

УДК 62-50

А.И. Бохонский, д-р техн. наук, профессор; М.М. Майстришин, инженер;**Э.О. Балаканов, инженер; И.В. Гусаков, инженер***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПЕРЕНОСНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ДЕФОРМИРУЕМОГО ОБЪЕКТА**

С использованием мехатронного модуля выполнена экспериментальная проверка закона оптимального переносного движения упругой системы, подтвердившая результаты теоретических исследований.

Ключевые слова: деформируемый объект, осциллятор, мехатронный модуль, контроллер, сервомотор

В [1–3] предложены и исследованы оптимальные управления переносным движением упруго деформируемых систем с конечным и бесконечным числом степеней свободы и даны примеры их приложений в различных областях техники – от манипуляторов минимальной массы до крупногабаритных разворачиваемых конструкций в космическом пространстве. Законы управления обоснованы с позиций теоретической и прикладной механики, теории оптимального управления, но экспериментальные исследования до настоящего времени не проводились.

Целью экспериментальных исследований является проверка теоретических законов оптимального переносного движения системы с одной степенью свободы (упругого осциллятора) с использованием мехатронного модуля фирмы «Фесто» для программной реализации законов переносного движения. Предполагается оценить влияние: сопротивления движению осциллятора, неточности задания его физических и геометрических параметров, приближенного представления теоретических управлений при практической реализации.

Управление $U_e(t)$ переносным движением основания упругого осциллятора (без учета сопротивления движению) должно обеспечивать перемещение из исходного состояния абсолютного покоя в конечное состояние абсолютного покоя за минимальное время T . В [1,2] предложено управление в виде

$$U_e(t) = \frac{2\pi L}{T^2} \sin^{2n_1-1} \left(\frac{\omega}{n} t \right), \quad (1)$$

где L – расстояние, на которое перемещается упругий осциллятор; T – общее время движения; $T = \frac{2\pi}{p}$;

$p = \frac{\omega}{n}$; $n = 2, 3, 4, \dots$; $n_1 = 1, 2, 3, 4, \dots$; ω – частота собственных колебаний системы с одной степенью свободы (без учета линейно-вязкого сопротивления). В частности, при $n_1 = 1$ и $n = 2$ следует достаточно простой закон переносного движения

$$U_e(t) = \frac{Lp^2}{2\pi} \sin pt. \quad (2)$$

В переносном движении должны выполняться краевые условия:

$$\begin{aligned} \text{при} \quad & t = 0; \quad S_e(0) = 0, \quad V_e(0) = 0; \\ \text{при} \quad & t = T, \quad S_e(T) = L, \quad V_e(T) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Интегрируя выражение (2) дважды и подчиняя краевым условиям (3), получаем:

$$V_e(t) = -\frac{Lp}{2\pi} \cos pt + \frac{Lp}{2\pi}, \quad S_e(t) = -\frac{Lp}{2\pi} \sin pt + \frac{Lp}{2\pi}. \quad (4)$$

Уравнение относительного движения (по отношению к осям, связанным с осциллятором и движущихся поступательно) в векторном виде записывается так:

$$m\ddot{\vec{a}}_N = \vec{\Phi}_e + \vec{F}_{yup}. \quad (5)$$

В проекции на подвижную систему координат из (5) после преобразований получаем:

$$\frac{d^2 X_r}{dt^2} + \omega^2 X_r = -U_e(t), \quad (6)$$

где $\omega = \sqrt{c/m}$; c – коэффициент жесткости упругой связи; m – сосредоточенная масса осциллятора. Начальные условия для интегрирования уравнения (6): при $t = 0$, $X_r(0) = 0$, $\dot{X}_r(0) = 0$. Решение уравнения (6) и производные имеют вид:

$$\begin{aligned} X_r(t) &= \frac{Lp^2}{2\pi(\omega^2 - p^2)} \left(\frac{p}{\omega} \sin \omega t - \sin pt \right), \\ V_r(t) &= \frac{Lp^3}{2\pi(\omega^2 - p^2)} (\cos \omega t - \cos pt), \\ a_r(t) &= \frac{Lp^3}{2\pi(\omega^2 - p^2)} (p \sin pt - \omega \sin \omega t). \end{aligned} \quad (7)$$

Легко проверить, что при $t = T = \frac{2\pi}{p} = \frac{4\pi}{\omega}$ следует: $X_r(T) = 0$, $V_r(T) = 0$, $a_r(T) = 0$.

