре внешних воздействий поддерживали бы устойчивость гидротурбины в целом и постоянство частоты вращения ротора гидротурбины [10]. В этой связи наилучшим решением представляется переход на новые концептуальные основы, используя возможности новых перспективных направлений современной теории управления и идеологию нелинейной динамики и синергетики.

Принципиально новым подходом в современной теории управления является синерго-кибернетический подход, который базируется на обеспечении устойчивости движения объекта за счет соответствующего синтеза нелинейных законов адаптивного управления, обеспечивающих как выполнение целей управления – технологических инвариантов, так и компенсацию внешних и/или параметрических возмущений, и максимальную область асимптотической устойчивости замкнутой системы. Синергетическая теория управления (СТУ) – впервые развита научной школой проф. А.А. Колесникова Южного федерального университета РФ и нашла широкое применение в различных областях современной техники – авиации, энергетике, электромеханике и др. [7, 8, 10, 19]. Основные особенности СТУ применительно к проблеме синтеза нелинейных законов управления сложными техническими объектами состоят, во-первых, в кардинальном изменении целей поведения синтезируемых систем; во-вторых, в непосредственном учете естественных свойств нелинейных объектов; в-третьих, в формировании нового механизма генерации обратных связей, т.е. законов управления [24]. В СТУ имеются два способа обеспечения адаптивности нелинейной системы к внешним и параметрическим возмущениям. Первый способ – это использование принципа интегральной адаптации СТУ [8, 10, 19], который заключается во введении в закон управления нелинейных интеграторов, компенсирующих возмущения без их оперативной оценки. Второй способ – построение нелинейных наблюдателей возмущений, осуществляющих оценивание возмущений [7, 8, 10, 19]. Оба способа формализованы и опираются на метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) СТУ.

Целью данной работы является демонстрация использования принципа интегральной адаптации метода АКАР СТУ для синтеза нелинейных адаптивных законов управления системой «гидротурбина – СГ», обеспечивающих выполнение желаемых целей управления (технологических инвариантов) и подавление внешних и параметрических возмущений, выполненной в работах [11, 12].

Согласно идеологии метода АКАР для парирования внешних и параметрических возмущений необходимо каждое из них представить в виде динамической модели, на выходе которой формируется аппроксимированное возмущение соответствующего класса. При этом в структуру этих моделей согласно принципу интегральной адаптации должны входить финишные макропеременные, включающие желаемые инварианты [7, 8, 10, 19]. В работе [10] отмечено, что поскольку любое возмущение можно представить как суперпозицию кусочно-постоянных возмущений, при построении расширенной системы уравнений объекта управления для синергетического синтеза гарантирующих регуляторов необходимо представлять возмущения $z_i(t)$, как совокупность последовательно включенных взаимосвязанных интеграторов.

Так если рассматриваются кусочно-постоянные возмущения, тот такими моделями будут уравнения:

$$\frac{dz_i}{dt} = \psi_i \xi_i, \tag{1}$$

где z_i – динамическая переменная модели (оценка возмущения), ψ_i – финишная макропеременная, ξ_i – постоянный коэффициент. Действительно, при выполнении желаемых инвариантов $\psi_i = 0$ из (1.4) следует, что $z_i(t) = const$. Отметим, что если вместо (1) для модели отдельного возмущения рассмотреть систему из двух интеграторов, то синтезированные законы управления обеспечат подавление как кусочно-постоянных, так и линейных возмущений [6, 8]:

$$\frac{dz_i}{dt} = z_k;$$

$$\frac{dz_k}{dt} = \psi_i \xi_i,$$

Постановка задачи. В качестве модели СГ, работающего на систему неограниченной мощности через ЛЭП с чисто активным сопротивлением, примем следующую нелинейную модель [11, 12]:

$$\begin{cases} U_d = -ri_d - \omega L_q i_q - L_d \dfrac{di_d}{dt} - k_{Mf} \dfrac{di_f}{dt}; \\ U_q = \omega L_d i_d + \omega k_{Mf} i_f - ri_q - L_q \dfrac{di_q}{dt}; \\ -u_f = -r_f i_f - k_{Mf} \dfrac{di_d}{dt} - L_f \dfrac{di_f}{dt}; \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{H} P_m - \left(P_m - \left(-L_q i_q i_d - (L_d i_d + k_{Mf} i_f) i_q \right) - D\omega \right); \\ \dfrac{d\delta}{dt} = \omega - 1, \end{cases} \tag{2}$$

