

Раздел V. Методы управления техническими системами

УДК 681.511.4

А.А. Кузьменко

ИНТЕГРАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ ПРИ СИНТЕЗЕ НЕЛИНЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ГРЕБНОГО ВИНТА СУДОВОЙ ТУРБИНЫ

Энергетические системы подвижных объектов играют чрезвычайно важную роль в задачах обеспечения требуемого движения, а эффективность их функционирования напрямую связана со способностью объектов выполнять поставленные задачи в условиях непредсказуемого действия внешней среды. В докладе рассмотрено решение задачи интегральной адаптации нелинейного регулятора частоты вращения вала гребного винта судовой турбины, базирующееся на синергетической концепции единства процессов направленной самоорганизации и управления. Проведено моделирование и сравнение традиционного регулятора и синтезированного синергетического регулятора частоты вращения вала гребного винта судовой турбины.

Судовая турбина; синергетическое управление; аттрактор-инвариант; возмущение; интегральная адаптация.

A.A. Kuz'menko

INTEGRAL ADAPTATION AT VESSEL TURBINE PROPELLER SHAFT ROTATION FREQUENCY NONLINEAR CONTROL SYNTHESIS

Power systems for mobile objects are very essential in providing desired motion; object ability to realize the objectives under unpredictable actions of external environment is directly depended to power systems efficiency. In the report we explore solution for integral adaptation of vessel turbine propeller shaft rotation frequency nonlinear control, based on synergetics conception of unity of directed self-organization and control processes. We provide modeling as well as comparison of conventional control and obtained vessel turbine propeller shaft rotation frequency synergetics one.

Ship's turbine; synergetics control; attractor – invariant; disturbance; integral adaptation.

1. Постановка задачи управления. К одним из наиболее важных классов технических систем относятся подвижные объекты. Энергетические системы подвижных объектов играют первостепенную роль в задачах обеспечения требуемого движения, а эффективность их функционирования напрямую связана со способностью объектов выполнять поставленные задачи в условиях непредсказуемого действия внешней среды. В таких условиях качество и эффективность производства механической энергии в подвижных объектах можно в значительной мере повысить за счет модернизации используемых алгоритмов управления. В этой связи наиболее перспективным направлением модернизации является нелинейное адаптивное управление. Как известно, основу адаптивных систем управления составляют наблюдатели состояния и возмущения. Однако построение адаптивных систем управления, опирающихся на принцип интегральной адаптации синергетической теории управления [1–3], не требует синтеза наблюдателей состояния и возмущения. Построению нелинейного адаптивного регулятора частоты вращения

вала гребного винта судовой турбины, синтез которого осуществляется в соответствии с принципом интегральной адаптации метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), и посвящен данный доклад.

В [4] приведена следующая нелинейная модель системы регулирования частоты вращения вала гребного винта судовой турбины:

$$\begin{aligned}
 T_a \frac{dn}{dt} &= k_n (k_{1TBD} k_{2TBD} p_2 + k_{1TND} k_{2TND} p_3) - bn^2 - M(t); \\
 T_{1po} \frac{dp_2}{dt} &= -p_2 + k_{1po} (-4,67 + 0,794m_2 - 0,00278m_2^2); \\
 T_{2po} \frac{dp_3}{dt} &= -p_3 + k_{2po} p_2; \\
 T_{cm} \frac{dm_2}{dt} &= -m_2 + k_{cm} m_1; \\
 T_{pcm} \frac{dm_1}{dt} &= -m_1 + p_e; \\
 T_e \frac{dp_e}{dt} &= -p_e + k_e u_u'',
 \end{aligned} \tag{1}$$

