

## БИОМОРФНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ОБ АКТИВНОМ ПОДАВЛЕНИИ КОЛЕБАНИЙ

А. К. Беляев<sup>1,2</sup>, В. В. Котов<sup>2</sup>, В. А. Полянский<sup>1,2</sup>, Н. А. Смирнова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиноведения Российской Академии наук (ИПМаш РАН),  
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 61

<sup>2</sup> С.-Петербургский государственный политехнический университет,  
Российская Федерация, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Рассматривается подход, позволяющий осуществлять управление упругими объектами с переменным числом обратных связей. Построен алгоритм синтеза системы управления на базе спектрального разложения для распределенного упругого объекта. Проведен анализ преимуществ предлагаемого подхода. На примере упругой шарнирно опертой балки под действием гармонического вынуждающего момента показано, что биоморфное управление позволяет в несколько раз сократить количество контуров обратных связей без изменения качества подавления колебаний. Исследована чувствительность метода к точности определения параметров модели объекта. Библиогр. 15 назв. Ил. 5.

*Ключевые слова:* виброзащита, мехатроника, управление упругими объектами.

**1. Введение.** Активное подавление колебаний, или виброзащита, является наиболее известной из задач управления распределенными системами. Главной особенностью таких задач является определяющее влияние механической части управляемого объекта. В 60-х годах XX века были решены задачи о балансировке протяженных роторов [1]. Основной особенностью этих решений было малое число измерительных датчиков. На систему длиной 10–20 м приходилось всего шесть датчиков, причем закреплялись они на опорах ротора. Роль управляющих воздействий играли инерционные силы от закрепленных в разных точках ротора грузов. Независимых возбудителей вообще не было, все параметры управляющего воздействия определялись частотой вращения ротора.

Идеология разделения управления упругим объектом на управление отдельными модами была сформулирована как модальный контроль в [2] и развита в [3, 4]. Были проведены успешные эксперименты по реализации такого подхода [5].

Между тем во многих статьях, посвященных управлению упругими объектами [6–10], оптимизация коэффициентов усиления и структуры обратных связей на основании критериев  $H_2$  и  $H_\infty$  указана как наиболее робастная. Сравнение с результатами модального контроля показывает, что применение критериев оптимизации позволяет повысить качество виброзащиты. При этом сравнение проводится для систем с относительно небольшим числом датчиков и возбудителей.

При использовании модального контроля также обычно используется система с заданным небольшим числом мод и ограниченным количеством датчиков (например, 9 датчиков и 9 возбудителей для упругой пластины позволяют контролировать только 2–3 собственных формы). Для восстановления недостающих данных используется Калмановский фильтр [11], который сам по себе снижает робастность управления из-за наличия в нем модели объекта. Такая модель требует отдельной идентификации всех параметров объекта, что приводит к большому влиянию точности задания модели на качество управления.

При синтезе систем управления упругими объектами также используется оптимальное управление с локальными обратными связями. Производится оптимизация

параметров регуляторов, соединяющих каждый датчик со своим возбудителем. Расположение датчиков оптимизируется для того, чтобы минимизировать их количество. В результате такой минимизации любой отказ датчиков или зашумление их сигналов могут приводить к существенным нарушениям в системе виброзащиты.

Вместе с тем, живая природа не только использует целые поля датчиков, но и постоянно наращивает их количество в процессе обучения, так как нервная ткань в этом случае постоянно растет. Современные технологии дают возможность использовать этот опыт в новом подходе к управлению распределенными механическими системами. Удешевление электроники и появление новых способов передачи и обработки данных позволило на практике применять поля датчиков и сопоставимые с ними по числу элементов поля возбудителей [12–15].

Таким образом, при разработке перспективных систем управления упругими объектами ограничения, связанные с небольшим количеством датчиков, можно не учитывать. В этих условиях появляется возможность увеличивать точность и робастность управления не за счет оптимизации регуляторов, а за счет изменения структуры системы управления. Тем более что локальные обратные связи ограничивают возможности совместного управления приводами и тем самым снижают эффективность виброзащиты.