Выражения (4) и (7) подтверждают абсолютный покой осциллятора в начальном и конечном состояниях с допущением колебаний в процессе движения.

Численный пример. Исходные данные: $L = 0,3$ м; $m = 0,1$ кг. Принято $T = 0,5$ с; тогда $\frac{2\pi}{p} = \frac{1}{2}$ и соответственно $p = 4\pi \text{ с}^{-1}$; $\omega = 2p = 8\pi \text{ с}^{-1}$. При частоте собственных колебаний $\omega = 8\pi \text{ с}^{-1}$, сосредоточенной массе осциллятора $m = 0,1$ кг, длине стержня $h = 0,2$ м необходимо найти требуемый диаметр стержня. Как известно, $\omega^2 = \frac{c}{m}$. Для стержня, защемленного одним концом со свободным другим, коэффициент жесткости вычисляется как

$$c = \frac{3EJ}{h^3}, \quad (8)$$

где $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости стали; $J = \frac{\pi d^4}{64}$ – осевой момент инерции поперечного сечения стержня, d – диаметр стержня. После преобразований с учетом $\omega = 4\pi$ выражение для диаметра запишутся как:

$$d = \sqrt[4]{\frac{64^2 h^3 m n}{3E}}. \quad (9)$$

С учетом принятых исходных данных получено: $d = 0,0020105$ м. В эксперименте принято $d = 0,002$ м = 2 мм. Для данного диаметра прочность осциллятора при динамических нагрузках обеспечена. Функции (2), (4) и (7) принимают вид:

$$\begin{aligned} S_e &= -0,0477464829 \sin(12,56637062t) + 0,6000000000t, \\ V_e &= -0,6000000000 \cos(12,56637062t) + 0,6000000000t, \\ U_e &= 7,539822370 \sin(12,56637062t), \\ X_r &= 0,007957747150 \sin(25,13274123t) - 0,01591549430 \sin(12,56637062t), \\ V_r &= 0,2000000000 \cos(25,13274123t) - 0,2000000000 \cos(12,56637062t), \\ A_r &= -5,026548245 \sin(25,13274123t) + 2,513274124 \sin(12,56637062t). \end{aligned}$$

При экспериментальной проверке оптимального закона переносного движения упругого осциллятора необходимо обеспечить движение каретки мехатрона по закону $S_e(t)$. За общее время $T = 0,5$ с каретка должна пройти путь $L = 0,3$ м. Хотя при $t = \frac{T}{2}$ из (4) $S_e(T/2) = L/2 = 0,15$ м, но функция S_e меняет кривизну, что должно быть воспроизведено в эксперименте.

Теоретические графики переносного и относительного движений изображены на рисунках 1 и 2. Ранее установлено, что при замене непрерывного сигнала серией импульсов обеспечивается с достаточной для практики точностью требуемое оптимальное переносное движение [3].