здесь n – частота вращения вала гребного винта турбины; $M_T = k_n (k_{1TBD} k_{2TBD} p_2 + k_{1TND} k_{2TND} p_3)$ – вращающий (механический) момент на валу турбины; $M_n = bn^2$ – момент нагрузки вала турбины; p_2, p_3 – давления на выходах первого и второго паровых объемов (ПО); $G_{pk} = -4,67 + 0,794m_2 - 0,00278m_2^2$ – расход пара через регулировочный клапан (РК) турбины; p_e – давление масла на выходе электрогидравлического преобразователя (ЭГП) турбины; m_1 – ход промежуточного сервомотора (ПСМ); m_2 – ход сервомотора (СМ) переднего хода; u_u'' – управляющее воздействие (напряжение на выходе усилителя ЭГП); T_a – приведенная постоянная времени инерции турбины; $T_{1po}, T_{2po}, T_e, T_{pcm}, T_{cm}$ – постоянные времени соответствующих подсистем турбины; $k_{1po}, k_{2po}, k_e, k_{cm}$ – постоянные коэффициенты; $M(t)$ – неизмеряемое внешнее возмущение, действующее на вал турбины.

Механический момент на валу турбины (1) содержит две компоненты, создаваемые частями высокого и низкого давления турбины соответственно. Давление части высокого давления p_2 является выходом первого ПО, а давление части низкого давления p_3 – выходом второго ПО. При этом из структуры уравнений, описывающих ПО, видно, что давление p_3 формируется за счет изменения давления p_2 . Управляющее воздействие u_u'' соответствующим образом (согласно структуре регулятора) изменяет давление масла на выходе ЭГП, что, в свою очередь, воздействует на ПСМ и СМ и приводит к изменению расхода пара через РК турбины G_{pk} . Таким образом, регулируя расход G_{pk} , изменяем давление p_2 , что позволяет сформировать такой механический момент на валу турбины, который обеспечит баланс моментов на валу турбины и, как следствие, постоянство частоты

ты вращения турбины. Итак, из рассмотренного выше анализа процесса регулирования частоты вращения вала гребного винта судовой турбины следует основной технологический инвариант (в терминах метода АКАР это аттрактор-инвариант):

$$n = n_0, \quad (2)$$

т.е. частота вращения n должна принимать постоянное значение n_0 .

Внешнее возмущающее воздействие $M(t)$ отражает изменение момента нагрузки M_n и обусловлено непредсказуемой вариацией нагрузки на валу гребного винта. Это воздействие можно представить кусочно-постоянным возмущением, так как в установившемся режиме $M_n = const$. Таким образом, задача управления сводится к синтезу закона управления частотой вращения вала гребного винта судовой турбины u_n'' в функции координат состояния системы (1), который обеспечивает выполнение следующих целей: 1) выполнение технологического инварианта (2) – стабилизация частоты вращения ротора турбины; 2) подавление кусочно-постоянного возмущения $M_n = const$. Согласно методу АКАР [1–3], первоначально необходимо представить неизмеряемое внешнее возмущающее воздействие $M(t) = M_0 = const$ как частное решение некоторого дополнительного дифференциального уравнения, задаваемого с учетом цели управления – технологического инварианта (2). В нашем случае предлагается использовать следующую модель кусочно-постоянного возмущения $M(t)$:

$$\frac{dz}{dt} = \xi (n - n_0), \quad (3)$$

здесь z – оценка неизмеряемого возмущения $M(t)$, ξ – постоянный коэффициент. На этапе синтеза регулятора необходимо в уравнениях (1) заменить $M(t)$ его оценкой, т.е. $M(t) = z$, а на этапе моделирования замкнутой системы в качестве $M(t)$ выступает заранее неизвестная кусочно-постоянная функция времени.

2. Синергетический синтез интегрального адаптивного регулятора. Метод АКАР подробно изложен в [1–3], а его применение к задачам управления тепло- и электроэнергетическими системами показано в [5–7]. Процедура синергетического синтеза нелинейного регулятора частоты вращения вала гребного винта судовой турбины состоит из трех этапов, на которых вводятся соответствующие многообразия – аттракторы, удовлетворяющие основным функциональным уравнениям метода АКАР. Рассмотрим процедуру синтеза нелинейного регулятора.

