

Замечание 2. По-видимому, применение других критериев меры хаотичности не добавит информации, так как в силу конечного числа разрядов, используемых для машинного представления анализируемых величин, степень расхождения траекторий будет ограничена (см., например, поведение показателя Ляпунова для псевдослучайных последовательностей в [6. С. 47]).

Замечание 3. В силу детерминированности рядов (1), (2) выводы по результатам численного исследования энтропийных свойств указанных рядов достаточны для вынесения решений в практических задачах.

В заключение отметим целесообразность проведения исследований относительно оценивания криптостойкости предложенного подхода, связанного с оценкой числа необходимых операций для вскрытия ключа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фейгенбаум М.* Универсальность в поведении нелинейных систем // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 141. – Вып. 2. – С. 343-374.
2. *Колесников А.А.* Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 230 с.
3. *Колесникова С.И.* Метод распознавания и оценивания состояний слабоформализованного динамического объекта на основе разметки временного ряда // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 41-52.
4. *Колесникова С.И.* Использование апостериорной информации для управления плохо формализуемым динамическим объектом // Автометрия. – 2010. – Т. 46, № 6. – С. 78-89.
5. *Kosarev L.* Chaos-based cryptography: a brief overview // Circuits and systems. – 2001. – Vol. 3. – С. 6-21.
6. *Птицын Н.* Приложение теории детерминированного хаоса в криптографии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 81 с.
7. *Болтенков В.А., Никольский Е.С.* Анализ алгоритмов хаотического шифрования изображений // Цифровые технологии. – 2010. – № 7. – С. 61-66.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.Е. Веселов.

Колесникова Светлана Ивановна – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; e-mail: skolesnikova@yandex.ru; 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; тел.: 83822510530; к.ф.-м.н.; доцент.

Kolesnikova Svetlana Ivanovna – Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics; e-mail: skolesnikova@yandex.ru; 40, Lenin aven., Tomsk, 634050, Russia; phone: +73822510530; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 681.51

Ал.А. Колесников

МЕТОД НЕЛИНЕЙНОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ

Предложен новый нелинейный закон адаптивного управления электромагнитной системой активной виброзащиты (САВ), позволяющий компенсировать внешние гармонические возмущения на разные классы технологических и подвижных объектов, что непосредственно связано с их технологической безопасностью. Синтезированный закон управления САВ обладает значительными преимуществами перед известными, например линейными законами управления САВ разных объектов. Предложенный метод может найти применение при создании САВ разного применения. Существенной новизной метода является, во-первых, процедура каскадного синтеза законов управления, во-вторых, создание единства процессов технологической самоорганизации и управления.

Виброзащита; электромагнитная система; закон адаптивного управления; внешние гармонические возмущения.

A.I.A. Kolesnikov

METHOD OF NONLINEAR ADAPTIVE CONTROL OF ACTIVE VIBRATION PROTECTION SYSTEMS

In the report we propose a new nonlinear adaptive control law of electromagnetic active vibration protection system that allows compensating the external harmonic perturbation on different classes of technological and mobile objects, which is directly related to their technological security. The synthesized control law of active vibration protection system has significant advantages over the known ones, for example, linear control laws for active vibration protection system of various objects. The proposed method may be applied for active vibration protection system design of various purposes. The essential novelty of the method are the procedure of control law cascade synthesis and creation of unity for processes of self-organization and control.

Vibration protection; electromagnetic system; adaptive control law; external harmonic disturbances.

Введение. Проблема технологической защиты разных объектов и систем является одной из фундаментальных проблем современной науки и техники. В связи с этим важной задачей, распространенной во многих областях промышленности, – энергетике, транспорте, машиностроении, приборостроении, оборонной промышленности и др. – является разработка эффективных систем виброзащиты [1–18], т.е. систем подавления вибраций, создаваемых, в частности, различными энергетическими установками [16–18].

Существующие в настоящее время методы виброзащиты разделяются на активные и пассивные. Методы активной виброзащиты позволяют с помощью дополнительного источника энергии создавать противофазные колебания, в соответствующей мере компенсирующие виброколебания [1–18]. Создание систем активной виброзащиты (САВ) является важной прикладной задачей теории управления нелинейными колебаниями. Очевидно, что различные САВ, применяемые в различных установках и машинах, непосредственно связаны с проблемой технологической безопасности.

