

А.Л. Фрадков, д-р техн. наук, проф.,
Б.Р. Андриевский, канд. техн. наук, доц.,
Институт Проблем машиноведения РАН,
К.Б. Бойков,
АОЗТ «Гранит-7»

МЕХАТРОННЫЙ УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МАЯТНИКОВЫЙ КОМПЛЕКС

Описывается мехатронный учебно-исследовательский комплекс, в состав которого входит управляемая колебательная система из двух связанных маятниковых установок, усилительные и измерительные устройства, программно-аппаратный интерфейс и персональный компьютер. Непосредственно измеряемыми величинами являются интервалы времени между прохождением маятников через нижнее положение. Управление осуществляется электрическими импульсами, подаваемыми на электромагниты, расположенные в подставке узла крепления маятников. По результатам эксперимента выполнена идентификация параметров математической модели системы. Предложены и численно исследованы алгоритмы возбуждения колебаний и оценки состояния системы по данным измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи управления колебательными механическими системами имеют значительный теоретический интерес и возрастающее практическое значение. Для проведения научных исследований и учебного процесса в области мехатроники и систем автоматического управления следует располагать соответствующим лабораторным оборудованием и программным обеспечением.

В настоящее время лабораторная база передовых зарубежных университетов, ведущих подготовку кадров в области механики, машиностроения и процессов управления, как правило, включает комплекс учебно-исследовательских стендов, реализующих компьютерно-управляемые модели различных динамических систем (объектов управления). Подобные стенды являются многофункциональными устройствами, позволяющими проводить эксперименты из областей механики, электроники, вычислительной техники и систем автоматического управления. Более того, появляется возможность решать комплексные задачи, относящиеся ко всем вышеуказанным дисциплинам, т. е. принадлежащие области мехатроники.

Мехатроника как новая научная дисциплина обслуживает потребности современных автоматизированных производств, станков с ЧПУ, роботов и других компьютерно-управляемых устройств. Исследования и разработки в области мехатронных технологий являются одними из наиболее перспективных. Несмотря на это в российских технических университетах за

последние годы наметилось отставание в данной области из-за трудностей финансирования науки и образования. Поэтому создание соответствующих учебно-исследовательских стендов и их внедрение в учебный процесс представляется весьма актуальным. Использование современной лабораторной базы позволяет естественно переходить от теоретического изучения к накоплению практических навыков у учащихся при подготовке в области высоких (наукоемких) технологий. Работа с математическими и программными моделями элементов стенда и стенда в целом позволяет на практике осваивать современные компьютерные технологии исследования и проектирования, переходя от модели к алгоритму, от алгоритма — к программе. Более того, классическая триада информатики «модель — алгоритм — программа» при взаимодействии компьютера с оборудованием превращается в четверку «модель — алгоритм — программа — эксперимент» и помогает выработке и закреплению у учащихся привычки к сопоставлению информационных образов явлений с их реальными прототипами. Большой популярностью пользуются маятниковые учебно-исследовательские установки. Наряду с наглядностью и привлекательностью, маятниковые установки характеризуются существенно нелинейной динамикой, что позволяет изучать и демонстрировать достаточно сложные нелинейные эффекты, такие как неустойчивость, хаос, синхронизацию, эффект Зоммерфельда и делает оправданным применение передовых подходов к управлению: ляпуновских и энергетических методов, нейросетевых и нечетких систем [8, 14, 11, 13, 18, 20, 21].

Имеется большое число публикаций, в которых приводятся сведения о значительных результатах в данном направлении, см., например, [8, 12, 14, 15, 17, 16, 18, 20].

