

## НЕЛИНЕЙНЫЙ СИНТЕЗ ЗАКОНА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОТУРБИНЫ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ

А.А. КУЗЬМЕНКО

Южный федеральный университет, г. Таганрог

*Гидротурбина, как и любая сложная система, функционирует в условиях действия различных параметрических и внешних возмущений со стороны технологической среды. При наличии наихудших внешних возмущений возникает необходимость построения таких законов управления гидротурбиной, которые при минимальной информации о структуре возмущений обеспечивали бы при этом стабилизацию частоты вращения ротора гидротурбины и устойчивость функционирования гидротурбины. В работе показано аналитическое построение закона управления частотой вращения ротора гидротурбины по ее нелинейной модели, опирающегося на принцип интегральной адаптации синергетической теории управления, что обеспечивает адаптивность к наихудшему возмущению без построения наблюдателей.*

*Ключевые слова: гидротурбина, нелинейное адаптивное управление, интегральная адаптация, синергетическая теория управления, инвариант.*

### Введение

К одним из наиболее важных классов технических систем относятся объекты энергосистем. На гидроэлектростанциях (ГЭС) вырабатывается около 20% всей электроэнергии в мире [1, 2]. Основным генерирующим элементом ГЭС является гидротурбина. Гидротурбина, как и любая сложная система, функционирует в условиях действия различных параметрических и внешних возмущений со стороны технологической среды. Особенно негативно воздействие наихудших возмущений – кусочно-постоянных или гармонических возмущений, частота которых совпадает с собственной частотой гидротурбин. В таких условиях качество и эффективность производства электрической энергии в гидротурбинах можно в значительной мере повысить за счет модернизации используемых алгоритмов управления. В связи с этим наиболее перспективным направлением модернизации является нелинейное адаптивное управление.

В области линейных моделей гидротурбин адаптивное управление, как правило, строится в соответствии с классическими методами линейной теории адаптивного управления [3–7]. Но традиционный подход, основанный на линейных моделях объектов энергосистем, пригоден лишь в режимах номинальной работы энергосистемы, так как линеаризованная модель является адекватной только в области малых отклонений от номинального режима, а для энергосистем использование линейных регуляторов не может гарантировать устойчивость исходной нелинейной энергосистемы, подверженной внешним возмущениям. В настоящее время адаптивность и робастность систем управления обеспечивается за счет совместного использования традиционных линейных регуляторов и методов оптимального и  $H_\infty$  – управления, методов теории нечетких систем управления и искусственных нейронных сетей [6, 8, 9]. Однако в нечетких системах возникает проблема проклятия размерности – число правил пропорционально степени числа входных переменных (размерности системы). Это, в свою очередь, ведет к «... трудности восприятия и объяснения» [10]. К

© А.А. Кузьменко

Проблемы энергетики, 2015, № 1-2

тому же «... в большинстве работ настройки [линейных] 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 и в сильной степени зависит от человеческого фактора» [10].

Обобщая, можно сказать, что к современным нелинейным методам теории управления, используемым для построения адаптивных систем управления гидротурбинами, относятся: метод дифференциальной геометрии, нелинейные методы робастной теории управления, методы оптимального управления и  $H_\infty$  – управления, прямой метод Ляпунова, метод линеаризации обратной связью, использование скользящих режимов для обеспечения робастности гидротурбины к возмущениям и др. [5, 7, 11–13].

Синергетический подход базируется на обеспечении устойчивости движения объекта за счет соответствующего синтеза нелинейных законов адаптивного управления, обеспечивающих организацию в пространстве объекта аттракторов, на которых выполняются целевые инварианты, и компенсацию внешних возмущений. Для решения данной сложной задачи синтеза представляется целесообразным применять основной метод синергетической теории управления (СТУ) – метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), развитый научной школой ЮФУ под руководством проф. А.А. Колесникова и нашедший обширное применение в различных областях современной техники: авиации, энергетике, электромеханике и др. [14–19]. Построение адаптивных систем управления в рамках СТУ основано на следующих способах:

1) для идентификации внешних возмущений применяются соответствующие синергетические нелинейные наблюдатели возмущений (ННВ). В этом случае синтезируемые методом АКАР законы управления дополняются подсистемой наблюдения, осуществляющей динамическую оценку неизмеряемых возмущений и их компенсацию. Использование ННВ для объектов энергосистем подробно изложено в работах [14, 18, 19];

2) использование принципа интегральной адаптации, когда влияние внешних возмущений на функционирование системы компенсируется за счет построенных нелинейных законов управления с особым образом введенными в обратные связи интеграторами. При этом необходима минимальная информация о возмущении – его класс (кусочно-постоянное, полиномиальное, гармоническое и т.д.), который можно представить аппроксимированной динамической моделью в виде системы дифференциальных уравнений. Построение адаптивных систем управления, опирающихся на принцип интегральной адаптации СТУ [14–16], не требует синтеза наблюдателей.

В данной статье на примере синтеза адаптивного регулятора частоты вращения ротора гидротурбины показано практическое использование принципа интегральной адаптации СТУ.

### **1. Постановка проблемы**

В нелинейных системах адаптивного управления, базирующихся на построении ННВ, по сути, осуществляется текущая идентификация внешних возмущений, действующих на объект, и компенсация этих возмущений. Возникающие при этом технические трудности состоят в следующем: модель объекта должна быть достаточно точной, а динамика ННВ – более быстрой по сравнению с динамикой изменения внешних возмущений. Эти обстоятельства могут ухудшать практическую эффективность ННВ в конкретных задачах управления (например, повышение быстродействия ННВ приводит к недопустимому выходу управляющих сигналов за

© Проблемы энергетики, 2015, № 1-2

величины ограничений). Необходимо также отметить, что на основе ННВ в СТУ можно построить и такие наблюдатели, которые динамически идентифицируют неизмеряемые параметры и переменные состояния объекта по измеряемым переменным состояниям и номинальным параметрам, если такая задача будет поставлена. Однако, в целом, это может привести к существенному усложнению законов адаптивного управления объектом. В этой связи возникает идея построения «гарантирующих регуляторов», которые парируют наихудшие внешние возмущения, действующие на объект, без их текущей идентификации, а реализация таких регуляторов являлась бы достаточно простой. Собственно говоря, принцип интегральной адаптации и заключается в построении таких «гарантирующих регуляторов» [16]. При их построении будем опираться на следующее определение наихудших возмущений, предложенное проф.

А.А. Колесниковым [14, 16]: «... наихудшие возмущения  $M_i^{sup}(t)$  – это такие внешние возмущения, которые за наименьшее время отклоняют объект управления на максимальное возможное расстояние от желаемого состояния в его фазовом пространстве». Указанное определение по существу означает, что наихудшие возмущения – это кусочно-постоянные возмущения вида  $M_i^{sup}(t) = M_{i0} \text{sign } \mu(t)$  со случайным изменением величины  $M_{i0} = \text{const}$  на соответствующем интервале и знака функции  $\mu(t)$ . Для парирования кусочно-постоянных возмущений «гарантирующий регулятор» должен включать в себя интеграторы [14], т.е. реализовывать астатические законы управления, техническая реализация которых не вызывает затруднений. Интегральные составляющие, с одной стороны, подавляют постоянные возмущения, повышают точность управления, а с другой – ухудшают устойчивость замкнутой системы. Но для метода АКАР такой проблемы не существует, так как процедура этого метода гарантирует асимптотическую устойчивость расширенной системы дифференциальных уравнений объекта [14].

Основными типовыми возмущениями для объектов энергосистем являются гармонические и кусочно-постоянные возмущения. Кусочно-постоянные возмущения соответствуют некоторому набросу или сбросу мощности генерирования/потребления, изменению параметров объекта (параметрическое возмущение), а также [20], что «... на время происходящих вблизи синхронного генератора (СГ) трехфазных коротких замыканий к ротору СГ прикладывается дополнительный тормозящий момент, равный 10-15% от номинального момента генератора», т.е. и короткое замыкание можно в некоторой степени представить кусочно-постоянным возмущением. Кусочно-постоянное возмущение означает, что на разных интервалах времени это возмущение принимает некоторое постоянное значение  $M_i(t) = M_{0i}$ , здесь  $M_{0i}$  – амплитуда. При этом  $M_{0i} < 0$  означает, что произошел наброс мощности (увеличение потребления мощности, подключение дополнительных потребителей), а  $M_{0i} > 0$  – сброс мощности (отключение части потребителей).