где i_d, i_q – токи статора по осям d и q; i_f – ток возбуждения ротора; ω, δ – частота вращения ротора и электрический угол генератора соответственно; D – демпферный коэффициент; u_f – напряжение возбуждения ротора (управление СГ); H, r, L_q, L_d – параметры статора СГ; r_f, L_f, k_{Mf} – параметры обмотки возбуждения СГ; P_m – механическая мощность на валу СГ.

Напряжение на выводах СГ (терминальное напряжение) U_t связано с переменными состояния системы (2) следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} U_t^2 &= \sqrt{U_d^2 + U_q^2}; \\ U_d &= -U_\infty \sin\delta + L_e i_d + L_e i_q \omega; \\ U_q &= +U_\infty \sin\delta + L_e i_q - L_e i_d \omega, \end{aligned} \tag{3}$$

где L_e - индуктивность ЛЭП, U_∞ - напряжение на шинах бесконечной мощности. Тогда уравнения (2) представим в форме:

$$\begin{cases} \dfrac{di_d}{dt} = a_0 u_f + a_1 i_f + a_2 U_\infty \sin(\delta) + a_3 i_d + a_4 \omega i_q + N(t); \\ \dfrac{di_f}{dt} = a_5 i_q \omega + a_6 i_d + a_7 i_f + a_8 u_f + a_9 U_\infty \sin\delta + N(t); \\ \dfrac{di_q}{dt} = a_{10} U_\infty \cos\delta + a_{11} i_q + a_{12} \omega i_d + a_{13} \omega i_f + N(t); \\ \dfrac{d\omega}{dt} = a_{14} \left((P_m + M(t)) + a_{15} i_q i_d - \left(a_{16} i_d + a_{17} i_f \right) - D\omega \right); \\ \dfrac{d\delta}{dt} = \omega - 1, \end{cases} \tag{4}$$

где $M(t)$ – внешнее кусочно-постоянное возмущение, отражающее изменение нагрузки СГ (подключение/отключение потребителей электроэнергии); $N(t)$ – параметрическое кусочно-постоянное возмущение, отражающее изменение топологии сети за счет изменения U_∞; a_j – постоянные коэффициенты, связанные с параметрами статора и ротора СГ.

Динамика гидротурбины описывается моделью, учитывающей эффект гидроудара [11, 12]:

$$\begin{cases} \dot{P}_m(t) = 2/T_w\left(-P_m + m - T_w\dot{m}(t)\right); \\ \dot{m}(t) = 1/T_s\left(-m + m_0 + u_1\right), \end{cases} \tag{5}$$

где m – величина открытия водяного шлюза (перемещение лопат направляющего аппарата), u_1 – сигнал управления сервоприводом гидротурбины, который открывает шлюз или направляющий аппарат (перемещение штока сервомотора), T_w, T_s, m_0 – параметры гидротурбины.

Изменение топологии электрической сети будет влиять на правые части первых трех уравнений системы (4), а изменение момента на валу СГ выражается в аддитивной компоненте к правой части четвертого уравнение этой системы. Расширенную модель синергетического синтеза получим, объединив уравнения (2-5) записанные в форме Коши:

$$\begin{cases} \dfrac{di_d}{dt} = a_0u_f + a_1i_f + a_2U_\infty\sin\delta + a_3i_d + a_4\omega i_q + z_1; \\ \dfrac{di_f}{dt} = a_5i_q\omega + a_6i_d + a_7i_f + a_8u_f + a_9U_\infty\sin\delta + z_1; \\ \dfrac{di_q}{dt} = a_{10}U_\infty\cos\delta + a_{11}i_q + a_{12}\omega i_d + a_{13}\omega i_f + z_1; \\ \dfrac{d\omega}{dt} = a_{14}\left(P_m + a_{15}i_qi_d - \left(a_{16}i_d + a_{17}i_f\right) - D\omega\right) + z_2; \\ \dfrac{d\delta}{dt} = \omega - 1; \\ \dfrac{dP_m}{dt} = \dfrac{2}{T_w}\left(-P_m + m - T_w\dfrac{dm}{dt}\right); \\ \dfrac{dm}{dt} = \dfrac{1}{T_s}\left(-m + m_0 + u_1\right); \\ \dfrac{dz_1}{dt} = \psi_1\xi_1; \\ \dfrac{dz_2}{dt} = \psi_2\xi_2, \end{cases} \tag{6}$$

