

20. Колесников А.А. Метод интегральной адаптации нелинейных систем на инвариантных многообразиях: наихудшие возмущения // Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010). – СПб.: «Концерн ЦНИИ “Электроприбор”», 2010. – С. 22-29.
21. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

**Колесников Александр Анатольевич** – 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; тел.: 88634360707; кафедра синергетики и процессов управления; к.т.н.; доцент.

**Kolesnikov Alexander Anatol'evich** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com; 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360707; the department of synergetics and control; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.51

**А.А. Кузьменко**

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОТУРБИНЫ: ИНТЕГРАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ**

*Гидротурбина, как и любая сложная система, функционирует в условиях действия различных внешних и параметрических возмущений со стороны внешней среды. При наличии наихудших возмущений возникает необходимость построения таких законов управления гидротурбиной, которые при минимальной информации о структуре внешних воздействий обеспечивали бы устойчивость гидротурбины в целом и стабилизацию частоты вращения ротора гидротурбины. Новизна работы заключается в построении адаптивной системы управления частотой вращения ротора гидротурбины, опирающейся на принцип интегральной адаптации синергетической теории управления, что не требует синтеза наблюдателей состояния и возмущений.*

*Гидротурбина; синергетическое управление; инвариантное многообразие; наихудшее возмущение; интегральная адаптация.*

**A.A. Kuzmenko**

### **HYDROTURBINE ROTATION FREQUENCY CONTROL SYSTEM: INTEGRAL ADAPTATION**

*Hydroturbine, as well as any complex system, is operating under conditions of various external and parameter disturbances of external environment. In case of the worst disturbances we need to build hydroturbine control laws providing stability of hydroturbine in a whole and turbine rotor rotation frequency stabilization. The novelty of the paper is design of adaptive control system for turbine rotor rotation frequency. This design is based on principles of integral adaptation of synergetics control theory, so we don't need to synthesize of state and disturbance observers.*

*Hydroturbine; synergetics control; invariant manifold; the worst disturbance; integral adaptation.*

**Введение.** К одним из наиболее важных классов технических систем относятся объекты энергосистем. На гидравлических электростанциях (ГЭС) вырабатывается более 15 % всей потребляемой в России электроэнергии [1, 2]. Основным генерирующим элементом ГЭС является гидротурбина. Гидротурбина, как и лю-

бая сложная система, функционирует в условиях действия различных внешних и параметрических возмущений со стороны внешней среды. Особенно негативно воздействие наихудших возмущений – гидроударов или гармонических возмущений, частота которых совпадает с собственной частотой гидротурбин. Эти возмущения в наибольшей степени влияют на технологическую безопасность ГЭС, снижая ее устойчивость. 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. Как известно, основу адаптивных систем управления составляют наблюдатели состояния и возмущений. Однако построение адаптивных систем управления, опирающихся на принцип интегральной адаптации синергетической теории управления [3–5], не требует синтеза наблюдателей состояния и возмущений. Построению нелинейного адаптивного регулятора частоты вращения ротора гидротурбины, синтез которого осуществляется в соответствии с принципом интегральной адаптации метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), и посвящен данный доклад.

**Постановка задачи.** При наличии наихудших возмущений возникает необходимость построения таких законов управления гидротурбиной, которые при минимальной информации о структуре внешних воздействий обеспечивали бы устойчивость гидротурбины в целом и стабилизацию частоты вращения ротора гидротурбины. В основу принципа выделения класса наихудших возмущений целесообразно положить утверждение проф. А.А. Колесникова: «... наихудшие возмущения, действующие на объект, – это такие параметрические и внешние возмущающие воздействия, которые за минимально возможное время выбрасывают объект на максимально возможное расстояние от желаемой траектории его движения» [3–5]. Очевидно, что такие возмущения имеют в большинстве случаев кусочно-постоянный характер вида  $M(t) = M_0 \text{sign } \mu(t)$ , со случайным изменением параметра  $M_0$  и знака функции  $\mu(t)$ .