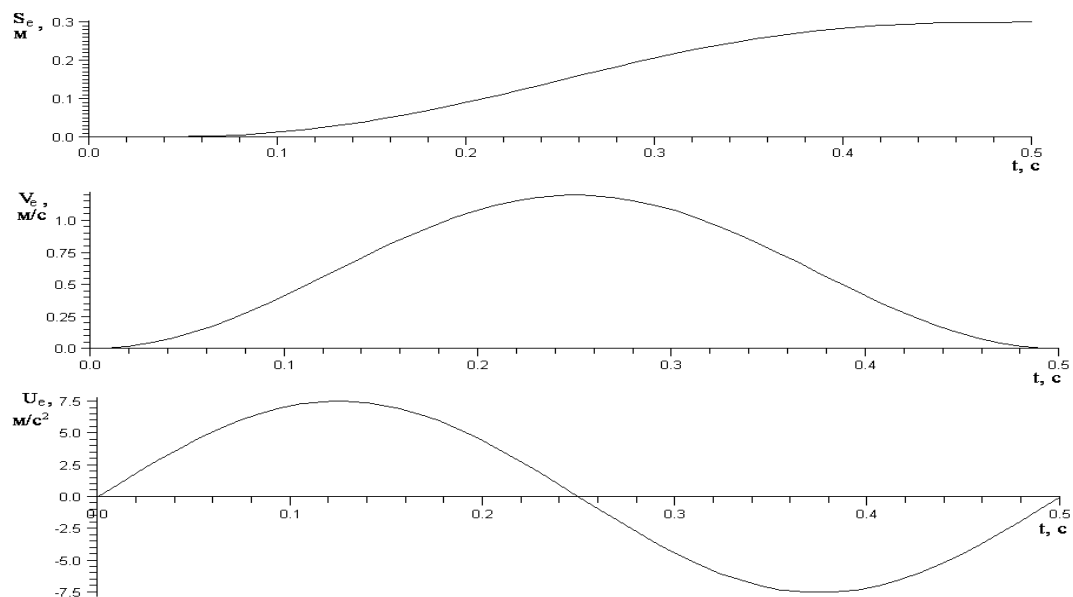


Рисунок 1 – Переносное оптимальное движение упругого объекта

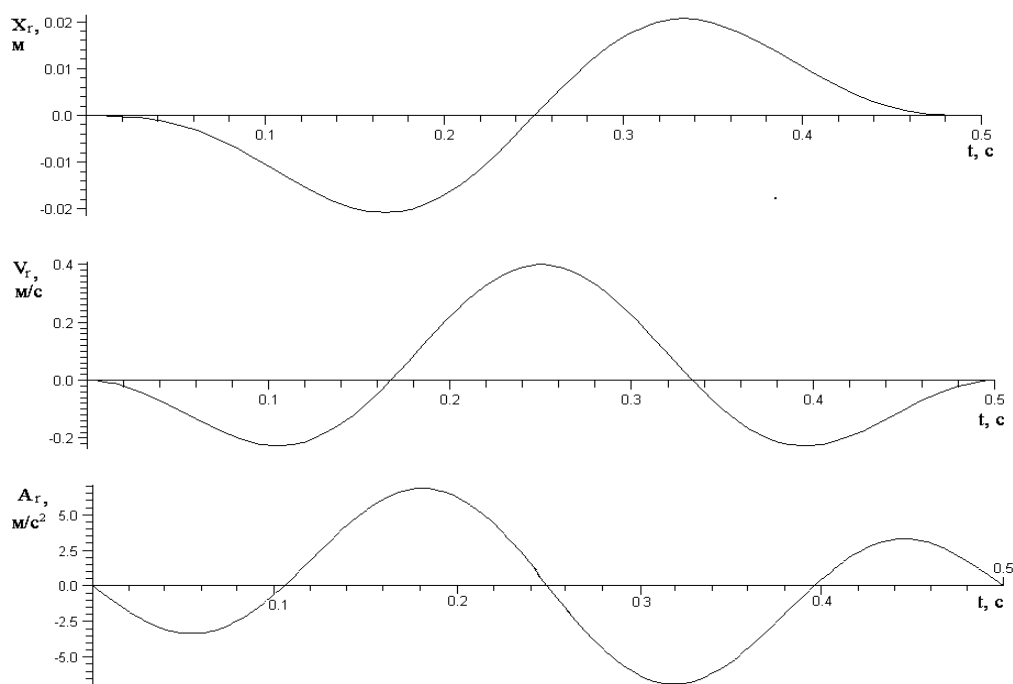


Рисунок 2 – Относительное движение (колебания) упругого объекта

Для построения графика функции $V_e = V_e(S_e)$, где S_e – перемещение основания осциллятора в переносном движении (при фиксированных значениях $S_e = 0, 0,075\text{ м}, 0,15\text{ м}, 0,225\text{ м}, 0,3\text{ м}$) из уравнения $S_e(t) = -\frac{L}{2\pi} \sin(pt) + \frac{Lpt}{2\pi}$ найдены моменты времени (с помощью функции `fsolve` в Maple), а затем, после подстановки в выражение $V_e(t) = -\frac{Lp}{2\pi} \cos pt + \frac{LP}{2\pi}$, получены фиксированные значения скорости. По численным результатам построен график зависимости скорости от перемещения (рисунок 3).