В статье описывается мехатронный учебно-исследовательский комплекс, разработанный в Санкт-Петербургском учебно-научном центре «Проблемы машиностроения, механики и процессов управления» на базе ИПМаш РАН. В состав комплекса входит управляемая колебательная система из двух связанных маятниковых установок, усилительные и измерительные устройства, программно-аппаратный интерфейс и персональный компьютер. Механическая часть системы представляет собой две одинаковые колебательные подсистемы, сконструированные из электромеханических игрушек. Каждая из подсистем включает в себя два связанных концентрически расположенных маятника. Подсистемы в установке связаны между собой вдоль оси колебания внешних маятников пружиной вращения. Имеется возможность подавать импульсное управляющее воздействие через момент электромагнитных сил, приложенных к внешним маятикам. Измеряемой величиной является интервал времени между моментами прохождения маятниками нижнего положения.

В настоящей статье дается краткое описание комплекса, математических моделей его узлов, а также алгоритмов идентификации и управления колебаниями.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Маятниковая установка предназначена для проведения учебно-исследовательских работ по управлению колебаниями в механических системах с помощью цифрового устройства (в том числе персонального компьютера). Установка состоит из *электромеханической части, электронного устройства сопряжения и управляющего компьютера*, на котором выполняются процедуры управления механической системой в реальном времени и отображения функционирования системы. Для обеспечения обмена информацией через стандартные порты ввода-вывода компьютера разработана *процедура обмена*.

Электромеханическая часть системы состоит из собственно механической части и электромагнитов, предназначенных для съема информации и создания управляющих воздействий.

Механическая часть установки состоит из соединенных между собой упругой скручивающейся пружиной (или стальным тросом) колебательных механических систем (КМС). Каждая КМС является двухзвенным маятником со смещенными центрами масс звеньев и скользящим подвесом внешнего звена (рис. 1), [19]. Внешним звеном системы служит металлическое кольцо с расположенными на нем массивным шариком и двумя цилиндрическими магнитами. Шарик и магниты смещают центр масс кольца, а магниты обеспечивают также передачу управляющего воздействия на оба звена. На наружной поверхности кольца имеются две противоположно направленные полуоси, обеспечивающие его опору на две плоские площадки с ограничителями хода. Вся система закреплена на массивном основании, в центре которого расположены индуктивный датчик нулевого положения первого звена и электромагнит, передающий управляющие усилия на его цилиндрические магниты.

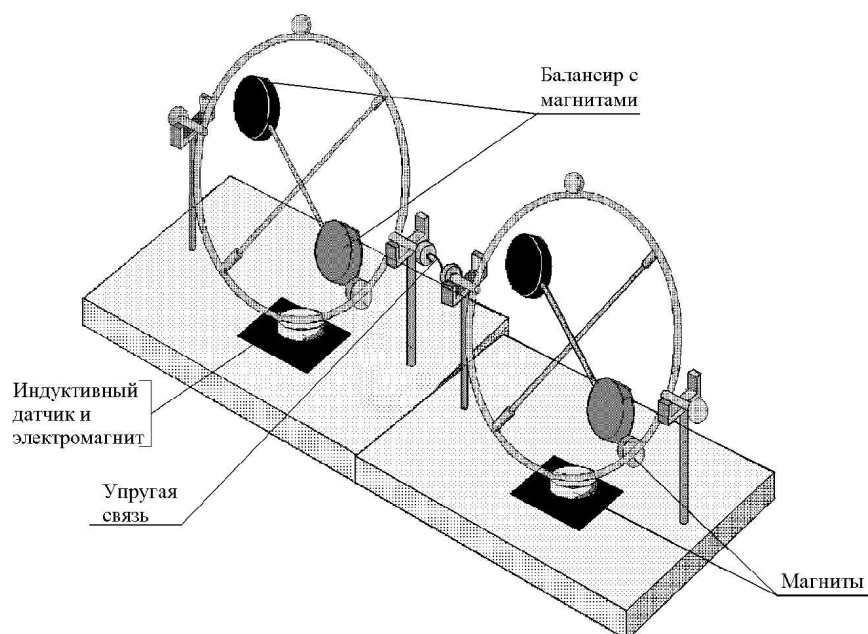


Рис. 1. Механическая часть установки.

Второе звено представляет собой два цилиндрических груза с магнитами, установленными на оси симметрично относительно ее центра. Это звено вращается внутри внешнего кольца с осью вращения, закрепленной на нем с помощью цилиндрических шарниров. Шарниры находятся на оси, повернутой относительно оси вращения внешнего кольца на 45° .