**2. Биоморфный подход к созданию системы виброзащиты.** Рассмотрим конечномерную модель управляемого механического объекта в линейном приближении. Уравнения такого объекта имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU + Gf, \\ Y &= CX, \\ X(0) &= X_0, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $X$  — вектор переменных состояния объекта размерности  $[n]$ ,  $Y$  — вектор наблюдений размерности  $[m]$ ,  $U$  — вектор управлений размерности  $[l]$ ,  $f$  — вектор внешних, неуправляемых усилий размерности  $[r]$ ,  $X_0$  — вектор начальных условий,  $A$  — матрица линеаризованной системы уравнений, описывающей объект управления, размерности  $[n \times n]$ ,  $G$  — матрица внешних воздействий линеаризованной системы уравнений размерности  $[n \times r]$ ,  $B$  — матрица управления линеаризованной системы уравнений размерности  $[n \times l]$ ,  $C$  — матрица наблюдателя (уравнения датчиков наблюдения) размерности  $[m \times n]$ .

В этих уравнениях мы не учитываем динамику электронных устройств для сбора и обработки информации, а также динамику преобразователей мощности, питающих возбудители, полагая их значительно более высокочастотными, чем механическая часть объекта.

Стандартный мехатронный подход [12] предполагает, что датчики обратных связей расположены в местах приложения управляющих воздействий. Тогда числа  $m$  и  $l$  совпадают и можно построить  $m$  контуров обратной связи, в каждом из которых организовать управление вида

$$U_i = -H_i Y_i, \tag{2}$$

где  $U_i$  — компонента вектора управления,  $Y_i$  — компонента вектора наблюдения,  $H_i$  — оператор системы управления в  $i$ -м контуре обратной связи.

Как правило, в контурах обратной связи используются ПИД-регуляторы, то есть в пространстве переменных Лапласа  $H_i(p)$  является дробно-рациональной функцией

со знаменателем и числителем второго порядка. Такой подход аппроксимирует часть объекта, управление которым производится в данном контуре обратной связи, в виде сосредоточенной массы и упругих связей, что приближенно отражает реальное положение.

Используем для управления объектом декомпозиционный подход [4]. Собственные формы движения упругого объекта задают матрицу неособого преобразования  $S$ , такого, что  $SAS^{-1} = \Lambda_A$  имеет диагональный вид. Домножим правую и левую части системы (1) на матрицу  $S$  и сделаем замену вида  $SX = q$ , тогда получим систему

$$\begin{aligned} \dot{q} &= SAS^{-1}q + SBu + SGf, \\ Y &= CS^{-1}q, \\ q(0) &= SX_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $q$  — вектор модулей собственных форм движения упругого объекта размерности  $[n]$ , который заменит вектор переменных состояния.

Некоторой проблемой может являться определение вектора  $q$  по данным датчиков  $Y$ , но с самого начала мы полагаем, что датчиков достаточно, то есть информационная матрица  $(C^T C)$  не вырождена, поэтому для восстановления воспользуемся обобщенной процедурой обращения матрицы  $C$ :  $C^{-1} = (C^T C)^{-1} C^T$ ; тогда

$$q = S(C^T C)^{-1} C^T Y, \quad (4)$$

где  $S(C^T C)^{-1} C^T$  — матрица пересчета вектора наблюдений в модули собственных форм упругого объекта.

Уравнения системы (3) являются связными, что мешает ограничивать количество переменных вектора  $q$  и осуществлять управление с изменяемым числом переменных. В рамках биоморфного подхода предлагается выбирать управление в виде

$$U = kF(q^* - q), \quad (5)$$

где  $q^*$  — внешнее задание на значение модулей формы,  $k$  — коэффициент усиления, который может быть в общем случае оператором (например, ПИД-регулятором),  $F$  — матрица, такая, что  $SBF = \Lambda_B$  имеет диагональную структуру.

