

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кулешов А.А. Математические модели лесных пожаров // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14, № 11. – С. 33-42.
2. Воробьев О.Ю. Среднемерное моделирование. – М.: Наука, 1984. – 136 с.
3. Воробьев О.Ю., Валендик Э.Н. Вероятностное множественное моделирование распространения лесных пожаров. – Новосибирск: Наука, 1978 – 160 с.
4. Граб М.В. Модели, методы и алгоритмы распространения лесных пожаров: Дисс. ... канд. техн. наук: 01.05.02. – Харьков: ХНУРЭ, 2004. – 230 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Л. Беляков.

Полосинов Сергей Анатольевич – Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Г.М. Бериева; e-mail: polosinov@mail.ru; 347927, г. Таганрог, ул. Транспортная, 1/2, кв. 69; лётно-испытательный комплекс; ведущий инженер по лётным испытаниям воздушных судов; аспирант ЮФУ.

Polosinov Sergey Anatolyevich – Taganrog air scientifically-technical complex named of G.M. Beriev; e-mail: polosinov@mail.ru; 1/2, Transportnaya street, ap. 69, Taganrog, 347927, Russia; flight test complex; leading engineer on flight tests of aircrafts; postgraduat student SFU.

УДК 681.51

А.А. Колесников, Е.П. Грибова

**ПРОБЛЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ АКТИВНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ:
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ**

Рассматриваются методы решения важной проблемы управления системами активной виброзащиты (САВ), основанные на линейном и нелинейном подходах к синтезу законов управления, которые дают определенную погрешность подавления внешних колебаний. В связи с этим для существенного повышения точности предложен новый нелинейный закон адаптивного управления электромагнитной 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.A. Kolesnikov, E.P. Gribova

**THE PROBLEM OF ACTIVE VIBRATION PROTECTION SYSTEM
CONTROL: COMPARISON OF THE METHODS**

The report discusses methods for solving important problems of control systems of active vibration protection, based on the linear and non-linear approaches to the synthesis of control laws that give a certain error suppression of external vibrations. In order to increase the accuracy, 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 is 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, т.е. систем подавления вибраций, создаваемых, в частности, различными энергетическими установками [1–3].

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. 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 [1–3].

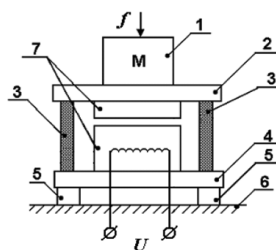


Рис. 1. Система активной виброзащиты

На рис. 1 изображена схема одного из блоков САВ, разрабатываемых в Санкт-Петербургском ЦНИИ «Электроприбор» и в Санкт-Петербургском университете точной механики, информационных технологий и оптики под руководством И.Е. Гутнера и В.О. Никифорова [1–3]. На рис. 1 обозначено: 1 – источник вибраций с массой, 2 – подвижная платформа, 3 – амортизаторы, 4 – неподвижная платформа, 5 – датчики силы, 6 – виброизолируемое основание, 7 – электромагнит.

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 [3]. 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 6 соответствующего технологического или подвижного объектов. Более подробное описание конструкции и действия электромагнитной САВ приведено в известных работах [1–3].

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

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= -ax_1 + bu, \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= -\alpha_1 x_2 - \alpha_2 x_3 - \frac{1}{M} F(x_1) + \frac{1}{M} f(t) - g, \\ \frac{dx_3(t)}{dt} &= x_2, \\ y &= \gamma x_3 + F(x_1) - mg, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_1 – ток электромагнита; x_2, x_3 – скорость и положение подвижной платформы; $F(x_1) = \beta_0 x_1^2$ – 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 [1–3].

Метод линейного управления. В работах [1–3] разработан метод управления САВ, основанный на линеаризации основной нелинейной характеристики, отражающей зависимость между напряженностью магнитного поля H и тяговым усилением F (рис. 2). В результате авторами работ [1–3] была синтезирована линейная система управления САВ, представленная на рис. 3. Как показано авторами [1–3] линеаризованная модель управления САВ в достаточной мере отражает ее поведение в стационарных режимах работы.

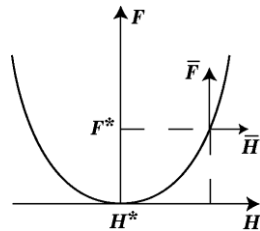


Рис. 2. График зависимости между напряженностью магнитного поля H и тяговым усилением F

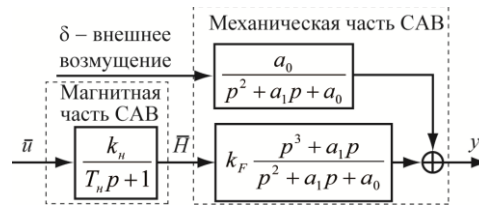


Рис. 3. Структурная схема линеаризованной модели опоры в отклонениях

Результаты исследования замкнутой линейной системы управления САВ приведены на рис. 4.

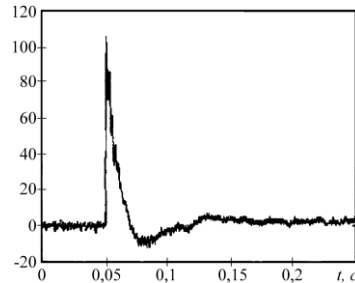


Рис. 4. Переходной процесс по силе в замкнутой системе

Разумеется, что полученные в работах [1–3] научные и прикладные результаты решения сложной проблемы управления САВ являются существенным вкладом в эту важную проблему современной техники.

Для дальнейшего развития методов решения этой нелинейной проблемы целесообразно рассмотреть новые подходы. В связи с этим перейдем к разработке нового метода нелинейного управления, основанного на синергетической теории управления [4, 5].