В настоящее время для управления гидротурбинами используют преимущественно линейные системы управления с типовыми регуляторами (из них 90 % составляют ПИД-регуляторы) [1, 2, 6]. ПИД-регулятор позволяет реализовать только простейшие линейные законы регулирования, не обеспечивающие адаптивность гидротурбин к внешним и внутренним возмущениям. Настройки этих регуляторов рассчитываются либо по линейным моделям объектов управления, либо по разгонным характеристикам. Недостатком этих регуляторов является невысокое качество регулирования при наличии внешних возмущений. В настоящее время адаптивность систем управления пытаются обеспечить за счет использования традиционных линейных регуляторов и методов теории нечетких систем управления или искусственных нейронных сетей. Однако в нечетких системах возникает известная проблема «проклятия размерности» – число правил пропорционально степени числа входных переменных. Это, в свою очередь, ведет к «... трудности восприятия и объяснения». К 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, в сильной степени зависит от человеческого фактора...» [5].

За исходную модель гидротурбины примем модель [6]

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{H} (P_m - D(\omega-1) - P_c); \\ \frac{dP_m}{dt} = \frac{2}{T_w} \left( -P_m + m - T_w \frac{dm}{dt} \right); \\ \frac{dm}{dt} = \frac{1}{T_s} (-m + m_0 + U), \end{cases} \quad (1)$$

здесь  $\omega$  – частота вращения;  $P_m$  – механическая мощность гидротурбины;  $m$  – величина открытия водяного шлюза;  $P_c$  – электрическая мощность (нагрузка со стороны потребителей);  $U$  – сигнал управления сервомотором гидротурбины, который открывает водяной шлюз;  $H, T_w, D, T_s$  – постоянные параметры.

Таким образом, задача управления сводится к синтезу нелинейного закона управления частотой вращения ротора гидротурбины  $U$  в функции координат состояния системы (1), который обеспечивает выполнение следующих целей управления:

- 1) стабилизация частоты вращения ротора гидротурбины:

$$\omega_0 - \omega = 0, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  – заданная частота вращения;

- 2) подавление кусочно-постоянного возмущения  $P_c(t) = P_{c0} = const$ .

В терминах метода АКАР выражение (2) представляет собой технологический инвариант гидротурбины [3–5]. Возмущающим воздействием для гидротурбины является изменение электрической мощности  $P_c(t) = P_{c0} = const$ , которую можно представить кусочно-постоянным возмущением, динамическая модель которого имеет вид

$$\frac{dz}{dt} = \xi (\omega_0 - \omega), \quad (3)$$

при этом  $z(t) = \hat{P}_{c0}$  – оценка неизмеряемого возмущения,  $\xi$  – постоянный коэффициент. При синтезе законов управления необходимо в уравнении (1) заменить  $P_c$  его оценкой, т.е.  $P_c = z$ . Объединяя уравнения (1) и (3), получим расширенную модель гидротурбины, которая будет использована при синтезе нелинейного закона управления гидротурбиной:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{H} (P_m - D(\omega-1) - z); \\ \frac{dP_m}{dt} = \frac{2}{T_w} \left( -P_m + m - T_w \frac{dm}{dt} \right); \\ \frac{dm}{dt} = \frac{1}{T_s} (-m + m_0 + U); \\ \frac{dz}{dt} = \xi (\omega_0 - \omega). \end{cases} \quad (4)$$

**Синтез закона управления.** Перейдем к процедуре синтеза синергетического закона управления. На первом этапе синтеза сформируем следующую макропеременную:

$$\psi_1 = m + F(P_m) + \alpha \int F(P_m) dt + \phi(\omega, z),$$

или

$$\begin{cases} \psi_1 = m + F(P_m) + \alpha z_1 + \phi(\omega, z); \\ \frac{dz_1}{dt} = F(P_m), \end{cases} \quad (5)$$

где  $F(P_m)$  – неизвестная функция от механической мощности, которая подлежит доопределению в ходе синтеза,  $\phi(\omega, z)$  – «внутреннее» управление.