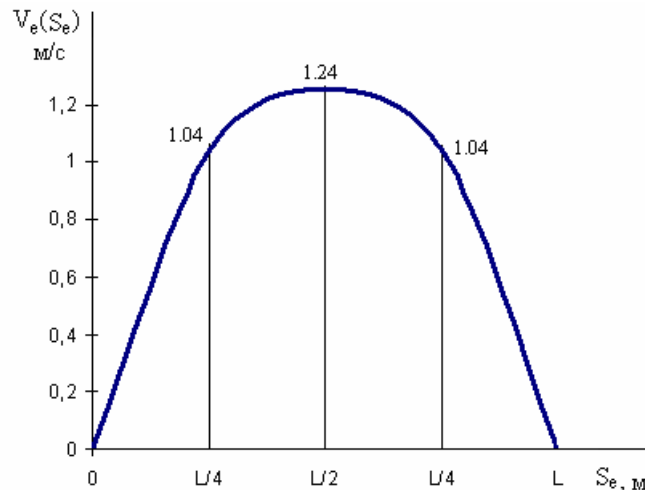


Рисунок 3 – График зависимости переносной скорости от перемещения в переносном движении

Математическое обеспечение и оборудование лаборатории “Фесто”

SIMATIC STEP 7 – программное обеспечение фирмы Siemens AG для разработки систем автоматизации на основе программируемых логических контроллеров SIMATIC S7-300/S7-400/M7/C7 и WinAC (версии: SIMATIC STEP 7; SIMATIC STEP 7 Professional; SIMATIC STEP 7 Lite). С помощью программного пакета выполняется комплекс работ по созданию и обслуживанию систем автоматизации на основе программируемых логических контроллеров SIMATIC S7–300 и SIMATIC S7–400 фирмы Siemens. Работу обеспечивает утилита STEP 7 – SIMATIC Manager. STEP 7 позволяет производить конфигурирование программируемых логических контроллеров и сетей (утилиты HWConfig и NetPro). В процессе конфигурирования определяется состав оборудования, разбиение на модули, способы подключения, используемые сети, выбираются настройки для модулей. Программирование контроллеров производится на: LAD – язык релейно-контактной логики; FBD – язык функциональных блочных диаграмм; STL – язык списка инструкций.

В дополнение к трем основным языкам могут быть добавлены дополнительные языки: SCL – структурированный язык управления, по синтаксису близкий к Pascal; GRAPH 7 – технологическими процессами; HiGraph 7 – язык управления на основе графа состояний системы; CFC – постоянные функциональные схемы.

Возможность наблюдения за текущим состоянием программы, доступное при использовании любого языка программирования, обеспечивает не только отладку программного обеспечения, но и поиск неисправностей в оборудовании, даже если оно не имеет средств диагностики.

SIMATIC S7–300 – модульный программируемый контроллер, предназначенный для построения систем автоматизации. Контроллеры SIMATIC S7–300 имеют модульную конструкцию и могут включать ряд модулей: модуль центрального процессора (CPU); модули блоков питания (PS), обеспечивающие возможность питания контроллера от сети переменного тока напряжением 120/230В или от источника постоянного тока напряжением 24/48/60/110В; сигнальные модули (SM), предназначенные для ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов с различными электрическими и временными параметрами; коммуникационные процессоры (CP) для подключения к сетям PROFIBUS, Industrial Ethernet, AS-Interface или организации связи по PtP (point to point) интерфейсу.

Используются также функциональные модули (FM) для решения задач автоматического регулирования, позиционирования, обработки сигналов. Функциональные модули снабжены встроенными микропроцессорами и способны выполнять возложенные на них функции даже в случае отказа центрального процессора ПЛК. Интерфейсные модули (IM), обеспечивают возможность подключения к базовому блоку (стойка с CPU) стоек расширения ввода-вывода. Контроллеры SIMATIC S7–300 позволяют использовать в своем составе до 32 сигнальных и функциональных модулей, а также коммуникационных процессоров, распределенных по 4 монтажным стойкам.

Для проведения экспериментальных исследований разработана управляющая программа для контроллера Siemens S7–300, обеспечивающая изменение скорости движения каретки.