Алгоритм выбора матрицы  $F$  рассмотрим позже. Допустим, что такой выбор возможен. Тогда из системы (3) получим

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \Lambda_A q + k\Lambda_B(q^* - q) + SGf, \\ q &= S(C^T C)^{-1} C^T Y, \\ q(0) &= SX_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Система (6) обладает целым рядом преимуществ:

1. Все контуры обратных связей независимы, так как в каждом контуре идет управление по собственной форме движения. Поскольку формы колебаний упругих тел ортогональны, движение по одной форме не влияет на все остальные. При учете трения и нелинейностей такая независимость не полная — с точностью до сил трения, которые при нерезонансных режимах невелики по сравнению с силами упругости и инерции. Энергозатраты при таком управлении минимальны.

2. Количество контуров обратных связей может варьироваться. Можно выбрать несколько форм и управлять только ими, не тратя ресурсы и время системы управления на обработку всех остальных сигналов обратной связи. Очевидно, что при симметричных или кососимметричных нагрузках понадобится только половина форм.

Кроме того, жесткость форм изгиба быстро нарастает с увеличением их номера, поэтому для описания движения упругого объекта достаточно 3–8 форм. Помимо снижения объема обрабатываемой в системе управления информации возрастет помехозащищенность системы управления, так как помехи будут осредняться на ограниченном числе форм колебаний.

3. Появляется возможность динамически в процессе управления объектом увеличивать число форм, по которым производится управление, опираясь, например, на информацию о величине ошибки. В сочетании с возможностью менять коэффициент усиления  $k$  это преимущество позволяет назвать управление биоморфным.

4. Появляется возможность обеспечить неколебательные движения по крайней мере по конечному числу собственных форм. Изменения коэффициента усиления  $k$  не имеют естественного ограничения сверху даже в случае, если датчики и приводы находятся в разных частях упругого объекта.

5. Можно предположить, что предлагаемая система управления будет мало чувствительна к точности задания форм и компонент матрицы  $F$ . При большом количестве датчиков резко упадет чувствительность к ошибкам и отказам части датчиков, так как их показания будут осредняться на собственных формах.

6. Появляется возможность сэкономить на обработке сигналов обратных связей за счет задания стандартных воздействий, например — для подавления вибраций — генерируется сигнал той же частоты, при этом система управления может следить лишь за медленным изменением фазы и амплитуды этого сигнала, что значительно снижает требования к ее быстродействию (происходит разделение быстрых и медленных движений).

В рамках биоморфного подхода остается ряд неисследованных вопросов:

- 1) идентификация матрицы  $F$  управления приводами по каждой форме;
- 2) оптимальное соотношение между количеством обратных связей или собственных форм, учитываемых при управлении, и величиной коэффициента усиления  $k$ ;
- 3) чувствительность биоморфного управления к нелинейности в модели объекта.

### 3. Идентификация матрицы $F$ . Возьмем матрицу $F$ в виде

$$F = B^T (BB^T)^{-1} S^{-1}. \quad (7)$$

Матрицу  $(BB^T)$  будем считать невырожденной в силу большого количества приводов, матрица  $S^{-1}$  существует по определению неособого преобразования. Тогда матрица  $SBF = SBB^T (BB^T)^{-1} S^{-1}$  является диагональной вследствие ортогональности векторов собственных форм, составляющих матрицу  $S$ .

По физическом смысле столбцами матрицы  $F$  является комбинация управляющих воздействий, создающая в управляемом объекте собственную форму с номером, равным номеру столбца. В силу дискретности приложения управляющих воздействий и ограниченности числа приводов, точная диагонализация для произвольного числа собственных форм неосуществима. С другой стороны, в алгоритме управления может быть использована любая матрица  $F$ , обеспечивающая устойчивость процесса управления и необходимую точность результата.

Рассмотрим алгоритм построения матрицы  $F$ . Допустим, что объект за счет некоторого вектора управляющих воздействий  $U^1$  смог занять положение собственной формы  $S_1$ . Допустим также, что он делает это довольно медленно, то есть  $\dot{X} \approx 0$ , внешних сил нет (как это обычно происходит при обучении). Тогда из уравнений объекта

$$AS_1 + BU^1 \approx 0. \quad (8)$$

По определению собственного вектора  $AS_1 = \lambda_A^1 S_1$ . Тогда вектор  $BU^1 \approx -\lambda_A^1 S_1$  ортогонален всем формам  $S_i$ , кроме первой. Следовательно, из набора соответствующих векторов управлений  $U^1, U^2, \dots, U^k$  можно составить матрицу  $F$ , которая сделает скалярное произведение  $SBF$  диагональной матрицей. Алгоритм идентификации матрицы  $F$  сводится к выработке сигналов управления, позволяющих объекту воспроизводить собственные формы, что можно сделать в автоматическом режиме, не меняя физической структуры связей внутри управляемой системы. При этом нет необходимости использовать специальные громоздкие процедуры, требующие многократного перемножения или обращения матриц, например рекуррентный МНК.