Если возмущение  $M_i(t)$  относится к классу кусочно-постоянных возмущений, то в качестве модели такого возмущения можно рассматривать следующее дифференциальное уравнение:

$$\dot{z}_i(t) = 0, \quad (1)$$

где  $z_i = \hat{M}_i(t)$  – оценка возмущения. Действительно, решение уравнения (1) – это  $z_i(t) = \text{const}$ .

Отметим, что любое полиномиальное возмущение степени  $k$  можно представить в виде цепочки последовательно включенных интеграторов:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= z_2; & \dot{z}_2(t) &= z_3; \\ &\dots\dots & \dots\dots \\ \dot{z}_{k-1}(t) &= z_k; & \dot{z}_k(t) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

В СТУ при построении адаптивных законов управления, обеспечивающих компенсацию кусочно-постоянных возмущений, с помощью ННВ целесообразно в качестве моделей этих возмущений использовать уравнение (1). Но при построении адаптивных законов управления, обеспечивающих компенсацию кусочно-постоянных возмущений в соответствии с принципом интегральной адаптации, правая часть уравнения (1) должна представлять собой левую часть выражения для целевого инварианта – соотношения между переменными состояния объекта управления, которое соответствует цели управления. Например, если цель управления – стабилизация частоты вращения  $\omega$ , то целевой инвариант – это соотношение  $\omega_0 - \omega = 0$ , т.е. частота  $\omega$  должна принимать желаемое значение  $\omega_0$ . Таким образом, при достижении целевого инварианта  $\omega_0 - \omega = 0$  это уравнение сведется к виду (1). При компенсации полиномиальных возмущений в соответствии с принципом интегральной адаптации только последнее уравнение системы (2) должно представлять собой выражение для целевого инварианта. Отметим также, что, поскольку любое возмущение можно представить как суперпозицию кусочно-постоянных возмущений, то при построении расширенной системы уравнений объекта управления для синергетического синтеза «гарантирующих регуляторов» необходимо возмущения  $M_i(t)$  представлять как совокупность последовательно включенных взаимосвязанных интеграторов (1). При этом каждому отдельному возмущению должна соответствовать своя динамическая модель.

За исходную модель гидротурбины примем модель [7], записанную в относительных единицах (о.е.):

$$\begin{aligned} \dot{\omega}(t) &= (P_m - P_c - D(\omega - 1)) / H; \\ \dot{P}_m(t) &= 2 \left( -P_m + m - T_w \frac{dm}{dt} \right) / T_w; \\ \dot{m}(t) &= (-m + m_0 + U) / T_s, \end{aligned} \quad (3)$$

здесь  $\omega$  – частота вращения гидротурбины, о.е.;  $P_m$  – механическая мощность гидротурбины, о.е.;  $m$  – величина открытия водяного шлюза, о.е.;  $m_0$  – начальное открытие водяного шлюза, о.е.;  $P_c$  – электрическая мощность, о.е.;  $U$  – сигнал управления сервомотором гидротурбины, который открывает водяной шлюз, о.е.;  $H$  – постоянная инерции гидрогенератора, сек.,  $T_w$  – постоянная инерции в напорном трубопроводе, сек.,  $T_s$  – постоянная времени сервомотора, сек.,  $D$  – демпферный коэффициент гидрогенератора, о.е. В соответствии с [7] первое уравнение модели (3) отражает баланс мощностей гидрогенератора, второе уравнение – динамику гидротурбины с эффектом неэластичного гидроудара, третье уравнение – динамику сервомотора гидротурбины, осуществляющего открытие водяного шлюза. В модели (3) внешним возмущением будет выступать электрическая мощность  $M(t) = P_c(t) = P_{c0} = \text{const}$ , отражающая действие нагрузки со стороны потребителей.