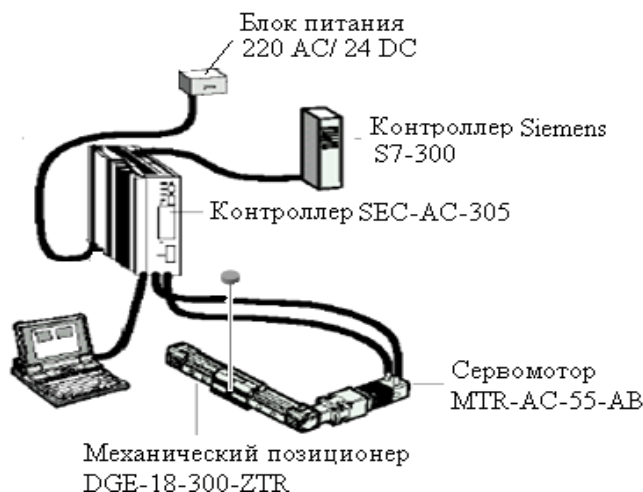


Рисунок 4 – Экспериментальный стенд для исследования колебания осциллятора (упругой системы с одной степенью свободы)

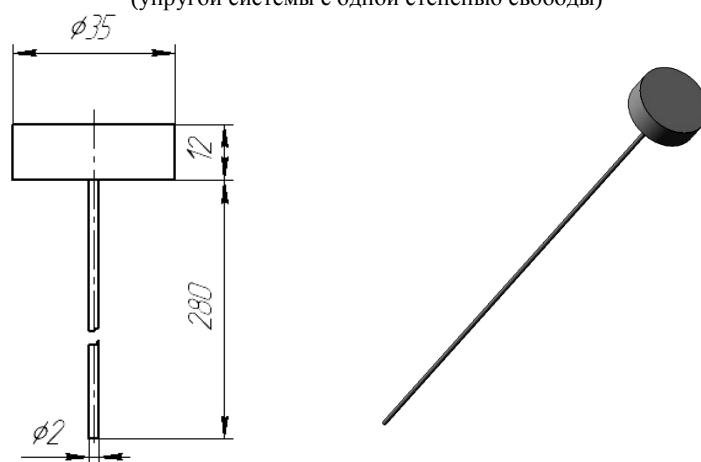


Рисунок 5 – Исследуемый осциллятор

Экспериментальная реализации управления переносным движением

В экспериментальных исследованиях использовалось следующее оборудование

Контроллер Simatic S7-300 CPU-313C – семейство контроллеров средней производительности фирмы Siemens AG из семейства устройств автоматизации SIMATIC S7. Конструкция контроллера модульная, модули монтируются на профильной шине (рельсе).

Высокопроизводительный контроллер серводвигателя SEC-AC-305 для управления сервомотором, позволяющий преобразовать электрический сигнал для управления технологическим процессом.

Зубчато-ременной позиционер DGE-18-300-ZR – электромеханическая передача с позиционируемой кареткой для перемещения технологических объектов.

Серводвигатель MTR-AC-55AB – управляемый мотор, взаимодействующий с позиционерами серии DGE.

Потенциометрический датчик положения MLO-POT-300-TLF – переменный резистор, используемый в автоматических системах управления перемещением. Выходной характеристикой датчика является напряжение, пропорциональное величине перемещения ($U_{вых} = 0..10\text{ В}$).