где z_1, z_2 – переменные состояния моделей кусочно-постоянных возмущений $M(t)$ и $N(t)$ соответственно.

Постановка задачи управления заключается в аналитическом синтезе на основе принципа интегральной адаптации СТУ законов управления СГ u_f и гидротурбиной u_1 в функции переменных состояния системы (6), которые обеспечивают:

- синхронизм СГ - стабилизацию частоты вращения $\omega = 1$;
- заданное напряжение на выводах СГ $U_t = U_0$;

- асимптотическую устойчивость системы «гидротурбина – СГ»;
- подавление возмущения *M(t)* и робастность замкнутой системы к изменению топологии внешней сети – подавление возмущения *N(t)*.

Процедура синтеза законов управления гидрогенератором. Для того чтобы создать желаемый аттрактор в пространстве состояний расширенной системы (6), сформируем две макропеременные (по числу каналов управления) вида:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \left(U_t^2 - U_0^2\right)k_1 - \left(\omega - 1\right)k_2; \\ \psi_2 &= \left(m - P_m\right)k_3 + (\omega - 1)k_4. \end{aligned} \tag{7}$$

С учетом уравнений (7) можно переписать два последних уравнения системы (6):

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{dt} &= \left(\left(U_t^2 - U_0^2\right)k_1 - \left(\omega - 1\right)k_2\right)\xi_1; \\ \frac{dz_2}{dt} &= \left(\left(m - P_m\right)k_3 + (\omega - 1)k_4\right)\xi_2. \end{aligned} \tag{8}$$

На $\psi_k = 0,\ k = \overline{1,2}$ уравнения (8) имеют вид

$$\frac{dz_i}{dt} = -z_i\xi_i,\ k = \overline{1,2},$$

устойчивость которых обеспечивается при $\xi_i > 0$.

Для обеспечения способности закона изменять положение аттрактора в пространстве состояния системы уравнений (6) к внешним возмущениям, введем в макропеременные (7) адаптивные компоненты $z_1,\ z_2$:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \left(U_t^2 - U_0^2\right)k_1 - \left(\omega - 1\right)k_2 + z_1; \\ \psi_2 &= \left(m - P_m\right)k_3 + (\omega - 1)k_4 + z_2. \end{aligned} \tag{9}$$

Введение макропеременных (9) в расширенную систему уравнений (6) сформирует в пространстве состояний этой системы инвариантные многообразия – аттрактор, $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$, на которых будут выполняться желаемые инвариантные соотношения:

$$\begin{aligned} U_t^2 &= U_0^2; \\ \omega &= 1. \end{aligned} \tag{10}$$

Продифференцировав по времени уравнения (9), с учетом уравнений (6), получим:

$$\dot{\psi}_1(t) = \frac{d\psi_1}{dt} = 2k_1\left(\left[U_d\dot{U}_d(t) + U_q\dot{U}_q(t)\right]\right) - \frac{d\omega}{dt}k_2 + \frac{dz_1}{dt};$$

$$\dot{\psi}_2(t) = \frac{d\psi_2}{dt} = \left(\frac{dm}{dt} - \frac{dP_m}{dt}\right)k_3 + \frac{d\omega}{dt}k_4 + \frac{dz_2}{dt},$$

где $\dot{U}_d(t) = -U_\infty \cos\delta\frac{d\delta}{dt} + L_e\left(\frac{di_d}{dt} + \omega\frac{di_q}{dt} + i_q\frac{d\omega}{dt}\right)$,

$$\dot{U}_q(t) = -U_\infty \cos\delta\frac{d\delta}{dt} + L_e\left(\frac{di_q}{dt} - \omega\frac{di_d}{dt} - i_d\frac{d\omega}{dt}\right).$$

Необходимо найти такие законы управления u_f, u_1, которые бы обеспечили устойчивое движение расширенной системы уравнений (6), к инвариантным многообразиям $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$. Для этого необходимо разрешить систему уравнений:

$$\begin{cases} T_1\dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0; \\ T_2\dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0. \end{cases} \tag{11}$$

Для обеспечения асимптотической устойчивости движения изображающей точки (ИТ) системы до аттрактора, необходимо, чтобы коэффициенты T_1, T_2 были строго положительны.