Таким образом, задача управления сводится к синтезу методом АКАР [14–16], в соответствии с принципом интегральной адаптации, нелинейного закона управления

частотой вращения ротора гидротурбины  $U$  в функции координат состояния системы (3), который обеспечивает выполнение следующих целей управления:

1) стабилизация частоты вращения ротора гидротурбины:

$$\omega_0 - \omega = 0, \quad (4)$$

здесь  $\omega_0$  – заданная частота вращения;

2) компенсация кусочно-постоянного возмущения  $P_c(t)$ .

В терминах метода АКАР выражение (4) представляет собой целевой инвариант гидротурбины (3). Кусочно-постоянное возмущение  $P_c(t)$  имеет следующую динамическую модель, записанную с учетом (4):

$$\dot{z}(t) = \xi(\omega_0 - \omega), \quad (5)$$

при этом  $z(t) = \hat{P}_{c0}$  – оценка неизмеряемого возмущения,  $z(0) = 0$ ,  $\xi$  – постоянный коэффициент.

При синтезе законов управления необходимо в уравнениях (3) заменить  $P_c$  его оценкой, т.е.  $P_c = z$ . Объединяя уравнения (3) и (5), получим расширенную модель метода АКАР для гидротурбины, которая будет использована при синтезе нелинейного закона управления:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}(t) &= (P_m - z - D(\omega - 1)) / H; \\ \dot{P}_m(t) &= 2 \left( -P_m + m - T_w \frac{dm}{dt} \right) / T_w; \\ \dot{m}(t) &= (-m + m_0 + U) / T_s; \\ \dot{z}(t) &= \xi(\omega_0 - \omega). \end{aligned} \quad (6)$$

## 2. Процедура синтеза закона управления

Процедура метода АКАР достаточно подробно изложена в литературе [15–17], поэтому, в силу ограниченности объема статьи, будем считать, что читатель знаком или предварительно может ознакомиться с процедурой метода АКАР [21].

На первом этапе синтеза сформируем следующую макропеременную в о.е.:

$$\psi_1 = m + 0,5P_m + 0,5\alpha \int P_m dt + \varphi(\omega, z)$$

или, с учетом замены  $z_1 = 0,5 \int P_m dt$  (при этом справедливо равенство  $\dot{z}_1(t) = 0,5P_m$ ),

$$\psi_1 = m + 0,5P_m + \alpha z_1 + \varphi(\omega, z, z_1), \quad (7)$$

где  $z_1(0) = 0$ ,  $\varphi(\omega, z, z_1)$  – «внутреннее» управление.

Макропеременная (7) должна удовлетворять решению функционального уравнения 2-го порядка метода АКАР [15–17]:

$$\ddot{\psi}_1(t) + \lambda_1 \dot{\psi}_1(t) + \lambda_2 \psi_1 = 0. \quad (8)$$

Из [22] известно, что решения  $\psi_1 = 0$ ,  $\dot{\psi}_1(t) = 0$  уравнения вида (8) при  $\lambda_i, i = 1, 2$  асимптотически устойчивы. Таким образом, из (8) имеем решения:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= m + 0,5P_m + \alpha z_1 + \varphi(\omega, z, z_1) = 0; \\ \dot{\psi}_1(t) &= \dot{m}(t) + 0,5\dot{P}_m(t) + \alpha \dot{z}_1(t) + d\varphi(\omega, z, z_1)/dt = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

В многообразии  $\psi_1 = 0$  входят переменные состояния гидротурбины (6), которые являются функциями времени, поэтому далее в записи  $\psi_1 = 0$  аргумент  $t$  будем опускать, поскольку, во-первых, очевидно, что функция  $\psi_1$  зависит от времени, а во-вторых, чтобы акцентировать внимание на то, что более важно: функция  $\psi_1$  зависит от

переменных состояния. А в записи  $\dot{\psi}_1(t) = 0$  аргумент  $t$  необходим, чтобы показать, что это полная производная по времени.