**4. Биоморфное подавление колебаний упругой балки, вызванных внешним гармоническим воздействием.** В качестве модельного объекта выбрана балка Бернулли, шарнирно опертая по концам. Модель балки изображена на рисунке 1.

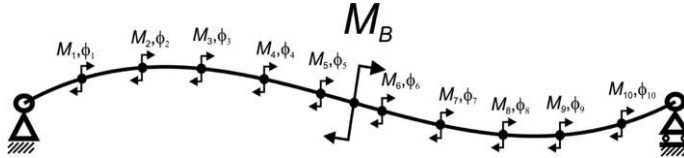


Рис. 1. Модель управляемой балки с десятью приводами.

Пусть колебания балки возбуждаются изгибающим моментом  $M_B$ , приложенным в ее середине и изменяющимся по гармоническому закону. Угол поворота касательной к средней линии балки  $\phi_j = \phi(x_j, t)$  в каждый момент времени измеряется в десяти поперечных сечениях  $x = x_j, j = 1, 2, \dots, m$ , выбранных равномерно по длине балки, исключая концы. В этих же сечениях могут быть приложены управляющие моменты  $M_j$  с целью уменьшить амплитуду установившихся колебаний.

Рассмотрим модель управляемых колебаний. Уравнения в частных производных с учетом граничных условий можно привести к бесконечной системе уравнений вида

$$\ddot{q}_k + 2n_k \dot{q}_k + \Omega_k^2 q_k = Q_k(t), \quad k = 1, 2, \dots, \quad (9)$$

где  $q_k(t)$  — главная координата собственной формы,  $n_k$  — коэффициент демпфирования,  $\Omega_k$  — собственная частота формы,  $Q_k(t)$  — обобщенная сила, вызванная управляющими воздействиями и внешними усилиями.

В случае сосредоточенных сил или моментов  $Q_k(t) = \sum_j b_{kj} U_j(t) + \sum_i g_{ki} f_i$ , и модель (9) можно записать в виде

$$\ddot{q}_k + 2n_k \dot{q}_k + \Omega_k^2 q_k = \sum_j b_{kj} U_j(t) + \sum_i g_{ki} f_i, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (10)$$

где  $b_{kj}$  — коэффициенты влияния управляющих воздействий  $U_j(t)$ ,  $g_{ki}$  — коэффициенты влияния внешних усилий  $f_i$ .

Запись колебаний в виде (10) автоматически производит декомпозицию уравнений модели управляемого объекта относительно форм собственных колебаний. Матрицу  $F$  можно построить методом ортогонализации столбцов. Для вычисления матрицы  $F$  число уравнений (10) должно быть равно числу управляемых возбудителей. Уравнения объекта (10) с управлением (5) будут иметь вид

$$\begin{aligned} \ddot{q} + 2N_0\dot{q} &= -\Omega_A q + k\Lambda_B(q^* - q) + Gf, \\ q &= S(C^T C)^{-1} C^T Y, \\ q(0) &= SX_0, \quad \dot{q}(0) = SV_0. \end{aligned} \quad (11)$$

где  $N_0$ ,  $\Omega_A$ ,  $\Lambda_B$  — диагональные матрицы,  $q$  — вектор модулей форм, размерность которого равна количеству управляемых возбудителей.

Единственным отличием (11) от системы (6) будет наличие второй производной в левой части системы. Структура уравнений (11) позволяет сделать заключение о том, что пропорциональные регуляторы будут увеличивать эквивалентную жесткость упругого объекта, не снижая его коэффициентов демпфирования (или значений скорости затухания переходных процессов). Применение в обратных связях ПД-регулятора позволит полностью контролировать собственные числа замкнутого обратными связями объекта.