В технике наиболее распространены комбинированные САВ, которые включают в себя также пассивные амортизаторы, что позволяет уменьшить мощность активного элемента системы. В настоящее время наиболее распространены САВ следующих типов: электромагнитные, гидравлические и пневматические. К преимуществам электромагнитной САВ относятся стабильность характеристик, высокое быстродействие, совместимость с упругими амортизаторами, а также возможность значительных боковых смещений подвижной платформы относительно виброизолирующего основания [16–18].

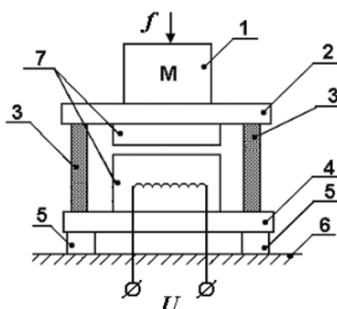


Рис. 1. Система активной виброзащиты

На рис. 1 изображена схема одного из блоков САВ, разрабатываемых в Санкт-Петербургском ЦНИИ «Электроприбор» [16–18], где обозначено: 1 – источник вибраций с массой, 2 – подвижная платформа, 3 – амортизаторы, 4 – неподвижная платформа, 5 – датчики силы, 6 – виброизолируемое основание, 7 – электромагнит.

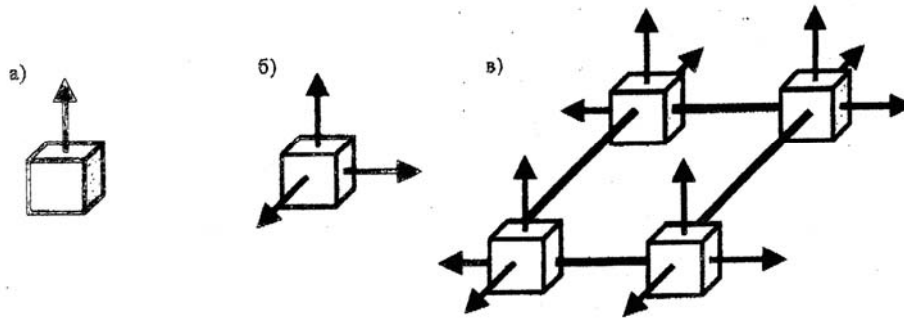


Рис. 2. Классификация САВ

САВ, разрабатываемые для подавления вибраций, могут быть однокоординатными одноточечными (рис. 2,а), трехкоординатными одноточечными (рис. 2,б) и трехкоординатными многоточечными (рис. 2,в). В зависимости от конструкции технического объекта компонуются соответствующие САВ, базовым элементом которых является одноконтурная система [18].

Опишем кратко конструкцию электромагнитной САВ, разработанную в ЦНИИ «Электроприбор» (рис. 1), и поставим задачу управления этой системой [16–18]. Основная задача такой САВ состоит в снижении уровня вибрационных сил, которые передаются через амортизированную опору на фундамент соответствующего оборудования. Как правило, конструкции различных устройств, для которых требуется решение проблемы виброизоляции, имеют многоопорную схему крепления. При этом опоры могут иметь несколько поверхностей соприкосновения с виброизолирующим основанием, которое может иметь различную ориентацию в пространстве. Поэтому в ЦНИИ «Электроприбор» разработаны многокоординатные и многоточечные САВ (рис. 2). Под однокоординатной одноточечной понимается система, которая подавляет вибрации в одном направлении в одной опоре (рис. 2,а). Многокоординатная одноточечная САВ представляет собой систему, подавляющую вибрацию в одной опоре, но в трех взаимно ортогональных направлениях (рис. 2,б). Наиболее сложной является многокоординатная многоточечная САВ, которая подавляет вибрации в нескольких опорах объекта (рис. 2,в).

Рассмотрим теперь кратко структуру однокоординатной САВ (см. рис. 1). В такой САВ источник вибрации 1 располагается на амортизационной платформе 2 и создает вибрацию, условно обозначенную в виде внешнего воздействия $f(t)$. Защиту виброизолируемого основания 6 осуществляют пассивный и активный элементы САВ. При этом пассивный элемент представляет собой резиновый амортизатор 3, а активный элемент реализуется в виде электромагнита 7, закрепленного между подвижной 2 и неподвижной 4 платформами САВ. Совместное использование пассивных и активных элементов виброзащиты позволяет расширить частотный диапазон подавляемых внешних вибраций и оптимизировать конструктивные показатели САВ [18]. Активный элемент САВ, реализуемый в виде электромагнита, создает вибрации, противофазные внешним возмущениям $f(t)$. Управляя напряжением U (см. рис. 1) электромагнита, необходимо обеспечить подавление

вибрационных сил от источника вибрации M , которые передаются на виброизолируемое основание b соответствующего технологического или подвижного объектов. Более подробное описание конструкции и действия электромагнитной САВ приведено в известных работах [16–18].