Распишем выражения для полных производных  $\ddot{\psi}_1(t), \dot{\psi}_1(t)$  согласно (7) и (6):

$$\dot{\psi}_1(t) = m/T_w + d\varphi(\omega, z, z_1)/dt; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\psi}_1(t) &= \dot{m}(t)/T_w + d^2\varphi(\omega, z, z_1)/dt^2 = \\ &= (-m + m_0 + U) + d^2\varphi(\omega, z, z_1)/dt^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Путем выбора  $\alpha = 2/T_w$  выражение  $\psi_1(t)$  из (9) преобразуется к более простому виду (10), что, в свою очередь, позволяет избежать дифференцирования управления  $U$  при вычислении производной  $\ddot{\psi}_1(t)$ .

Подставим (7), (10), (11) в (8). Полученное алгебраическое уравнение разрешим относительно искомого управления, получаем

$$\begin{aligned} U &= m - m_0 - T_w T_s \lambda_1 (m/T_w + d\varphi(\omega, z, z_1)/dt) + \\ &+ T_w T_s \lambda_2 (m + 0,5P_m + 2z_1/T_w + \varphi(\omega, z, z_1)) + \\ &+ T_w T_s \lambda_1 d^2\varphi(\omega, z, z_1)/dt^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Согласно методу АКАР при попадании изображающей точки системы (6) на пересечение многообразий  $\psi_1 = 0$ ,  $\dot{\psi}_1(t) = 0$  в пространстве этой системы происходит ее динамическая декомпозиция, и из этих равенств можем получить алгебраические соотношения, описывающие поведение переменных  $m, P_m$  на этом пересечении. Поэтому из системы (6) дифференциальные уравнения, описывающие поведения переменных  $m, P_m$ , исключаются, в остальных уравнениях системы (6) переменные  $m, P_m$  заменяются полученными алгебраическими соотношениями. Таким образом получаем декомпозированную систему метода АКАР [15, 16]. Итак, поведение остаточной динамики системы (6) описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}(t) &= (-2m - 4z_1/T_w - 2\varphi(\omega, z, z_1) - z - D(\omega - 1))/H; \\ \dot{z}(t) &= \xi(\omega_0 - \omega). \end{aligned} \quad (13)$$

В полученной декомпозированной системе (13) имеется неизвестное «внутреннее» управление  $\varphi(\omega, z, z_1)$ , которое подлежит определению на втором этапе процедуры синтеза закона управления, исходя из задачи выполнения инварианта (4). Таким образом, зададим финишную макропеременную, которая согласно методу АКАР содержит желаемый инвариант:

$$\psi_2 = \omega_0 - \omega + \beta z, \quad (14)$$

здесь  $\beta > 0$  – постоянный коэффициент.

Отметим, что, в отличие от стандартной процедуры метода АКАР, при синтезе законов управления в соответствии с принципом интегральной адаптации финишная макропеременная всегда имеет структуру

$$\psi = \Phi + \sum_{i=1}^k \beta_i z_i, \quad (15)$$

здесь  $\Phi$  – функция переменных состояния исходного объекта, отражающая желаемый инвариант;  $\beta_i$  – постоянные коэффициенты;  $k$  – количество переменных состояния в модели соответствующего возмущения. В стандартной процедуре метода АКАР второе слагаемое в выражении (15) отсутствует.

Макропеременная (14) должна удовлетворять решению основного функционального уравнения 1-го порядка метода АКАР:

$$T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0, \quad (16)$$

условием устойчивости решения, которого является  $T_2 > 0$ .

При попадании изображающей точки системы (13) на многообразие  $\psi_2 = 0$  выполняется инвариант (4), т.е.  $\omega = \omega_0$ . Так как  $\psi_2 = 0$ , то справедливо равенство  $\omega_0 - \omega = -\beta z$ , в силу чего остаточная динамика системы (13) описывается уравнением  $\dot{z}(t) = -\xi \beta z$ , решение которого устойчиво при  $\xi \beta > 0$ .