На основе (11), которые необходимо раскрыть с учетом правых частей уравнений объекта (6), мы имеем два алгебраических уравнения:

$$2k_1\left(\left[U_d\dot{U}_d(t)+U_q\dot{U}_q(t)\right]\right)-\frac{d\omega}{dt}k_2+\frac{dz_1}{dt}+\frac{1}{T_1}\left[\left(U_t^2-U_0^2\right)k_1-(\omega-1)k_2+z_1\right]=0;$$

$$\left(\frac{dm}{dt}-\frac{dP_m}{dt}\right)k_3+\frac{d\omega}{dt}k_4+\frac{dz_2}{dt}+\frac{1}{T_2}\left[(m-P_m)k_3+(\omega-1)k_4+z_2\right]=0,$$

которые необходимо разрешить относительно управлений u_f, u_1.

Полученные в результате данной процедуры нелинейные законы управления *гидротурбиной* u_1 и *генератором* u_f будут обеспечивать перевод системы уравнений (6) в окрестность совокупности многообразий $\psi_1=0$, $\psi_2=0$.

Результаты моделирования замкнутой системы. Проверим достоверность полученных теоретических результатов (законов управления), путем компьютерного моделирования замкнутой системы уравнений (6). Параметры объекта управления:

$D=1$; $H=5$; $r=0,0011$; $L_q=1,74$; $L_d=1,7$; $L_e=0,3$; $r_f=1,85e-4$;

$k_{Mf}=1,55$; $L_f=1,651$; $T_w=4$; $T_s=1$; $m_0=0,5$; и законов управления: $T_1=0,2$;

$T_2=1$; $k_1=k_4=1$; $k_2=3,5$; $k_3=0,2$; $\xi_1=3,2$; $\xi_2=1,6$; $U_0=1, c_1=3,2, c_2=1,6, l=1$

На рис.1-4 показаны результаты компьютерного моделирования замкнутой системы уравнений (6) с полученными нелинейными законами адаптивного управления u_f, u_1, которые обеспечивают выполнение инвариантов (10) и подавление возмущений *N(t), M(t)* в программной среде Maple.

В качестве внешнего возмущения *M(t)*, принята следующая кусочно-постоянная функция:

$$M(t)=\begin{cases}0 & t<80;\\ 0,15 & t\geq 80.\end{cases}$$

Для моделирования изменения топологии внешней сети, положим, что напряжение на шинах бесконечной мощности, также является кусочно-постоянной функцией:

$$N(t)=U_\infty=\begin{cases}0,828 & t<150;\\ 0,994 & t\geq 150.\end{cases}$$

На рис.1, 2 изображены графики переходных процессов терминального напряжения и частоты вращения ротора. Как видно из результатов моделирования, синтезированные законы управления обеспечивают выполнение желаемых инвариантов (10) и подавление возмущений *N(t), M(t)*.