Перейдем к разработке нового метода каскадного синтеза законов управления одноконтурных САВ (см. рис. 1).

Математическая модель САВ. Математическая модель САВ, построенная на основе положений работы [16], имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1(t)}{dt} &= -ax_1 + bu, \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= -\alpha_1x_2 - \alpha_2x_3 - \frac{1}{M}F(x_1) + \frac{1}{M}f(t) - g, \\ \frac{dx_3(t)}{dt} &= x_2, \\ y &= \gamma x_3 + F(x_1) - mg,\end{aligned}\quad (1)$$

где x_1 – ток электромагнита; x_2, x_3 – скорость и положение подвижной платформы; $F(x_1) = \beta_0x_1^2$ – управляющая сила; $f(t) = A\sin \omega t$; M_0, M_1 – постоянные возмущения, обусловленные силой тяжести; β_0 – параметр электрической цепи объекта.

Задача управления состоит в подавлении действия возмущений, а именно в достижении условия

$$y = \gamma x_3 + F(x_1) - mg \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где y – величина, пропорциональная силе, действующей на виброизолированное основание; ε – малая величина. Минимизация переменной y является основной целью построения электромагнитной САВ [16–18].

Для решения поставленной задачи управления САВ на основе (1) построим расширенную модель синтеза

$$\begin{aligned}\frac{dx_1(t)}{dt} &= -ax_1 + bu, \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= -\alpha_1x_2 - \alpha_2x_3 - \frac{1}{M}F(x_1) - z(t), \\ \frac{dx_3(t)}{dt} &= x_2, \\ \frac{dz(t)}{dt} &= y, \\ y &= \gamma x_3 + F(x_1) - M_0,\end{aligned}\quad (3)$$

где z – дополнительная переменная, предназначенная для подавления внешних возмущений $f(t)$ (см. рис. 1).

Синтез нелинейного закона управления САВ. Согласно структуре расширенной модели синтеза (2), для построения закона управления u достаточно использовать два каскада введения инвариантов-аттракторов. В связи с этим для синтеза закона управления u введем сначала первую макропеременную

$$\psi_1 = \sqrt{\beta_p}x_1 + \sqrt{x_4}, \quad (4)$$

где x_4 – некоторая дополнительная переменная, отражающая «внутреннее» управление; β_p – параметр регулятора. Тогда, подставляя ψ_1 (4) в первое инвариантное соотношение

$$T_1 \dot{\psi}_1(t) + \psi_1 = 0, \quad (5)$$

получаем выражение

$$\sqrt{\beta_p} \dot{x}_1(t) - \frac{\dot{x}_4(t)}{2\sqrt{x_4}} + \frac{1}{T_1} \psi_1 = 0. \quad (6)$$

Подставляя теперь первое уравнение системы (3) в (6), находим базовое уравнение синтеза закона управления

$$(bu - ax_1) \sqrt{\beta_p} = \frac{\dot{x}_4(t)}{2\sqrt{x_4}} + \frac{1}{T_1} \psi_1, \quad (7)$$

которое отражает действие электромагнитной части на поведение САВ.

Уравнение (5) является асимптотически устойчивым относительно инвариантного многообразия ψ_1 (4), т.е. после окончания переходных процессов, определяемых величиной T_1 , будем иметь

$$x_4 = \beta_p x_1^2. \quad (8)$$

Введем теперь вторую макропеременную, отражающую поведение механической части САВ, т.е.

$$\psi_2 = y + k_1 z + \lambda x_2, \quad (9)$$

или с учетом (2) и (8) имеем

$$\psi_2 = \gamma x_3 + x_4 + \lambda x_2 + k_1 z - mg. \quad (10)$$

Тогда, подставляя ψ_2 (10) во второе инвариантное соотношение

$$T_2 \dot{\psi}_2(t) + \psi_2 = 0, \quad (11)$$

получим уравнение

$$k_1 y + \gamma x_2 + \dot{x}_4(t) + \lambda \dot{x}_2(t) + \frac{1}{T_2} \psi_2 = 0. \quad (12)$$