Макропеременная (5) должна удовлетворять решению функционального уравнения

$$\ddot{\psi}_1(t) + \lambda_1 \dot{\psi}_1(t) + \lambda_2 \psi_1 = 0. \quad (6)$$

Из [7] известно, что уравнение вида (6) при  $\lambda_j > 0, j = \overline{1,2}$  асимптотически устойчиво относительно решений  $\psi_1 = 0, \dot{\psi}_1(t) = 0$ , т. е.

$$\begin{cases} \psi_1 = m + F(P_m) + \alpha z_1 + \phi(\omega, z) = 0; \\ \dot{\psi}_1(t) = \frac{dm}{dt} + \frac{dF(P_m)}{dt} + \alpha \frac{dz_1}{dt} + \frac{d\phi(\omega, z)}{dt} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Распишем выражения для производных  $\dot{\psi}_1(t), \ddot{\psi}_1(t)$  согласно (5) и с учетом (4):

$$\dot{\psi}_1(t) = \frac{2}{T_w} m + \frac{d\phi(\omega, z)}{dt}; \quad (8)$$

$$\ddot{\psi}_1(t) = \frac{d}{dt}(\dot{\psi}_1(t)) = \frac{2}{T_w} \frac{dm}{dt} + \frac{d^2\phi(\omega, z)}{dt^2} = \frac{2}{T_w T_s} (-m + m_0 + U) + \frac{d^2\phi(\omega, z)}{dt^2}. \quad (9)$$

Путем выбора  $F(P_m) = 0,5P_m, \alpha = 2/T_w$  выражение  $\dot{\psi}_1(t)$  из (7) преобразуется к более простому виду (8), что, в свою очередь, позволяет избежать дифференцирования управления  $U$  при вычислении производной  $\ddot{\psi}_1(t)$ .

Подставим (5), (8), (9) в (6). Полученное алгебраическое уравнение разрешим относительно искомого управления:

$$U = m - m_0 - \frac{T_w T_s}{2} \left( \frac{d^2\phi(\omega, z)}{dt^2} + \lambda_1 \left( \frac{2}{T_w} m + \frac{d\phi(\omega, z)}{dt} \right) + \lambda_1 \left( m + \frac{P_m}{2} + \frac{2}{T_w} z_1 + \phi(\omega, z) \right) \right). \quad (10)$$

Окончательный вид управление (10) приобретет после того, как подставить в него «внутреннее» управление  $\phi(\omega, z)$  и его производные.

При попадании изображающей точки системы (4) на пересечение многообразий  $\psi_1 = 0, \dot{\psi}_1(t) = 0$  происходит динамическая декомпозиция этой системы, а из равенств  $\psi_1 = 0, \dot{\psi}_1(t) = 0$  можем получить алгебраические соотношения, описывающие поведение переменных  $P_m(t), m(t)$  на этом пересечении. Итак, поведение системы (4) описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned}\frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{H} \left( -2m^* - \frac{4}{T_w} z_1 - 2\varphi(\omega, z) - D(\omega - 1) - z \right); \\ \frac{dz_1}{dt} &= -m^* - \frac{2}{T_w} z_1 - \varphi(\omega, z); \\ \frac{dz}{dt} &= \xi(\omega_0 - \omega).\end{aligned}\tag{11}$$

В полученной декомпозированной системе (11) имеется «внутреннее» управление  $\varphi(\omega, z)$ , которое подлежит определению на следующем этапе процедуры синтеза закона управления, исходя из задачи выполнения инварианта (2). Таким образом, зададим финишную макропеременную:

$$\psi_2 = \xi(\omega_0 - \omega) + \beta z.\tag{12}$$

Эта макропеременная должна удовлетворять решению основного функционального уравнения

$$T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0,\tag{13}$$

условием устойчивости которого является условие  $T_2 > 0$ .