Управляющими усилиями служат воздействие электромагнита основания на один из магнитов, установленных на внешнем кольце, и воздействие второго магнита, находящегося на внешнем кольце, на магниты внутреннего звена.

В настоящем стенде непосредственно управляемым параметром является амплитуда колебаний маятников. Она зависит от энергии, получаемой маятником от внешнего возбудителя. Управление амплитудой колебаний выполнено *аппаратно-программным* путем. Энергия возбуждения передается методом *широтного-импульсного* управления.

Программная модель стенда представляет собой регистры, доступные *только для записи*

(*WO*), в которые помещается вычисленное программой значение необходимой длительности импульса возбуждения (в миллисекундах), или *только для чтения (RO)*, из которых считывается значение полупериода (в миллисекундах). Дальнейшее формирование импульса происходит чисто аппаратным путем без участия программы. Имеются также *комбинированный* и *чисто программный* режимы работы блока управления, при которых параметры импульса могут быть введены от управляющей ЭВМ. Установка имеет два идентичных по структуре и принципиальной схеме канала (для каждого из маятников) с общим узлом управления и синхронизации. Функциональная схема установки представлена на рис. 2.

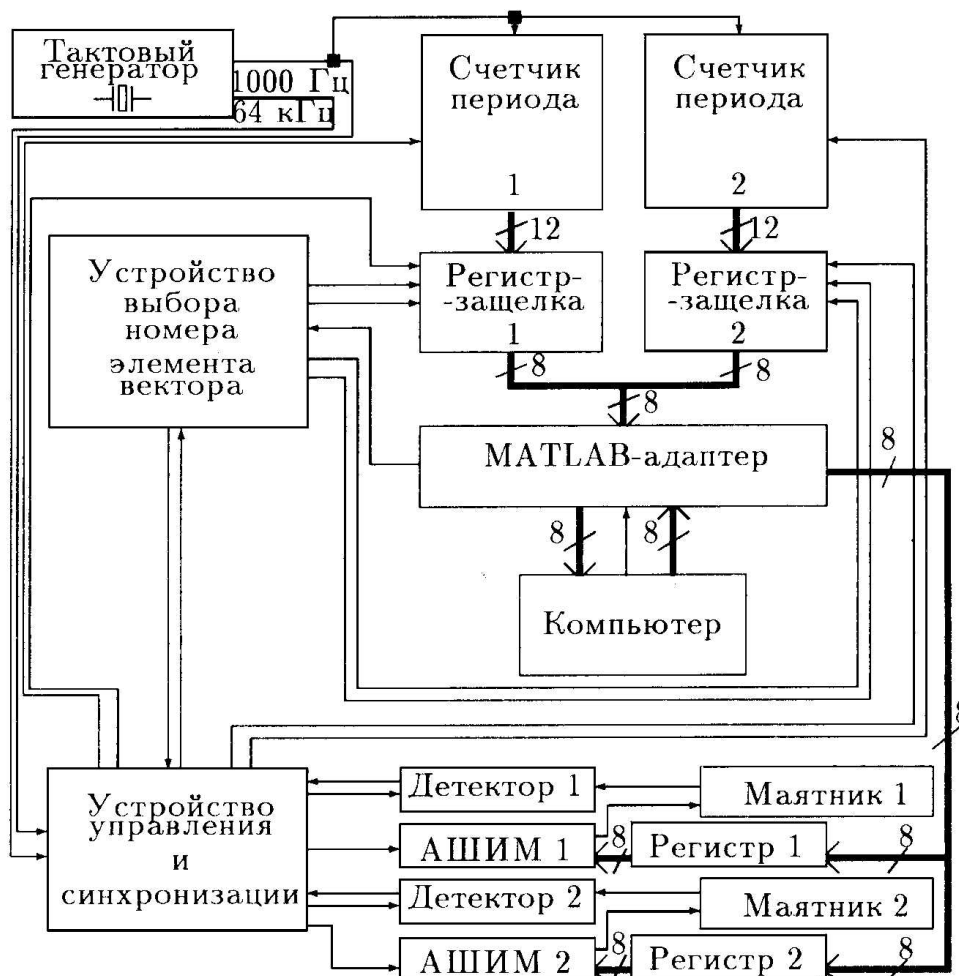


Рис. 2. Функциональная схема установки.