Здесь также можно уменьшать количество контуров обратных связей, выбрав для управления несколько низших форм. Полная система (10) необходима только для идентификации матрицы  $F$ . При идентификации на «живом» объекте можно использовать метод, основанный на (8), который позволяет определить ровно столько столбцов матрицы  $F$ , сколько форм будет задействовано в управлении.

Получим уравнения (10) для балки. Уравнение динамики балки имеет вид

$$EIw^{IV} + \rho A\ddot{w} = 0, \quad (12)$$

где  $w(x, t)$  — прогиб балки,  $x$  — продольная координата, отсчитываемая от левого конца балки,  $\rho$  — плотность материала балки,  $I$  — момент инерции поперечного сечения,  $E$  — модуль Юнга материала,  $A$  — площадь поперечного сечения балки.

Граничные условия отражают способ закрепления концов балки длины  $l$ :

$$w(0, t) = 0, \quad M(0, t) = 0, \quad w(l, t) = 0, \quad M(l, t) = 0$$

где  $M = EIw''$  — изгибающий момент балки.

Примем, что в начальный момент времени балка находилась в покое:

$$w(x, 0) = 0, \quad \dot{w}(x, 0) = 0.$$

Решение уравнения (12) будем разыскивать в виде ряда

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} u_k(x) q_k(t), \quad (13)$$

где  $u_k(x) = \sqrt{\frac{2}{\rho A l}} \sin \frac{k\pi x}{l}$  — формы свободных колебаний балки, удовлетворяющие условию нормировки  $\int_0^l \rho u_k^2(x) dx = 1$ ;  $q_k(t) = \frac{2}{l} \int_0^l w(x, t) u_k(x) dx$ .

Применим метод Галеркина. Умножив (12) на  $u_k(x)$ , проинтегрировав по длине балки и проведя двукратное интегрирование по частям первого слагаемого, получаем

$$\ddot{q}_k + \Omega_k^2 q_k = M_B u'_k(l/2) + \sum_{j=1}^m M_j(x_j) u'_k(x_j) \quad (14)$$

где  $\Omega_k^2 = \frac{EI}{\rho A} \left(\frac{k\pi}{l}\right)^4$ .

Угол поворота касательной к средней линии балки находим по формуле

$$\phi(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \vartheta_k(x) q_k(t), \quad \vartheta_k(x) = u'_k(x).$$

Разложение (13) было реализовано по восьми формам для балки длиной  $l = 1470$  мм, имеющей собственную частоту  $\Omega_1 = 20$  рад/с. Сосредоточенный внешний момент задавался в виде  $M_B = \sin \omega t$ ,  $\omega = 5$  рад/с. В процедуре численного интегрирования уравнения (14) было учтено демпфирование, коэффициент демпфирования принимался равным  $n = \frac{1}{\omega}$  для каждой формы  $q_k$ . Нумерация датчиков, измеряющих угол  $\phi(x, t)$ , велась с левого конца балки.

На рисунке 2 представлены осциллограммы сигналов второго и четвертого датчика  $\phi(x_j, t) = \sum_{k=1}^8 \vartheta_k(x_j) q_k(t)$ ,  $j = 2, 4$ , при отсутствии управления.

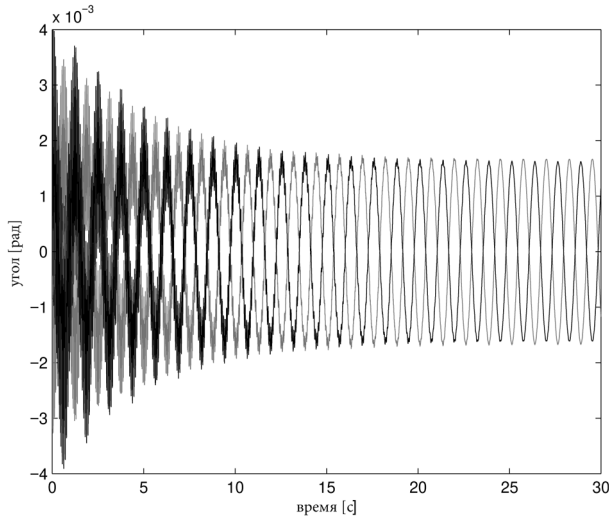


Рис. 2. Осциллограммы сигналов обратной связи с датчиков №2 и №4 при вынужденных колебаниях балки без управления.