При попадании изображающей точки системы (11) на многообразие  $\psi_2 = 0$  выполняется инвариант (2), т.е.  $\omega = \omega_0$ . Теперь мы можем найти выражение для «внутреннего» управления  $\varphi(\omega, z)$ . Для этого необходимо расписать уравнение (13) с учетом макропеременной (12) в силу уравнений декомпозированной системы (11). Из этого выражения окончательно получим

$$\begin{aligned}\varphi(\omega, z) &= -\frac{H}{2\xi} \left( \beta\xi(\omega_0 - \omega) + \frac{1}{T_2} (\xi(\omega_0 - \omega) + \beta z) \right) - \\ &- m^* - \frac{2}{T_w} z_1 - \frac{D}{2} (\omega - 1) - \frac{z}{2}.\end{aligned}\tag{14}$$

Выражение (14) подставим в (10) и получим окончательное выражение для закона управления частотой вращения ротора гидротурбины.

Итак, синтезирован закон управления (10) для гидротурбины, обеспечивающий выполнение технологического инварианта (2) и подавление внешнего кусочно-постоянного возмущения  $P_c(t) = P_{c0} = const$ , обусловленного изменением электрической мощности гидрогенератора.

**Моделирование замкнутой системы.** Параметры турбины [6]:  $P_{сн\text{ом}} = 0,5$ ;  $D = 1$ ;  $T_s = 1$ ;  $m_0 = 0,5$ ;  $H = 10$ ;  $T_w = 4$ . Параметры закона управления (10):  $\omega_0 = 1$ ;  $\lambda_1 = 10/3$ ;  $\lambda_2 = 2,78$ ;  $T_2 = 6$ ;  $\xi = 0,4$ ;  $\beta = 2,5$ .

При моделировании замкнутой системы (4) с синергетическим законом (10) вместо переменной  $z$  в первое уравнение подается внешнее кусочно-постоянное возмущение:

$$P_c(t) = \begin{cases} P_{сн\text{ом}}, & t < t_g; \\ P_{сн\text{ом}} + A, & t \geq t_g, \end{cases}\tag{15}$$

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

Результаты моделирования замкнутой системы (4) с синтезированным выше синергетическим законом управления частотой вращения гидротурбины  $U$  (10) и возмущением  $P_c(t) = P_{c0} = const$  (15) представлены на рис. 2–5 (графики показаны сплошной линией). При этом на рис. 2–4 пунктирной линией показаны результаты моделирования гидротурбины с возмущением (15) и традиционным ПИД-законом регулирования, параметры для которого рассчитаны в [6]:

$$U(p) = \left( K_p + \frac{K_I}{p} + \frac{K_d p}{T_d p + 1} \right) \varepsilon(p), \quad (16)$$

где  $\varepsilon(p) = \Delta P(p) + (\omega_0 - \omega(p))$  – ошибка;  $K_p = 1,45$ ;  $K_I = 0,117$ ;  $K_d = 2,5$ ;  $T_d = 0,005$ .

Из результатов моделирования видно, что закон управления (10), в отличие от традиционного ПИД-закона (16), обеспечивает выполнение технологического инварианта (2) – безошибочную стабилизацию частоты вращения гидротурбины (рис. 2). При этом подавляется внешнее кусочно-постоянное возмущение  $P_c(t) = P_{c0} = const$  (15), поскольку частота вращения  $\omega(t)$  принимает заданное значение  $\omega_0 = 1$  при изменении нагрузки. Применение синергетического закона управления увеличивает быстродействие, устойчивость и робастность гидротурбины, т.е. повышает технологическую безопасность ГЭС.