Аппаратно-программная реализация заключается в измерении одного полупериода (в миллисекундах) при помощи аппаратной части — *электронно-счетного цифрового миллисекундомера* с последующей программной обработкой для определения периода.

В нижней своей части каждое внешнее кольцо (маятник) имеет магнит, позволяющий определять местоположение маятника и воздействовать на него внешним магнитным полем. Для этого в подставке каждой маятниковой системы имеется электромагнит с двумя обмотками, одна из которых (с большим числом витков) является датчиком нижнего положения маятника, а вторая, намотанная более толстым проводом, — возбудителем. В качестве альтер-

нативного варианта в подставках установлены *датчики Холла*. При помощи конфигурационных перемычек в батарейных отсеках подставок и переключателя на передней панели стенда можно выбирать тип датчика, необходимый для проводимого эксперимента.

Поскольку данные, считываемые со стенда, обрабатываются на персональном компьютере в основном при помощи пакета MATLAB, аппаратная часть стенда имеет в своем составе *MATLAB-адаптер*. Он, по существу, является аппаратной частью тулбокса *Parallel In/Out* (более подробно см. [4]). Программа обмена *pio (Parallel In/Out)* обеспечивает возможность вывода элементов векторов и матриц системы MATLAB через параллельный восьмиразрядный канал порта, к которому обычно подключается принтер, а также чтение данных со внешних устройств с представлением их в виде векторов и матриц через восемь разрядов каналов управления и статуса принтера того же порта. Поддерживается также ЕРР-режим (Enhanced Parallel Port) современных параллельных адаптеров для аппаратного ускорения и обеспечения возможности шестнадцатиразрядного обмена. Существуют специальные шестнадцатиразрядные режимы для поддержки шинных устройств (ISA), не являющихся как таковым параллельным портом (например, платы аналого-цифрового преобразования, интерфейсы КОП и КАМАК и т. д.).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В данном параграфе приводится математическая модель механической части системы (соединенные пружиной двухзвенные маятники). Вначале рассматривается модель изолированного двухзвенного маятника, затем учитывается упругое взаимодействие между подсистемами.

Рассматриваемая система является двойным маятником, однако влияние движения второго (внутреннего) маятника на движение внешнего маятника мало. Поэтому для исследований используем упрощенную модель объекта, в которой учитывается только динамика первого (внешнего) звена.

Используя уравнение Лагранжа второго рода [5]

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где T — кинетическая энергия системы; \dot{q}_i — обобщенная скорость; q_i — обобщенная координата; Q_i — обобщенная сила, получим, что

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = (MR^2 + J_0) \cdot \dot{\varphi} = J\dot{\varphi}, \quad (2)$$

где $J \triangleq MR^2 + J_0$ — приведенный момент инерции системы, R — радиус внешнего кольца. Здесь в качестве обобщенных координат использованы угол поворота φ относительно оси вращения и координата x в поступательном движении системы. После ряда преобразований и учета моментов сил трения получим следующее уравнение динамики:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}(t) = \omega(t), \\ \dot{\omega}(t) = -a_1 \sin(\varphi(t) - \psi) - a_2 \omega(t) + u(t, \varphi). \end{cases} \quad (3)$$

В результате расчетов, исходя из массогабаритных характеристик рассматриваемой установки, получено $a_1 \approx 44 \text{ с}^{-2}$, $\psi \approx 0.13$. Коэффициент действия сил трения a_2 найден эмпирическим путем, исходя из оценки времени затухания и числа колебаний собственного движения

маятника. Он составляет $0.5 \div 1 \text{ с}^{-1}$. Данная модель использована при синтезе алгоритмов управления и идентификации колебательной системы.