Теперь мы можем найти выражение для «внутреннего» управления  $\varphi(\omega, z, z_1)$ . Для этого необходимо расписать уравнение (16) с учетом макропеременной (14) в силу уравнений декомпозированной системы (13):

$$\begin{aligned} & (2m + 4z_1/T_w + 2\varphi(\omega, z, z_1) + D(\omega - 1) + z)/H + \\ & + \xi \beta (\omega_0 - \omega) + (\omega_0 - \omega + \beta z)/T_2 = 0. \end{aligned}$$

Из этого выражения выразим неизвестную функцию  $\varphi(\omega, z, z_1)$ :

$$\begin{aligned} \varphi(\omega, z, z_1) = & -0,5H(\xi \beta (\omega_0 - \omega) + (\omega_0 - \omega + \beta z)/T_2) - \\ & - m - 2z_1/T_w - 0,5D(\omega - 1) - 0,5z. \end{aligned} \quad (17)$$

Итак, чтобы получить окончательное выражение для закона управления частотой вращения ротора гидротурбины, необходимо выражение (17) подставить в (12). При этом необходимо подставить в (12) выражения для первой и второй полной производной (17) по времени в силу уравнений системы (6). Так, например, первая производная:

$$\frac{d\varphi(\omega, z, z_1)}{dt} = \frac{\partial \varphi(\omega, z, z_1)}{\partial \omega} \dot{\omega}(t) + \frac{\partial \varphi(\omega, z, z_1)}{\partial z} \dot{z}(t) + \frac{\partial \varphi(\omega, z, z_1)}{\partial z_1} \dot{z}_1(t).$$

В это выражение вместо производных переменных подставляются соответствующие выражения правых частей из (6). Аналогично можно сформировать выражение для второй производной.

Итак, синтезирован закон управления (12) для гидротурбины, который должен обеспечить выполнение инварианта (4) и компенсацию внешнего кусочно-постоянного возмущения  $M(t) = P_c(t) = P_{c0} = \text{const}$ , обусловленного изменением электрической мощности гидротурбины.

### 3. Моделирование замкнутой системы

Проверим достоверность полученных теоретических результатов путем компьютерного моделирования замкнутой системы. Параметры турбины [7]:  $P_{cnom} = 0,5$ ;  $D = 1$ ;  $T_w = 4$ ;  $T_s = 1$ ;  $m_0 = 0,5$ ;  $H = 5$ . Параметры закона управления (12):  $\omega_0 = 1$ ;  $\lambda_1 = 10/3$ ;  $\lambda_2 = 2,78$ ;  $T_2 = 6$ ;  $\xi = \beta = 1$ .

При моделировании замкнутой системы (6) вместо переменной  $z$  в первое уравнение подается внешнее кусочно-постоянное возмущение:

$$P_c(t) = \begin{cases} P_{cnom}, & t < t_b; \\ P_{cnom} + A, & t \geq t_b, \end{cases} \quad (18)$$

график которого при  $t_b = 60$  с,  $A = 0,2$  показан на рис. 1.

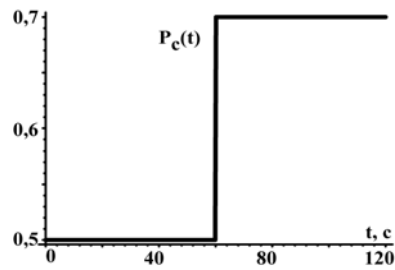


Рис. 1. График изменения нагрузки (18)

Результаты моделирования замкнутой системы (6) с синтезированным выше синергетическим законом управления частотой вращения гидротурбины (12) и возмущением (18) представлены на рис. 2–5 (показаны сплошной линией). При этом на рис. 2–4 пунктирной линией показаны результаты моделирования гидротурбины с возмущением (18) и ПИД-законом регулирования, представленного передаточной функцией:

$$\frac{U(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{K_I}{p} + \frac{K_d p}{T_d p + 1}, \quad (19)$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор Лапласа;  $\varepsilon(p) = \Delta P(p) + (\omega_0 - \omega(t))$  – ошибка системы для предложенного в работе [7] ПИД-закона регулирования; параметры  $K_p = 1,45$ ;  $K_I = 0,117$ ;  $K_d = 2,5$ ;  $T_d = 0,005$  рассчитаны в [7].