Следуя мехатронному подходу, мы сначала организуем управление с локальными обратными связями по измерениям углов

$$M_j = -k_j \phi(x_j, t), \quad (15)$$

где  $k_j$  — коэффициент обратной связи в  $j$ -м сечении.

На рисунке 3 представлены осциллограммы сигналов второго и четвертого датчиков при управлении с локальными обратными связями. Коэффициенты обратной связи взяты одинаковыми во всех сечениях и равными  $k_j = 100$  Нм/рад.

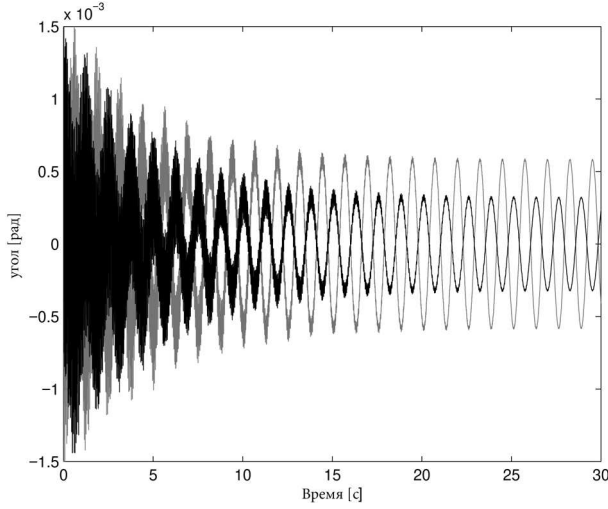


Рис. 3. Осциллограммы сигналов датчиков обратных связей № 2 и № 4 при локальном замыкании десяти контуров обратной связи с одинаковыми коэффициентами усиления.

Согласно предлагаемой концепции биоморфного управления управляющий момент в каждом сечении сформируем в виде

$$M_j(t) = -k_j \sum_{k=1}^m F_{k,j} p_k(t), \quad (16)$$

где  $p_k(t) = \sum_{j=1}^{10} \phi(x_j, t) \vartheta_k(x_j)$  — скалярное произведение вектора, образованного значениями углов в сечениях, где установлены датчики, и вектора  $k$ -й формы колебаний, составленного из значений, вычисленных в тех же сечениях;  $k_j$  — коэффициент обратной связи в  $j$ -м сечении;  $F_{k,j}$  — компоненты матрицы  $F$ ;  $m \leq 10$ .

Для данной задачи строки матрицы  $F$  должны быть пропорциональны собственным формам  $\vartheta_k(x_j)$ . Будем моделировать ошибки экспериментального определения матрицы  $F$  путем задания ее компонент равными оценке формы угла поворота  $F_{k,j} = \widehat{\vartheta}_k(x_j)$  в каждом сечении с точностью до знака или до первой цифры. Коэффициенты обратной связи в дальнейших расчетах оставим равными  $k_j = 100$  Нм/рад.

Сформируем управляющие моменты на основе двух первых четных форм колебаний:

$$M_j(t) = -k_j [F_{2,j} p_2(t) + F_{4,j} p_4(t)]. \quad (17)$$

На рисунке 4 представлены осциллограммы сигналов второго и четвертого датчиков при биоморфном управлении по двум собственным формам с наиболее грубой оценкой  $\widehat{\vartheta}_k(x_j) = \text{sign}(\vartheta_k(x_j))$  матрицы  $F$ .