Учтем теперь движение второй маятниковой системы и упругое взаимодействие между первой и второй системами. Считая, что пружина работает в области линейных упругих деформаций, а также учитывая только момент, развиваемый пружиной относительно главной оси вращения маятника (внешнего кольца), получим следующие уравнения состояния механической части системы:

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1(t) = \omega_1(t), \\ \dot{\omega}_1(t) = -a_1 \sin(\varphi_1(t) - \psi) - a_2 \omega_1(t) + k(\varphi_2 - \varphi_1) + u_1(t, \varphi_1), \\ \dot{\varphi}_2(t) = \omega_2(t), \\ \dot{\omega}_2(t) = -a_1 \sin(\varphi_2(t) - \psi) - a_2 \omega_2(t) - k(\varphi_2 - \varphi_1) + u_2(t, \varphi_2). \end{cases} \quad (4)$$

Коэффициент k в (4) определяется жесткостью упругой связи между кольцами (см. рис. 1). В процессе работы с установкой он может меняться в широких пределах в зависимости от материала и геометрии пружины.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ

Управление амплитудой колебаний

Зададимся целью управления, которая заключается в стабилизации на заданном уровне полной энергии $H = H^*$, что соответствует обеспечению заданной амплитуды колебаний механической системы [1, 8]. При выводе алгоритма импульсного управления используем *метод скоростного градиента (СГ)* [9, 10, 7, 8], а именно релейную конечную форму СГ-алгоритмов, которая для данной цели управления имеет вид $u = -\gamma \text{sign}(H - H^*)\varphi$, где γ – величина «полки реле», задающая амплитуду сигнала управления.

Возможны два варианта алгоритма управления, учитывающие особенности электромагнитного взаимодействия между приводом и объектом управления. В первом из них предполагается неизменность знака проекции управляющего усилия на вертикальную ось (*однополярное управление*). В этом случае управляющее усилие должно быть либо притягивающим, либо отталкивающим. Во втором предполагается использование различных по знаку проекций управляющего усилия (*двуполярное управление*). В этом случае можно изменять знак проекций управляющей силы.

Идентификация состояний колебательной системы

Для построения систем управления с обратной связью имеет большое значение наличие достаточно полной информации о состоянии. Для данной системы – это угол φ и угловая скорость ω поворота кольца.

Рассматриваемая система в силу своих конструктивных особенностей обладает весьма «бедными» возможностями по получению текущей информации. Внесением небольших кон-

структивных изменений нетрудно обеспечить и измерение (с некоторой точностью) угла поворота φ .

Ниже рассмотрены некоторые способы оценивания состояния объекта по доступной информации. Сначала рассматривается более простая для решения задача, в которой на основе измерений $\varphi(t)$ требуется восстановить угловую скорость $\omega(t)$. Затем предлагается алгоритм оценивания состояния системы по косвенным измерениям — по данным о периоде колебаний.

Рассмотрим сначала идентификацию угловой скорости при измерении угла отклонения $\varphi(t)$. Построим идентификатор состояния полного порядка

$$\begin{cases} \dot{\hat{\varphi}}(t) = l_1(\varphi(t) - \hat{\varphi}(t)) + \hat{\omega}(t), \\ \dot{\hat{\omega}}(t) = l_2(\varphi(t) - \hat{\varphi}(t)) - a_1 \sin(\varphi(t) - \psi) - a_2 \hat{\omega}(t). \end{cases} \quad (5)$$

Заметим, что несмотря на присутствие нелинейной зависимости в правой части (5), ошибка оценивания описывается линейным уравнением, так как оценки состояния $\hat{\varphi}$, $\hat{\omega}$, вырабатываемые (5), не входят под знак функции $\sin(\cdot)$. Характеристический многочлен $D(s)$ ошибки наблюдения имеет вид $D(s) = s^2 + (l_1 + a_2)s + l_1 a_2 + l_2$. Приравнявая его стандартному многочлену Баттерворта (*Butterworth*) $D_B(s) = s^2 + \sqrt{2}\Omega_0 s + \Omega_0^2$, где Ω_0 — параметр, определяющий быстродействие наблюдателя, получим выражения для коэффициентов (5): $l_1 = \sqrt{2}\Omega_0 - a_2$, $l_2 = \Omega_0^2 - l_1 a_2$. Выбирая $\Omega_0 = 5 \text{ с}^{-1}$ и пренебрегая (ввиду малости) коэффициентом a_2 , получим $l_1 = 7 \text{ с}^{-1}$, $l_2 = 25 \text{ с}^{-2}$.