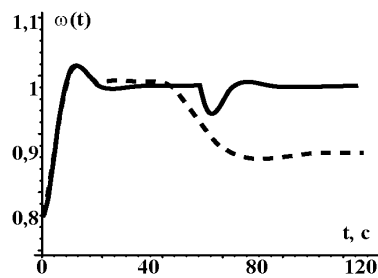


Рис. 2. Графики изменения частоты вращения  $\omega(t)$

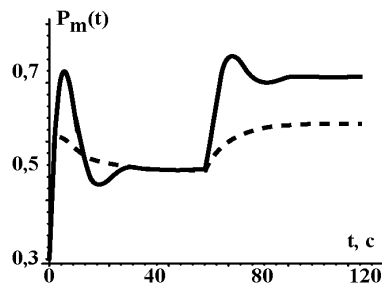


Рис. 3. Графики изменения механической мощности  $P_m(t)$

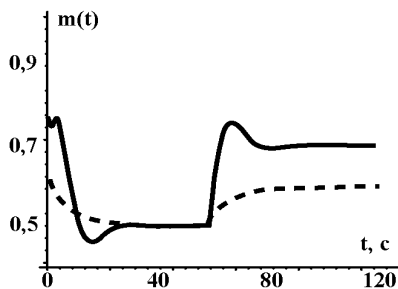


Рис. 4. Графики изменения величины открытия водяного шлюза  $m(t)$

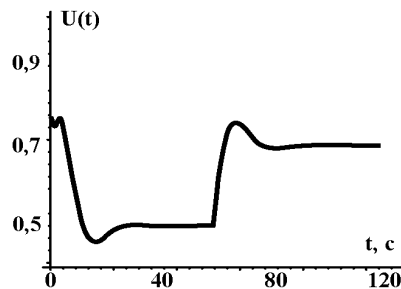


Рис. 5. График изменения управления (12)

Из результатов моделирования видно, что закон управления (12), в отличие от традиционного ПИД-закона (19), обеспечивает выполнение инварианта (4) – безошибочную стабилизацию частоты вращения гидротурбины (см. рис. 2). При этом

компенсируется внешнее кусочно-постоянное возмущение, поскольку частота вращения  $\omega(t)$  сохраняет заданное значение  $\omega_0 = 1$  при увеличении нагрузки в соответствии с (18), а в случае использования традиционного ПИД-закона (19) частота принимает новое установившееся значение, которое меньше номинальной частоты  $\omega < \omega_0$ . В случае ПИД-закона ненулевая ошибка по частоте обусловлена ненулевой ошибкой по мощности в (19). Из рис. 2–4 также видно, что быстродействие системы с законом (12) выше.

Таким образом, применение синергетического закона управления увеличивает быстродействие, робастность и устойчивость функционирования гидротурбины.

### **Заключение**

В статье на основе принципа интегральной адаптации СТУ был синтезирован синергетический закон адаптивного управления гидротурбиной, обеспечивающий решение технологической задачи – стабилизацию частоты вращения гидротурбины, а также адаптивность к внешней технологической среде, что выражается в компенсации внешнего кусочно-постоянного возмущения, вызванного изменением электрической нагрузки гидротурбины. Показано сравнение замкнутой системы с синергетическим законом с соответствующей замкнутой системой с традиционным ПИД-регулятором. Синтезированный синергетический закон управления показал свое явное преимущество по сравнению с традиционным управлением, при этом обеспечивается адаптивность к внешнему возмущению без его оценивания (идентификации) с помощью наблюдателей. Таким образом, применение синергетического закона управления повышает быстродействие, робастность и устойчивость функционирования гидротурбины. Предложенный подход к обеспечению адаптивности системы управления представляет собой альтернативный вариант по отношению к использованию наблюдателей состояния и возмущений.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №13-08-01008-а, 14-08-00782-а).*