Из (12) с учетом второго и третьего уравнений системы (3) находим производную дополнительной переменной:

$$\dot{x}_4(t) = -\gamma x_2 + \lambda \left(\alpha_1 x_2 + \alpha_3 x_3 + \frac{x_4}{M} + z \right) - k_1 y - \frac{1}{T_2} \psi_2. \quad (13)$$

Теперь, подставляя выражение $\dot{x}_4(t)$ (13) в (7), находим следующий нелинейный закон управления САВ:

$$bu = ax_1 - \frac{1}{2\sqrt{\beta_p x_4}} \left[\gamma x_2 - \lambda \left(\alpha_1 x_2 + \alpha_3 x_3 + \frac{x_4}{M} + z \right) - k_1 y - \frac{y + k_1 z + \lambda x_2}{T_2} \right] - \frac{\sqrt{\beta_p} x_1 - \sqrt{x_4}}{\sqrt{\beta_p} T_1}. \quad (14)$$

Закон управления (14) получен аналитически и представляет собой воздействие электромагнитной подсистемы на механическую подсистему САВ. В зависимости от выбора параметров β_0 , β_p , λ , T_1 и T_2 можно получить разные свойства САВ. Как отмечалось, целью управления является удовлетворение выражению $y \leq \varepsilon$ (2). В зависимости от конструктивных параметров САВ с законом управления u (14) можно получить разные значения переменной y и координаты x_3 – положения подвижной платформы. Отметим, что в закон управления u (14) вхо-

дит интегральная составляющая $z = \int y dt$, предназначенная для подавления внешних возмущений $f(t)$ на САВ. Такой способ интегральной адаптации нелинейных систем был предложен в работах [19–21].

Результаты моделирования. На рис. 3 – 8 приведены результаты моделирования САВ (1) с законом управления u (14) и параметрами $a = 33,3$, $b = 5$, $\gamma = 585000 \text{ кг/с}^2$, $m = 10 \text{ кг}$, $M = 100 \text{ кг}$, $\alpha_1 = 6,6 \text{ кг/мс}^2$, $\alpha_2 = 5890 \text{ кг/мс}^2$, $\beta_p = 10$, $\beta_{i\dot{a}} = 1$, $\lambda = 1$, $k = 1$. На САВ действует внешнее высокочастотное гармоническое возмущение $f_1(t) = 200 \sin(2000t)$.