I этап. На этом этапе синтеза регулятора зададим многообразию

$$\psi_1 = p_3 - \varphi(n, z) = 0, \quad (4)$$

которое должно удовлетворять решению функционального уравнения

$$\ddot{\psi}_1(t) + \lambda_1 \dot{\psi}_1(t) + \lambda_2 \psi_1(t) + \lambda_3 \psi_1 = 0. \quad (5)$$

Уравнение вида (5) при $\lambda_j > 0, j = \overline{1, 3}$ и выполнении неравенства $\lambda_1 \lambda_2 > \lambda_3$ асимптотически устойчиво относительно $\psi_1 = 0, \dot{\psi}_1(t) = 0$ и $\ddot{\psi}_1(t) = 0$. Таким образом, выполняются равенства:

$$\begin{cases} \psi_1 = p_3 - \varphi(n, z) = 0; \\ \dot{\psi}_1(t) = \frac{dp_3}{dt} - \frac{d\varphi(n, z)}{dt} = 0; \\ \ddot{\psi}_1(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dp_3}{dt} \right) - \frac{d^2\varphi(n, z)}{dt^2} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

При попадании изображающей точки системы на многообразия (6) происходит динамическая декомпозиция системы (1), (3). В результате этой декомпозиции поведение системы будет описываться следующими дифференциальными уравнениями, записанными с учетом (6):

$$\begin{aligned} T_a \frac{dn}{dt} &= k_n (k_{1TBD} k_{2TBD} p_2^* + k_{1TND} k_{2TND} \varphi(n, z)) - bn^2 - z; \\ \frac{dz}{dt} &= \xi (n - n^0), \end{aligned} \quad (7)$$

здесь p_2^* – значение давления p_2 , полученное из (6).

В декомпозированной системе (7) имеется «внутреннее» управление $\varphi(n, z)$, которое подлежит определению на следующем этапе процедуры синтеза регулятора, исходя из задачи выполнения желаемого инварианта (2).

II этап. Для выполнения инварианта (2) зададим финишное многообразие

$$\psi_2 = \xi(n - n_0) + \beta z = 0. \quad (8)$$

Это многообразие должно удовлетворять решению дифференциального уравнения

$$T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0, \quad (9)$$

условием устойчивости которого является неравенство $T_2 > 0$.

При попадании изображающей точки системы (7) на многообразии $\psi_2 = 0$ также происходит ее динамическая декомпозиция, в результате чего конечное поведение этой системы, с учетом (8), будет описываться дифференциальным уравнением

$$\frac{dz}{dt} = -\beta z, \quad (10)$$

условием устойчивости которого, очевидно, является $\beta > 0$. Из уравнения (10) видно, что его решением является $z(t) = z_0 e^{-\beta t}$, при этом $z(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Следовательно, в соответствии с (8), на многообразии $\psi_2 = 0$ выполняется инвариант (2), т.е. $n = n_0$.

Теперь мы можем найти выражение для «внутреннего» управления $\varphi(n, z)$.

Для этого необходимо расписать уравнение (9) с учетом многообразия (8) в силу уравнений декомпозированной системы (7):

$$\varphi(n, z) = \frac{1}{k_n k_{1TND} k_{2TND}} \begin{pmatrix} -k_{1TBD} k_{2TBD} p_2^0 + bn^2 + z - \\ -T_a \beta (n - n^0) - \frac{T_a}{\xi T_2} (\xi (n - n^0) + \beta z) \end{pmatrix}. \quad (11)$$

III этап. На этом этапе найдем выражение для управления u''_u . Для этого распишем многообразие (4) с учетом уравнений расширенной модели (1), (3) и «внутреннего» управления (11), а полученное в этом случае выражение подставим в функциональное уравнение (5), которое и разрешим относительно искомого управления u''_u . В итоге имеем