### **Summary**

*Hydroturbine, like any complex system, operates under conditions of various parametrical perturbations as well as perturbations acted from the external environment. In case of worst perturbations, we need to build such laws to control the turbine, which would ensure the stabilization of the turbine rotor speed in the presence of such perturbations with minimum information about the structure of the external factors and the turbine stability. The obtained law of hydroturbine adaptive control provides the control target implementation, i.e. stabilization of the turbine rotor speed and suppression of piecewise constant perturbations due uncertainty of electrical power (the load). The novelty of the work is to construct a turbine rotor speed control law for its non-linear model, based on the principle of integrated adaptation of synergetic control theory, which provides adaptability to worst perturbation without constructing observers.*

**Keywords:** *hydroturbine, nonlinear adaptive control, principle of integral adaptation, synergetic control theory, invariant.*

### **Литература**

1. IEEE Working Group. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies // IEEE Trans. Power Syst. Apparatus. 1992. Vol. 7(1). Pp. 167–179.

2. Пивоваров В.А. Проектирование и расчет систем регулирования гидротурбин. М.: Машиностроение, 1973. 288 с.
3. Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design. New York: Wiley, 1995. 563 pp.
4. Ioannou P.A., Sun J. Robust Adaptive Control. New York: Dover, 2012. 848 pp.
5. Kishor N., Saini R.P., Singh S.P. A review on hydropower plant models and control // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2007. Vol. 11. Pp. 776–796.
6. Fang H., Chen L., Shen Z. Application of an improved PSO algorithm to optimal tuning of PID gains for water turbine governor // Energy Conversion and Management. 2011. № 52. Pp. 1763–1770.
7. Khodabakhshian A., Hooshmand R. A new PID controller design for automatic generation control of hydro power systems // Electrical Power and Energy Systems. 2010. № 32. Pp. 375–382.
8. Narendra K.S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. Neural Networks. 1990. Vol. 1. № 1. Pp. 4–27.
9. Shuzhi S.S., Ge S.S., Wang C. Direct adaptive control of a class of nonlinear systems // IEEE Trans. Neural Networks. 2002. Vol. 13. № 1. Pp. 214–221.
10. Воронин Н.И., Этингов П.В. Развитие методов адаптации нечетких АРВ для повышения динамической устойчивости сложных электроэнергетических систем // Электричество. 2003. № 11. С. 2–10.
11. Lu Q, Sun C., Sun Y. Nonlinear governor control for hydroturbine generator sets// Proceedings of IEEE TENCON'93, Beijing. 1993.
12. Gui X., Mei S., Song Y. A novel nonlinear robust control strategy of hydro turbine governor: simulation and experiment // Proceedings of 39th International Universities Power Engineering Conference. 2004. Vol. 1. Pp. 737–741.
13. Lu Q., Sun Y., Sun Y.-Z. Nonlinear decentralized robust governor control for hydroturbine-generator sets in multi-machine power systems// Electrical Power and Energy Systems. 2004. № 26. Pp. 333–339.
14. Колесников А.А., Кузьменко А.А., Веселов Г.Е. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. М.: Издательский дом «МЭИ», 2011. 280с.
15. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
16. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем. Ч.III/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 656 с.
17. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. Изд. 2-е. М.: Либроком, 2012. 240 с.
18. Кузьменко А.А. Нелинейное адаптивное управление турбогенератором // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 1. С. 112–119.
19. Кузьменко А.А. Нелинейные адаптивные законы управления турбиной судовой энергоустановки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. №4. С. 38–51.
20. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.
21. URL: <http://synergetics.tti.sfedu.ru / 2-4.html#p24>
22. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1984. 368 с.

**Поступила в редакцию**

**03 октября 2014 г.**

**Кузьменко Андрей Александрович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Синергетика и процессы управления» (СиПУ) Южного федерального университета (ЮФУ), г. Таганрог. Тел: 8(8634)318-090, 8(918)597-53-90. E-mail: [aakuzmenko@sfedu.ru](mailto:aakuzmenko@sfedu.ru), [andrew.kuzmenkosipu@gmail.com](mailto:andrew.kuzmenkosipu@gmail.com).