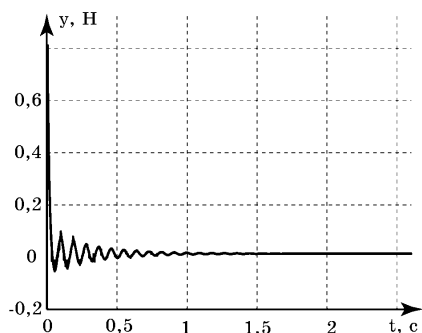


Рис. 3. Изменение $y(t)$

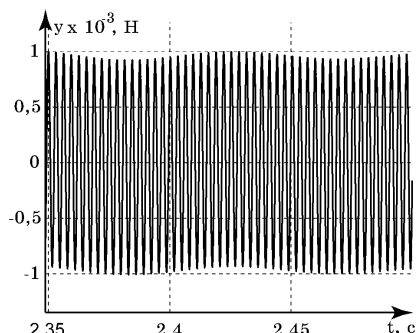


Рис. 4. Изменение $y(t)$

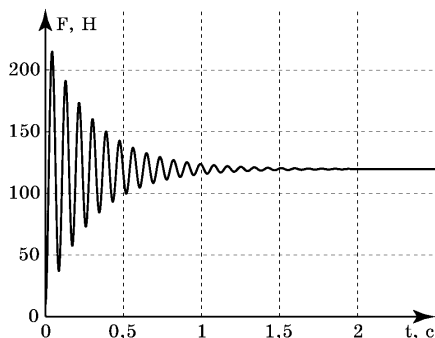


Рис. 5. Изменение $F(t)$

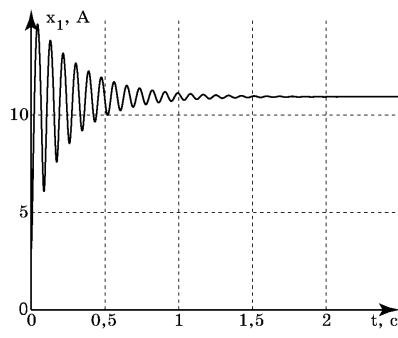


Рис. 6. Изменение $x_1(t)$

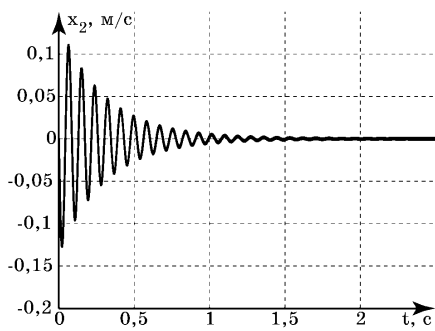


Рис. 7. Изменение $x_2(t)$

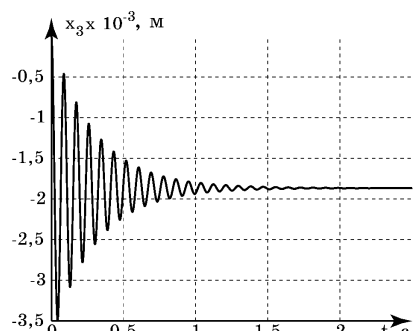


Рис. 8. Изменение $x_3(t)$

На рис. 9–14 представлены результаты моделирования при действии на САВ (1), (14) резонансного гармонического возмущения $f_2(t) = 50 \sin(50t)$.

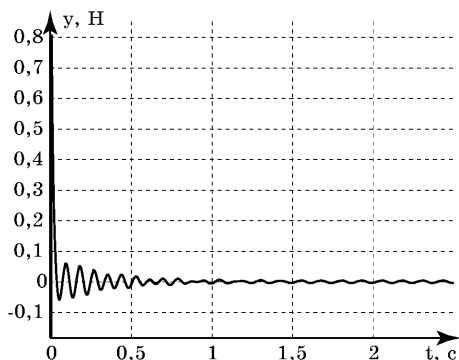


Рис. 9. Изменение $y(t)$

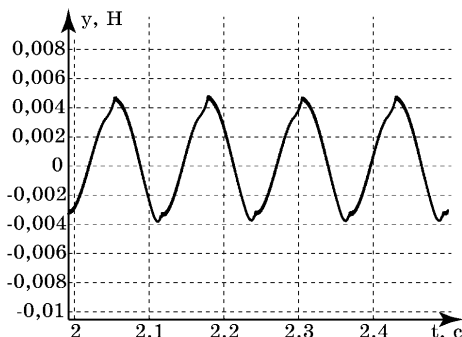


Рис. 10. Изменение $y(t)$

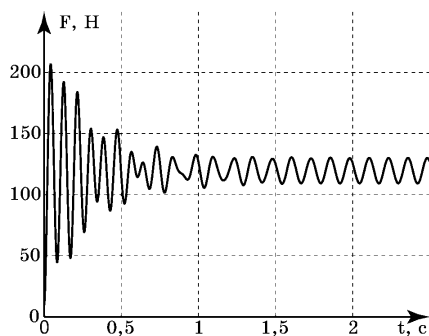


Рис. 11. Изменение $F(t)$

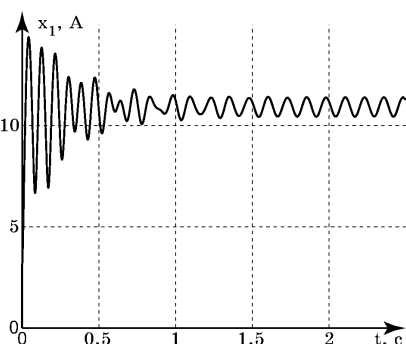


Рис. 12. Изменение $x_1(t)$

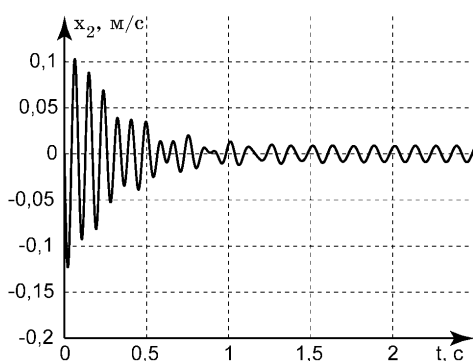


Рис. 13. Изменение $x_2(t)$

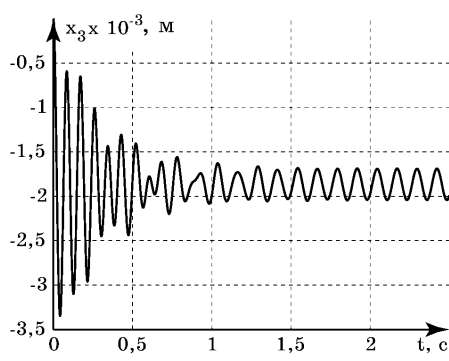


Рис. 14. Изменение $x_3(t)$

Заключение. Как видно из результатов моделирования САВ (1), (14), синтезированный нелинейный закон управления u (14) обеспечивает весьма эффективное подавление внешних возмущений.