$$u''_u = \frac{1}{k_{cm}k_e} \left[m_2 - \frac{1}{k_{1po}k_{2po}} \frac{\partial G_{pk}(m_2)}{\partial m_2} \left(\left(-\frac{1}{(T_{2po})^3} - \frac{\lambda_1}{T_{2po}} + \lambda_2 \right) \times \right. \right. \\ \times \frac{1}{T_{2po}} (-p_3 + k_{2po}p_2) + \left(-\frac{k_{2po}}{(T_{2po})^2} - \frac{1}{T_{1po}T_{2po}} + \frac{\lambda_1 k_{2po}}{T_{2po}} \right) \times \\ \times \frac{1}{T_{1po}} (-p_2 + k_{1po}G_{pk}(m_2)) - \ddot{\varphi}(p_2, p_3, n, z, m_2) - \\ \left. \left. - \lambda_1 \dot{\varphi}(p_2, p_3, n, z, m_2) - \lambda_2 \dot{\varphi}(p_2, p_3, n, z) + \lambda_3 (p_3 - \varphi(n, z)) \right) \right], \quad (12)$$

где $\dot{\varphi}(p_2, p_3, n, z) = \frac{d}{dt}(\varphi(n, z))$, $\ddot{\varphi}(p_2, p_3, n, z, m_2) = \frac{d^2}{dt^2}(\varphi(n, z))$,

$\ddot{\varphi}(p_2, p_3, n, z, m_2) = \frac{d^3}{dt^3}(\varphi(n, z))$ – аналитические выражения, получаемые путем дифференцирования функции (11) с учетом уравнений (1), (2).

Окончательный вид управление u''_u приобретет после того, как подставить в выражение (12) соответствующие частные и полные производные функции (11).

В [4] отмечается, что традиционный регулятор частоты вращения вала гребного винта судовой турбины, используемый и в настоящее время, задается выражением:

$$u''_u = k''_u(k_2 n_0 + k'_u(k_1 n_0 - n) - k_{oc} m_1), \quad (13)$$

т.е. представляет собой пропорциональный регулятор.

3. Результаты моделирования. На рис. 1 показан график изменения внешнего кусочно-постоянного возмущения $M(t)$: первоначально турбина работает в номинальном режиме при $M(t) = 0$, затем, в момент времени $t = 30$ с, увеличивается нагрузка и момент принимает значение $M(t) = 0,5$, в момент времени $t = 60$ с происходит сброс нагрузки – $M(t) = -0,5$. На рис. 2–5 показаны соответствующие этому графику изменения нагрузки результаты моделирования замкнутой системы (1) с синергетическим регулятором (12) (графики изображены сплошными линиями), и традиционным регулятором (13) (графики изображены пунктирными линиями).

Параметры турбины [4]: $T_a = 0,134$ с; $k_n = 0,0157$; $k_{1TBD} = 1,39$; $k_{2TBD} = 0,878$; $k_{1TND} = 11,1$; $k_{2TND} = 0,854$; $b = 0,000072$; $T_{1po} = 0,174$ с; $k_{1po} = 0,72$; $T_{2po} = 0,32$ с; $k_{2po} = 0,091$; $T_{cm} = 0,36$ с; $k_{cm} = 4,04$; $T_{pcm} = 0,0215$ с; $T_e = 0,01$ с.

Параметры традиционного регулятора [4]: $n_0 = 11,5$; $k_1 = 1,057$; $k_2 = 0,12$; $k_{oc} = 10$; $k'_u = 522$; $k''_u = 0,01$, и синергетического регулятора – $n_0 = 11,5$; $\lambda_1 = 6$; $\lambda_2 = 12$; $\lambda_3 = 8$; $T_2 = 2$; $\zeta = 0,001$; $\beta = 2$.