Исследуем влияние некоторых параметрических и координатных возмущений на процесс оценивания. Пусть в системе имеется вязкое трение и действует внешний возмущающий момент (например, вызванный влиянием движения внутреннего маятника). Уравнение объекта тогда принимает вид $\ddot{\varphi}(t) + a_2 \dot{\varphi}(t) + a_1 \sin(\varphi(t) - \psi) = f(t)$. Пусть $f(t) = 2 \cdot 10^{-3} J^{-1} \sin(4\pi t)$. Моделируя систему с идентификатором состояния (5), получим графики $\omega(t)$, $\hat{\omega}(t)$ и ошибки оценивания $\omega(t) - \hat{\omega}(t)$, представленные на рис. 3.

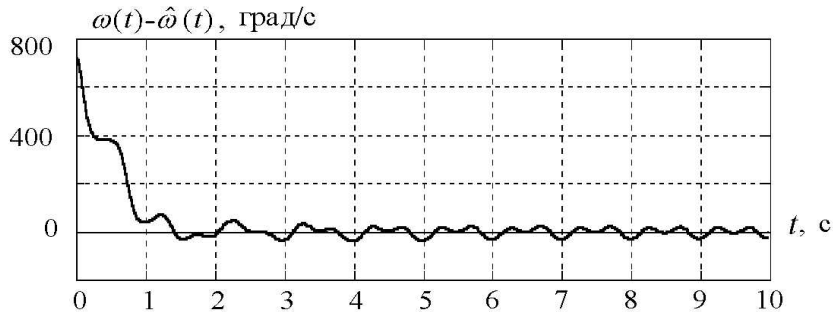


Рис. 3. Ошибка оценивания $\omega(t)$.

Как видно из графиков, при действии неучтенного демпфирования появляется ошибка оценивания, величина которой лежит в допустимых практически пределах.

Пусть теперь измеряется только период колебаний, который можно определять по факту прохождения маятника через нижнюю точку.

Для периода колебаний нелинейного маятника известно соотношение $T = \sqrt{2} \int_{A_1}^{A_2} \frac{dx}{\sqrt{H - V}}$, где A_1 и A_2 — отклонения маятника в моменты, когда его скорость равна нулю; H — полный запас энергии системы; V — потенциальная функция [5]. Поэтому период колебаний можем

использовать для косвенных измерений амплитуды при отсутствии измерений угла. Далее, располагая данными об амплитуде колебаний и моментах прохождения маятником нижней точки, можно получить и оценку состояния [8]. Зависимость $T = T(A)$ для данного маятника определена моделированием и приведена на рис. 4, а. Используем также функцию $\omega|_k(\varphi_0)$,

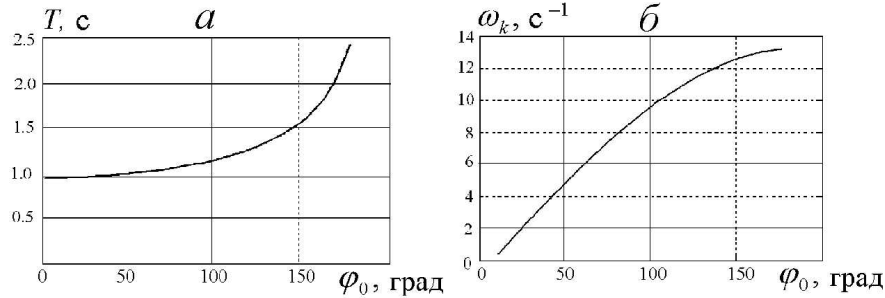


Рис. 4. Зависимости $T(\varphi_0)$ и $\omega|_k(\varphi_0)$.