Метод нелинейного управления. Для решения поставленной задачи управления САВ на основе (1) построим расширенную модель синтеза:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= -ax_1 + bu, \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= -\alpha_1 x_2 - \alpha_2 x_3 - \frac{1}{M} F(x_1) - z(t), \\ \frac{dx_3(t)}{dt} &= x_2, \\ \frac{dz(t)}{dt} &= y, \\ y &= \gamma x_3 + F(x_1) - M_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где z – дополнительная переменная, предназначенная для подавления внешних возмущений $f(t)$ (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 $z = \int ydt$, 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. 5–7 приведены результаты моделирования САВ (1) с законом управления u (14) и параметрами $a = 33,3$, $b = 5$, $\gamma = 585000 \text{ кг/с}^2$, $m = 10 \text{ кг}$, $M = 100 \text{ кг}$, $\alpha_1 = 6,6 \text{ кг/мс}^2$, $\alpha_2 = 5890 \text{ кг/мс}^2$, $\beta_p = 10$, $\beta_{об.} = 1$, $\lambda = 1$, $k = 1$. На САВ действует внешнее высокочастотное гармоническое возмущение $f_1(t) = 200 \sin(2000t)$. На рис. 8–10 представлены результаты моделирования при действии на САВ (1), (14) резонансного гармонического возмущения $f_2(t) = 50 \sin(50t)$.

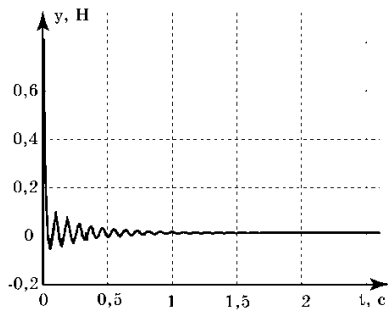


Рис. 5. Изменение $y(t)$

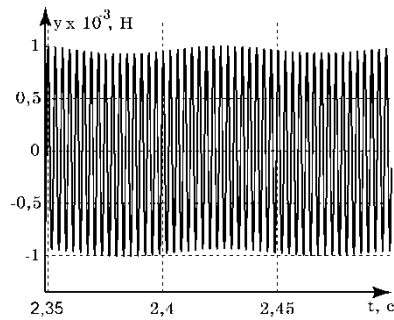


Рис. 6. Изменение $y(t)$

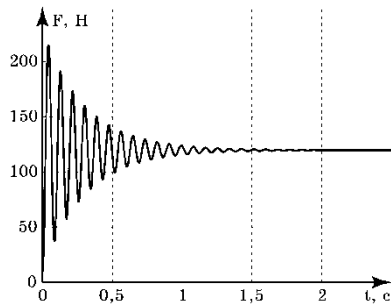


Рис. 7. Изменение $F(t)$

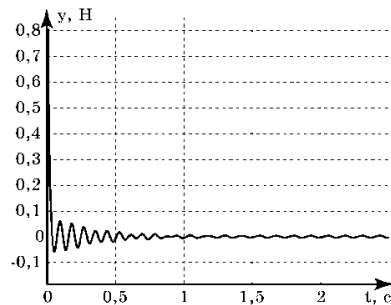


Рис. 8. Изменение $y(t)$

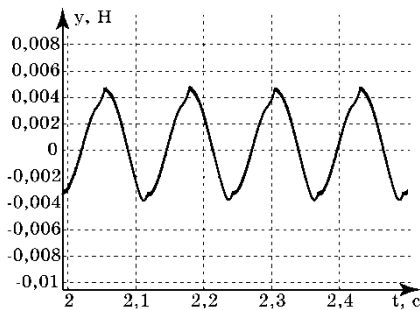


Рис. 9. Изменение $y(t)$

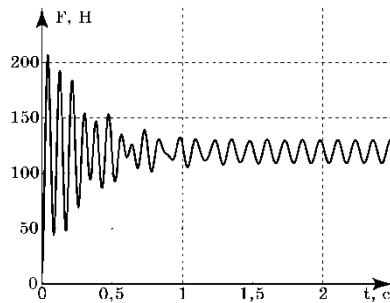


Рис. 10. Изменение $F(t)$

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 [1–3], со свойствами САВ с нелинейным законом управления u (14). Это сравнение показывает, что амплитуда 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. Развитый 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. 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.
2. Никифоров В.О., Гутнер И.Е., Сергачев И.В. Демпфирование собственных колебаний виброизолированной опоры // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – № 1. – С. 35-41.
3. 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.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
5. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – М.: КомКнига, 2006. – 240 с.
6. Колесников А.А. Метод интегральной адаптации нелинейных систем на инвариантных многообразиях: наилучшие возмущения // Материалы 6-й научной конференции «Управление и информационные технологии» (УИТ-2010). – СПб.: Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 22-29.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Тарарыкин.

Колесников Александр Анатольевич – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: anatoly.kolesnikov@gmail.com; 347900, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; тел.: 88634360707; кафедра синергетики и процессов управления; к.т.н.; доцент.

Грибова Елена Петровна – Северо-Кавказский филиал Московского гуманитарно-экономического института; e-mail: shalamkova-gribova@rambler.ru; 357210, г. Минеральные Воды, ул. Пушкина, 10; тел.: 889034171359; кафедра экономических и естественно научных дисциплин; ст. преподаватель.

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

Gribov Helena Petrovna – North Caucasian branch of the Moscow Humanitarian-Economic Institute; e-mail: shalamkova-gribova@rambler.ru; 10, Pushkin street, Mineralnie Vody, 357210, Russia; phone: +789034171359; the department of economic and natural science disciplines; senior lecturer.