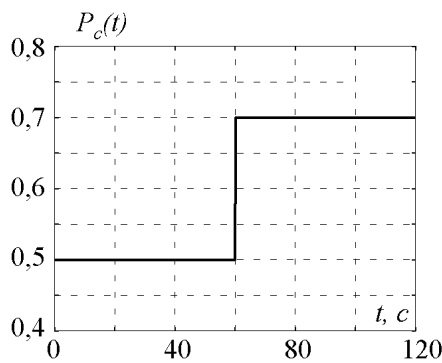


Рис. 1. График изменения нагрузки (15)

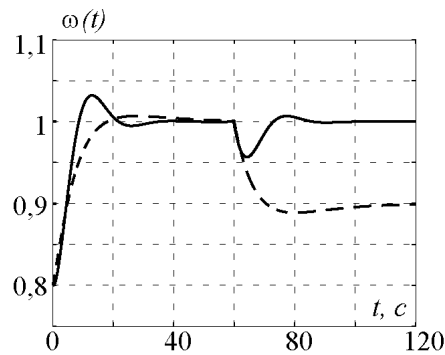


Рис. 2. Графики изменения частоты вращения  $\omega(t)$

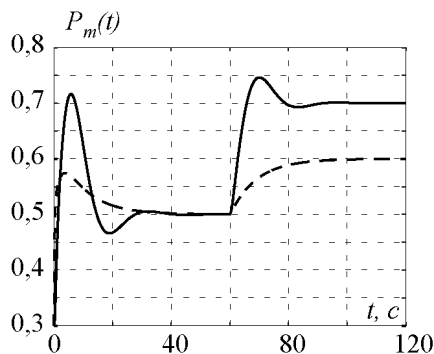


Рис. 3. Графики изменения механической мощности  $P_m(t)$

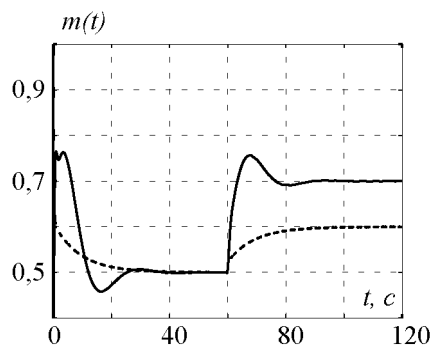


Рис. 4. Графики изменения величины открытия водяного шлюза  $m(t)$

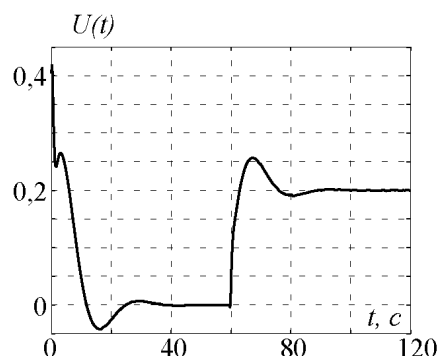


Рис. 5. График изменения управления  $U(t)$  (10)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Галашов Н.Н.* Технологические процессы выработки электроэнергии на ТЭС и ГЭС. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.
2. *Пивоваров В.А.* Проектирование и расчет систем регулирования гидротурбин. – Л.: Машиностроение, 1973.
3. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.
4. Современная прикладная теория управления: Ч.II. Синергетический подход в теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. – М.–Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
5. *Колесников А.А., Кузьменко А.А., Веселов Г.Е.* Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии. – М.: Изд. дом МЭИ, 2011. – 280 с.
6. *Khodabakhshian A., Hooshmand R.* A new PID controller design for automatic generation control of hydro power systems // *Electrical Power and Energy Systems*. – 2010. – № 32. – P. 375-382.
7. *Арнольд В.И.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М.: Наука, 1984.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.М. Першин.

**Кузьменко Андрей Александрович** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: [andrew.kuzmenkosipu@gmail.com](mailto:andrew.kuzmenkosipu@gmail.com); 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634360707; кафедра синергетики и процессов управления; к.т.н.; доцент.

**Kuz'menko Andrey Alexandrovitch** – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: [andrew.kuzmenkosipu@gmail.com](mailto:andrew.kuzmenkosipu@gmail.com); 2, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360707; the department of synergetics and control; cand. of eng. sc.; associate professor.