Результаты численных экспериментов показали, что эффективность биоморфного управления повышается как с увеличением числа контуров обратных связей, так и с уточнением компонент матрицы  $F$ . Рисунок 5 демонстрирует эффективность биоморфного управления (17) с оценкой  $\widehat{\vartheta}_k(x_j)$  до первой значащей цифры по сравнению с результатом управления (15). Здесь представлены осциллограммы сигналов



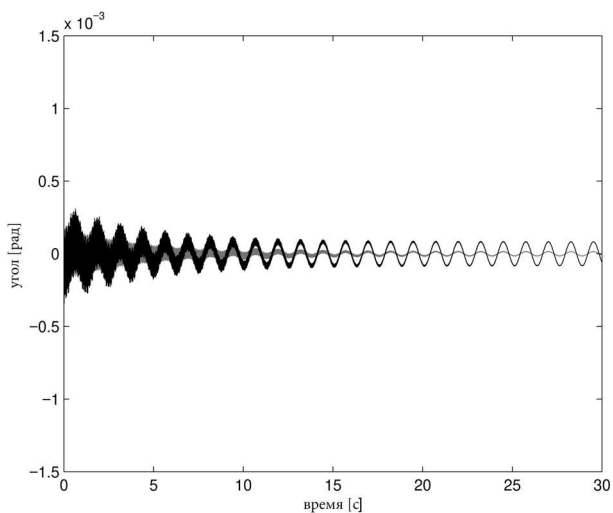


Рис. 4. Осциллограммы сигналов датчиков обратных связей № 2 и № 4 при биоморфном управлении по двум собственным формам.

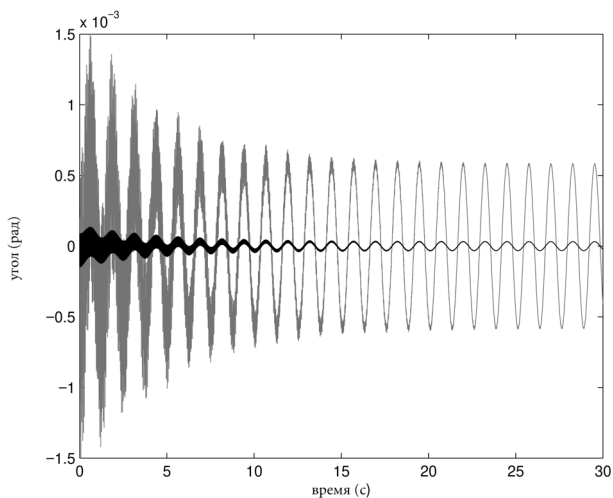


Рис. 5. Осциллограммы сигналов датчика №2 при управлении по двум собственным формам (черный) и при замыкании десяти локальных контуров обратных связей (серый).

второго датчика при биоморфном управлении по двум собственным формам (синий цвет) и при замыкании десяти локальных контуров обратных связей (зеленый цвет).

**5. Заключение.** Анализ полученных результатов показывает, что при сопоставимом числе обратных связей и тех же коэффициентах усиления эффективность биоморфного управления существенно выше, чем при управлении с локальными обратными связями. Алгоритм биоморфного управления не требует точной идентификации матрицы  $F$ . Таким образом, предложенный алгоритм обладает хорошей робаст-

ностью и допускает возможность экспериментального определения коэффициентов управляющего воздействия, что позволяет эффективно применять его на практике. Неисследованным остался вопрос об оптимальном соотношении между количеством собственных форм, учитываемых при биоморфном управлении, и величиной коэффициента усиления  $k$ . Его решение позволит получить дополнительные возможности при активном подавлении колебаний.