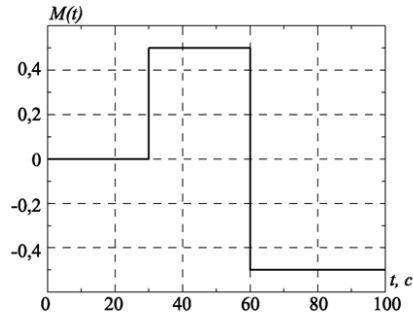


Рис. 1. График изменения внешнего возмущения $M(t)$

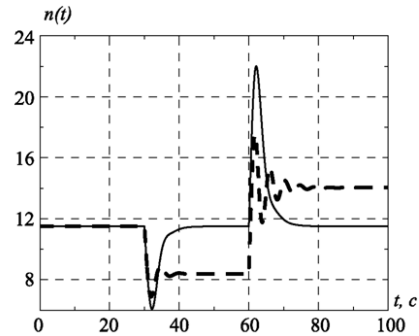


Рис. 2. Графики изменения частоты вращения $n(t)$

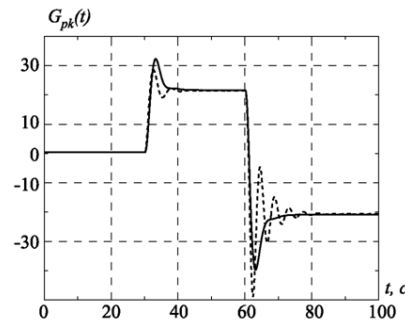


Рис. 3. Графики изменения расхода пара $G_{pk}(t)$

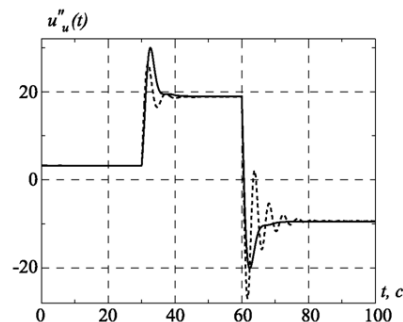


Рис. 4. Графики изменения управления $u''_u(t)$

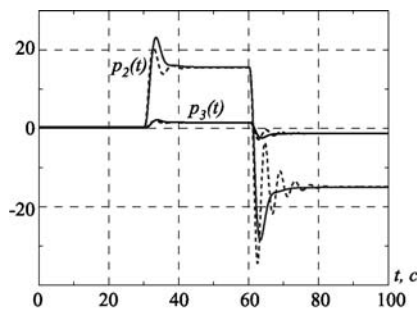


Рис. 5. Графики изменения давления $p_2(t)$, $p_3(t)$

Из этих графиков видно:

1) расход пара G_{pk} и управление u'' и при традиционном (13), и при синергетическом регуляторе (12) принимают одинаковые установившиеся значения;

2) лишь при синергетическом регуляторе (12) частота вращения оказывается инвариантной к изменению нагрузки на валу гребного винта турбины, представленной кусочно-постоянным возмущением $M(t)$;

3) при таком же изменении момента нагрузки $M(t)$ и схожем быстродействии переходных процессов изменение переменных состояния турбины (1) при синергетическом регуляторе (12) носит аperiодический, а не колебательный характер, как в случае использования традиционного регулятора (13).

Таким образом, результаты моделирования продемонстрировали явные преимущества нелинейного адаптивного регулятора (12), построенного согласно принципу интегральной адаптации метода АКАР. При этом адаптация к изменению внешнего неизмеряемого возмущения $M(t)$ осуществляется без построения наблюдателя возмущения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
2. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.
3. Колесников А.А. Метод интегральной адаптации нелинейных систем управления на инвариантных многообразиях: наилучшие возмущения // Материалы 6-й научной конференции "Управление и информационные технологии (УИТ-2010)". – СПб., 2010. – С. 29-34.
4. Душин С.Е., Красов А.В., Кузьмин Н.Н., Яковлев В.Б. Синтез структурно-сложных нелинейных систем управления: системы с полиномиальными нелинейностями. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ («ЛЭТИ»), 2004. – 278 с.
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. Кузьменко А.А. Нелинейное адаптивное управление турбогенератором // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 1. – С. 112-119.
7. Кузьменко А.А. Синергетическое управление турбиной судовой энергоустановки // Известия ТРТУ. – 2006. – № 9 (64). – С. 170-171.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Л. Заковоротный.

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.

347900, 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.

2, Chexova Street, Taganrog, 347900, Russia.

Phone: +78634360707.

The Department of Synergetics and Control; Cand. of Eng. Sc.; Associate Professor.