Сравним теперь свойства САВ с линейным законом управления, синтезированным по линейной модели в известных работах [16–18], со свойствами САВ с нелинейным законом управления u (14). Это сравнение показывает, что амплиту-

да колебаний величины y (2) в САВ с линейным законом управления может достигнуть величины $\varepsilon \approx 1$, а в САВ с нелинейным законом управления (14) не превышает $\varepsilon \approx 1$ (см. рис. 4, 10). Разумеется, что указанные сравнительные результаты приведены для конкретной электромагнитной САВ, разработанной в ЦНИИ «Электроприбор».

Итак, синтезированный нелинейный закон управления САВ (1) обеспечивает ей высокие свойства в отношении подавления различных внешних возмущений. Разработанный здесь метод каскадного синтеза нелинейных законов управления может быть применен и для других конструкций и классов САВ, применяемых в различных областях современной техники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коловский М.З.* Автоматическое управление виброзащитными системами. – М.: Наука, 1976.
2. *Фролов К.В., Фурман Ф.А.* Прикладная теория виброзащитных систем. – М.: Машиностроение, 1980.
3. *Елисеев С.В., Нерубенко Г.Д.* Динамические гасители колебаний. – Новосибирск: Наука, 1982.
4. *Генкин М.Д., Елезов В.Г., Яблонский В.В.* Методы управляемой виброзащиты машин. – М.: Наука, 1985.
5. *Ионов А.В.* Средства снижения вибрации и шума на судах. – СПб.: Изд-во ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2000.
6. *Фурман Ф.А.* Активные гидравлические вибрационные системы // Вестник машиностроения. – 1972. – № 5. – С. 31-34.
7. *Бабицкий В.И., Кобринский А.Е.* Электродинамический демпфер // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1962. – № 3. – С. 39-46.
8. *Абу-Акил.* Электродинамический вибропоглотитель как пассивное или активное устройство. Конструирование и технология машиностроения // Тр. американского общества инженеров-механиков. – 1967. – № 4.
9. *Генкин М.Д., Елезов В.Г., Яблонский В.В.* Методы активного гашения вибраций механизмов // Динамика и акустика машин. – М.: Наука, 1971. – С. 70-87.
10. *Елезов В.Г.* Виброизолирующая опора с электромеханической системой регулирования // Виброакустические процессы в машинах и присоединенных конструкциях. – М.: Наука, 1974. – С. 66-75.
11. *Власов А.И.* Современное состояние и тенденции развития теории и практики активного гашения волновых полей // Приборы и системы управления. – 1997. – № 12. – С. 59-70.
12. *Генкин М.Д., Елезов В.Г., Яблонский В.В.* Критерии для выбора схем активной виброизоляции механизмов // Акустическая динамика машин и конструкций. – М.: Наука, 1973. – С. 66-69.
13. *Тартаковский Б.Д.* Многоканальная система электромеханической обратной связи общего вида (для демпфирования колебаний) // Колебания, излучение и демпфирование упругих структур. – М.: Наука, 1973. – С. 162-173.
14. *Власов А.И.* Аппаратная реализация нейрорадаптивных систем активного управления волновыми полями в промышленном стандарте РС-104 // Информационные технологии. – 1993. – № 12. – С. 13-17.
15. *Власов А.И., Семенов С.Г., Поляков Ю.А.* Микропроцессорные микросистемы активной акустической индивидуальной защиты // Микросистемная техника. – 2000. – № 2. – С. 15-20.
16. *Гутнер И.Е., Никифоров В.О., Сергачев И.В.* Математическая модель виброизолированной опоры с электромагнитным активным элементом // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2003. – № 1. – С. 13-18.
17. *Никифоров В.О., Гутнер И.Е., Сергачев И.В.* Демпфирование собственных колебаний виброизолированной опоры // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – № 1. – С. 35-41.
18. *Никифоров В.О., Гутнер И.Е., Сергачев И.В.* Система активной виброзащиты: разработка, результаты испытаний и перспективы развития // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2004. – № 2. – С. 13-18.
19. *Колесников А.А.* Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.

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-