## Литература

1. Рыжик Б. В., Фридман В. М. Уравновешивание гибких роторов с одновременным уточнением коэффициентов влияния // *Машиноведение*. 1984, № 1. С. 26–32.
2. Gould L. A., Murray-Lasso M. A. On the modal control of distributed parameter systems with distributed feedback // *In Transactions on Automatic Control*. Vol. 11. P. 79. IEEE, 1966.
3. Porter B., Crossley T. R. *Modal Control Theory and Applications*. Taylor and Francis, 1972.
4. Meirovitch L. *Dynamics and Control of Structures*. John Wiley, 1990.
5. Stöbener U., Gaul L. Modal Vibration Control for PVDF Coated Plates // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2000. Vol. 11. P. 283–293.
6. Stavroulakis G. E., Foutsitzi G., Hadjigeorgiou E., Marinova D., Baniotopoulos C. C. Design and robust optimal control of smart beams with application on vibrations suppression // *Advances in Engineering Software*. Vol. 36. 2005. P. 806–813.
7. Shia W., Alsarheed M., Schuster E., Walker M. L., Leuer J., Humphreys D. A., Gates D. A. Multivariable model-based shape control for the National Spherical Torus Experiment (NSTX) Fusion Engineering and Design. Vol. 86. 2011. P. 1107–1111.
8. Stavroulakis G. E., Marinova D. G., Hadjigeorgiou E., Foutsitzi G., Baniotopoulos C. C. Robust active control against wind-induced structural vibrations // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* Vol. 94. 2006. P. 895–907.
9. Fisco N. R., Adeli H. Smart structures: Part II—Hybrid control systems and control strategies *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering*. 18. 2011. P. 285–295.
10. Kucuk I. et al. Optimal control of a distributed parameter system with applications to beam vibrations using piezoelectric actuators // *Journal of the Franklin Institute*. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfranklin.2012.10.008>
11. Kumar R., Singh S. P., Chandrawat H. N. MIMO adaptive vibration control of smart structures with quickly varying parameters: Neural networks vs classical control approach *Journal of Sound and Vibration*. 307. 2007. P. 639–661.
12. Nguyen Q., Tong L. Shape control of smart composite plate with non-rectangular piezoelectric actuators / *Composite Structures*. 66. 2004. P. 207–214.
13. Kekana M. A static shape control model for piezo-elastic composite structures / *Composite Structures*. 59. 2003. P. 129–135.
14. Hadjigeorgiou E. P., Stavroulakis G. E., Massalas C. V. Shape control and damage identification of beams using piezoelectric actuation and genetic optimization // *International Journal of Engineering Science*. 44. 2006. P. 409–421.
15. Krommer M. Dynamic shape control of sub-sections of moderately thick beams *Computers and Structures*. 83. 2005. P. 1330–1339.

Статья поступила в редакцию 24 октября 2013 г.

## Сведения об авторах

Беляев Александр Константинович — доктор физико-математических наук, доцент;  
vice.ipme@gmail.com

Котов Виталий Владимирович — аспирант; kotov.vitaliy@gmail.com

Полянский Владимир Анатольевич — доктор технических наук, заведующий лабораторией;  
varol@mail.ru

Смирнова Нина Анатольевна — кандидат технических наук, доцент; nina-mpu@mail.ru

## BIOMORPHIC CONTROL IN THE PROBLEM OF ACTIVE VIBRATION SUPPRESSION

*Aleksandr K. Belyaev*<sup>1,2</sup>, *Vitaliy V. Kotov*<sup>2</sup>, *Vladimir A. Polyanskiy*<sup>1,2</sup>, *Nina A. Smirnova*<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mechanical Engineering RAS, Bolshoy pr. V. O., 61, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; vice.ipme@gmail.com, vapol@mail.ru

<sup>2</sup> St. Petersburg State Polytechnical University, Polytekhnicheskaya ul., 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; kotov.vitaliy@gmail.com, nina-mpu@mail.ru

The paper addresses an approach that allows the control of elastic objects with a varying number of feedbacks. An algorithm of the control system synthesis based on the spectral decomposition of the distributed elastic object is suggested. The basic assumption is redundancy of the observation vector. Its dimension is assumed to exceed the minimum dimension, which is necessary for observability of the control object. The observability is understood in the sense of finite-dimensional model of the distributed elastic object, which is constructed as the basis of control. The analysis of benefits of the proposed approach is carried out.

The approach is demonstrated on example of a simply supported elastic beam subjected to the external harmonic moment. The result of biomorphic suppression of vibrations is compared with that of the control using the multiple local negative feedback loops. It is shown that the biomorphic control enables one to reduce considerably the number of feedback loops without losing the suppression quality. The sensitivity of the method to accuracy of determination of the model parameters is discussed. Refs 15. Figs 5.

*Keywords:* vibration protection, mechatronics, control of elastic objects.