которая показывает, как находится значение $\omega(t)|_{t=t_k}$ при $\varphi(t_k) = 0$ в зависимости от $\varphi_i(0)$ (рис. 4, б).

Воспользуемся полученными результатами для оценки состояния маятника по периоду. В [8] предложен алгоритм, согласно которому происходит пересчет значений $\hat{\omega}$ непосредственным применением функции $\omega(\varphi_0)$ при прохождении маятником нижней точки. Значение φ_0 определяется через период колебаний (удвоенный интервал пересечения нижнего положения) обращением зависимости $T(\varphi_0)$ (рис. 4, а). Тогда в моменты времени t_k выполняется пересчет оценок состояния.

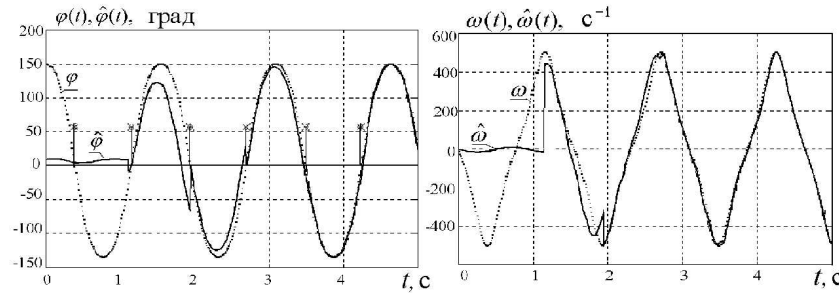


Рис. 5. Оценивание состояния.

Результаты моделирования приведены на рис. 5, из которого видно, что ошибка оценивания через два-три периода составляет менее 5%.

Основной проблемой при реализации рассмотренных в данном параграфе алгоритмов оценивания представляется необходимость достаточно точных измерений периода колебаний. Особенно существенное значение имеют погрешности измерения при «малых» (т. е. соответствующих линейной модели маятника) амплитудах колебаний, для которых период слабо зависит от амплитуды (см. рис. 4). Кроме того, точность процесса оценивания уменьшается из-за неточности модели объекта, в частности из-за погрешности в определении его параметров. Задача идентификации неизвестных параметров модели объекта рассматривается в следующем параграфе.

Обратимся к задаче параметрической идентификации системы по результатам эксперимента [6, 10]. Запишем уравнение маятника в виде $\ddot{\varphi}(t) + a_2\dot{\varphi}(t) + a_1 \sin(\varphi(t) - \psi) = 0$ и перейдем к его дискретной линеаризованной модели

$$y[k] + \alpha_2 y[k-1] + \alpha_1 y[k-2] = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

где $y[k] \triangleq \varphi(t_k)$; $t_k = kT_0$; $T_0 = \text{const}$ — интервал дискретности; α_1, α_2 — параметры модели (6), значения которых связаны с параметрами исходной системы и считаются априори неизвестными (и подлежащими определению). Применяя стандартную процедуру метода наименьших квадратов (МНК) [3, 6, 8], получим оценки параметров дискретной модели $\hat{\alpha} \triangleq \text{col}\{\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2\}$, при континуализации которой [1, 3] находим и оценки параметров исходной непрерывной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье описана двузвенная механическая колебательная система. Приведены некоторые алгоритмы управления колебаниями, идентификации состояний и параметров системы. Разработан комплекс программ для вычислительной поддержки при проведении исследований. Данную систему можно использовать как лабораторную установку для проведения различных лабораторных работ в курсах теории управления, математического моделирования, автоматизации проектирования, а также при изучении организации аппаратного и программного интерфейса. На установке в настоящее время проводятся экспериментальные исследования процессов возбуждения и синхронизации нелинейных колебаний. В частности, изучаются свойства характеристики возбудимости — новой характеристики нелинейных систем [17] и устанавливаются условия возникновения синфазного и противофазного синхронных режимов.