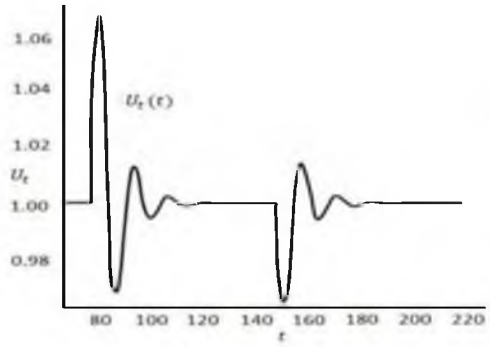

Рис.1. Терминальное напряжение

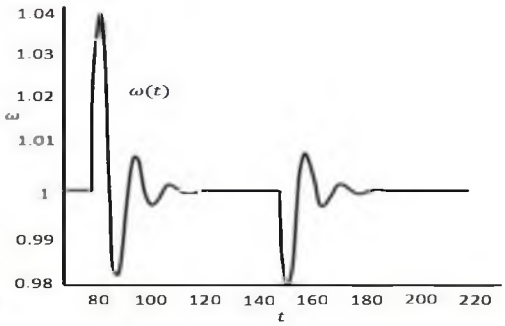

Рис.2. Частота вращения ротора

На рис.3, 4 изображены графики управляющих воздействий: напряжение возбуждения и перемещение штока сервопривода направляющего аппарата (НА), соответственно.

Как видно из результатов компьютерного моделирования, синтезированные законы управления обеспечивают устойчивость в номинальном режиме работы и робастны к возмущениям, обеспечивают выполнение всех технологических требований.

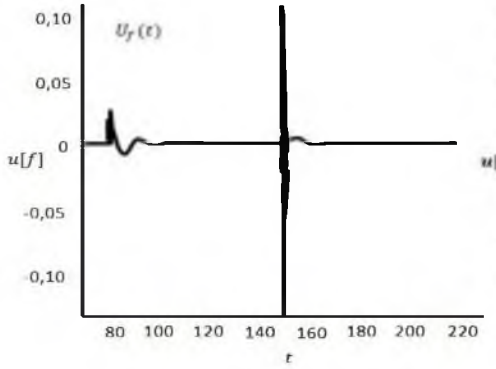

Рис.3. Управление СГ – напряжение возбуждения

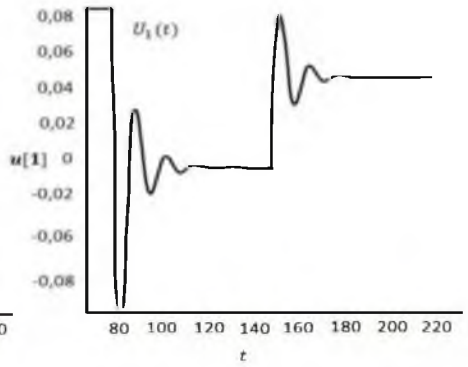

Рис.4. Управление гидротурбиной – перемещение штока сервопривода НА

Выводы. Синтезированные законы управления обеспечивают выполнение технологических инвариантов-стабилизацию терминального напряжения и синхронную работу с сетью, подавление внешнего и параметрического возмущений (параметрическую робастность). Синтез методом АКАР законов нелинейного адаптивного управления на основе введения инвариантных многообразий в систему и использование принципа интегральной адаптации для подавления возмущений предоставляет возможность синтезировать эффективные законы управления, максимально учитывающие внутреннюю нелинейную динамику объекта управления, обеспечивающие подавление внешних и параметрических возмущений без их оперативной идентификации с помощью наблюдателей.

Список литературы

1. Апышов Дж.А., Бакасова А.Б. Нелинейности в электроэнергетике. – Бишкек, Илим, 2003. – 170 с.

2. Бакасова А.Б. О синергетическом методе управления для задач противоаварийных ситуаций в электроэнергетических системах. Проблемы автоматики и управления. – Бишкек, 2011. – №2. – С.41–48.

3. Гаркави Ю.Г., Смирнов И.Н. Регулирование гидротурбин. - М.: Машгиз, - 1954. – 374 с.

4. Eker I., Aydin I.S. Robust cascade design of governors I.S. 36th Universities Power Engineering Conference (UPEC'2001). Power generation Part–3A.– Swansea, - 2001.

5. Ioannou, P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. – New York: Dover Publication, 2012. – 848 p.

6. Кузьменко А.А. Синергетический синтез динамических регуляторов для энергосистем, функционирующих в условиях кусочно–постоянных возмущений Мехатроника, автоматизация, управление: Проблемы мехатроники и автоматизации в работах технол. ин-та ЮФУ: прил. к журн. – М., 2008. – №1. – С.19–24.

7. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, - 1994. – 344 с.

8. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Кузьменко А.А. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии – М.: Изд–во МЭИ, 2011. – 280 с.