Работа частично финансирована Российским Фондом фундаментальных исследований (РФФИ), грант 02-01-00765, научной программой Президиума РАН No 17 (проект 3.1.4) и федеральной программой «Интеграция».

Список литературы

1. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB. СПб.: Наука, 1999. 467 с.
2. Андриевский Б.Р., Коноплев В.А., Конюхов А.П., Племяшова А.Г. Управление, оценивание состояния и идентификация параметров нелинейной колебательной системы // Задачи анализа и синтеза нелинейных колебательных систем. СПб.: ИПМаш РАН, 1999. Препринт 146. С. 5 – 16.
3. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Элементы математического моделирования в программных средах MATLAB 5 и Scilab. СПб.: Наука, 2001.
4. Бойков К.Б. Применение системы MATLAB при сборе и анализе информационных сигналов от внешних устройств // Труды XI Научно-технической конференции “ДАТЧИК-99”. Гурзуф, 1999. М.: МИЭМ, 1999.

5. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Механика. М.: Наука, 1965.
6. **Льюнг Л.** Идентификация систем. М.: Наука, 1992.
7. **Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000.
8. **Управление** мехатронными вибрационными установками / Под ред. И.И. Блехмана, А.Л. Фрадкова. СПб.: Наука, 2001. 278 с.
9. **Фрадков А.Л.** Схема скоростного градиента и ее применения в задачах адаптивного управления // Автоматика и телемеханика. 1979. № 9. С. 90 – 101.
10. **Фрадков А.Л.** Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990.
11. **Andrievsky, B.R., Fradkov A.L.** Feedback resonance in single and coupled 1-DOF oscillators // Intern. J. of Bifurcations and Chaos, 1999, N 10, pp. 2047–2058.
12. **Andrievsky B.R., Boykov K.B.** Numerical and Laboratory Experiments with Controlled Coupled Pendulums // Prepr. Nonlin. Contr. Design Symp. NOLCOS'01. St.Petersburg, Russia, 2001. P. 824–829.
13. **Åström K.J., Furuta K., Iwashiro M., Hoshino T.** Energy based strategies for swinging up a double pendulum // Proc. 14th World Congress of IFAC. Beijing, 1999, No. M-6a-03-4.
14. **Åström K.J., Furuta K.** Swinging up a pendulum by energy control // Automatica, 36: (2), 2000. P. 287–295.
15. **Dunnigan, M.W.** Computer based control assignment digital control of an inverted pendulum // Int. Journ. Elec. Eng. Educ. 35: (2) 1998. P. 162–174.
16. **Fradkov A.L., B.R. Andrievsky, K.B. Boykov.** Nonlinear Excitability Analysis with Application to Two-pendulum System // Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Identification and Control; February 18–21, 2002, Innsbruck, Austria, IASTED, ACTA Press. P. 374–379.
17. **Fradkov A.L., B.R. Andrievsky, K.B. Boykov.** Numerical and Experimental Excitability Analysis of Multi-Pendulum Mechatronics System // Proceedings 15th Triennial World Congress of IFAC (b'02), Barcelona, 2002, T-Th-A19.
18. **Furuta, K. and M. Yamakita** Swing up control of inverted pendulum / Proceedings of IECON'91; 1991. P. 2193–2198.
19. **Konjukhov A.P., Protopopov E.G.** Oscillations control of coupled pendula systems // 5th Intern. Student Olympiad on Automatic Control: Abstracts. St. Petersburg, Oct., 1996. P. 75 – 79.
20. **Shiriaev, A., A. Pogromsky, H. Ludvigsen et al.** On global properties of passivity-based control of an inverted pendulum // Int. Journ. Robust. Nonlin. Contr. 10: (4) 2000. P. 283–300.
21. **Spong M.W., Tsao T.-Ch.** Mechatronics education at the university of Illinois // Proc. 14th World Congress of IFAC. Beijing, 1999, No. M-6a-01-1.