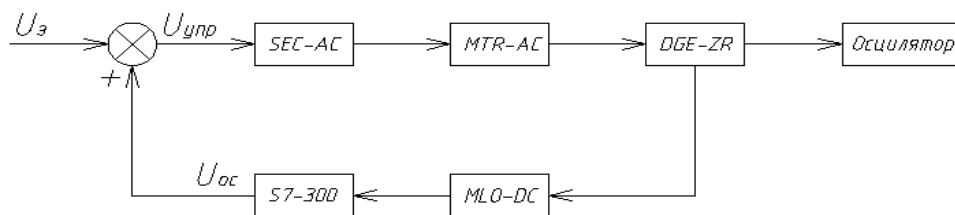
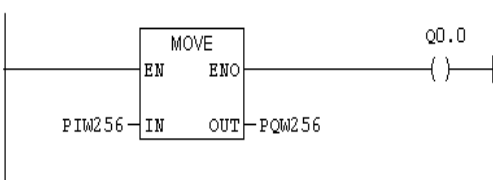
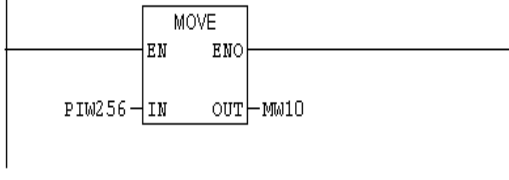
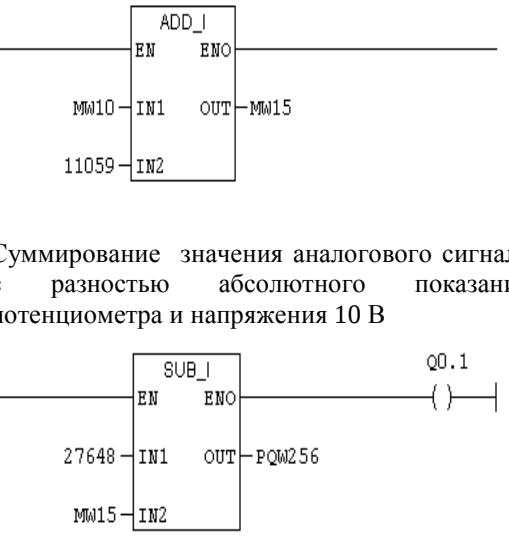


Рисунок 6 – Структурная блок-схема реализации управления в экспериментальной установке

Формирование сигнала происходило по алгоритму, описанному в таблице 1.

Таблица 1 – Алгоритм формирования сигнала

Выходное напряжение потенциометра	
Меньше 3-х вольт	Больше 3-х вольт
 Прием аналогового сигнала обратной связи, выдача аналоговой команды, прямо пропорциональной принятому сигналу	 Прием аналогового сигнала и передача его численного значения в ячейку памяти для дальнейшей обработки
	 Суммирование значения аналогового сигнала с разностью абсолютного показания потенциометра и напряжения 10 В Выдача аналоговой команды, обратно пропорциональной принятому сигналу

Принцип действия системы управления экспериментальной установкой основан на обработке аналогового сигнала от потенциометрического датчика положения с выработкой команды для контроллера сервомотора, который в свою очередь выдает питающее напряжение определенной частоты.

Перемещение каретки потенциометрической линейки от 0 до 0,3 м соответствует выходному напряжению потенциометра (датчика положения) от 0 до 6 В. Согласно программе скорость перемещения изменяется в зависимости от уровня напряжения, поступающего на контроллер сервомотора, подаваемого через потенциометр.

В соответствии с целью эксперимента в середине пути обеспечивалась (рисунок 3) пиковая скорость $V_e = 1,25$ м/с. Диаметр приводной шестерни электромеханического позиционера $d = 16,55$ мм. Для скорости $V_e = 1,25$ м/с задавалась частота вращения шестерни $n = 1442$ об/мин. В программе Wnemos управления сервомотором предусмотрено, что входному напряжению 3 В соответствует частота вращения $n = 1442$ об/мин., на контроллер серводвигателя должно поступать напряжения в диапазоне от 0 до 3 В. Для обеспечения заданного закона перемещения подавалось напряжение, полученное с потенциометрической линейки и преобразовывалось; для обработки и выдачи сигнала управления использовался котроллер Simatic S7-300 CPU-313C.

Выводы

Сопротивления движению (внешнее – сопротивление воздуха и внутреннее – линейно-вязкое) не существенно влияют на характер относительного движения упругой системы. Даже приближенное задание закона переносного движения практически обеспечивает достижение покоя упругой системы в конце движения. Другие законы переносного движения приводят к значительным колебаниям осциллятора, которые могут его разрушить.

Для упругих объектов техники при известной частоте первого тона собственных колебаний применение обоснованного теоретически и подтвержденного экспериментально закона переносного движения с достаточной для практики точностью обеспечивает достижение покоя системы в конце переносного движения.

Дальнейшие исследования предполагают реализацию оптимальных управлений переносным движением с использованием пневмоприводов фирмы “Фесто”.

Бibliографический список

1. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. — 296 с.
2. Бохонский А.И. Управление переносным движением упругих систем / А.И. Бохонский // Динамические системы: межвед. науч. сб. — Симферополь: Изд-во «КФТ», 1999. — С. 30–36.
3. Бохонский А.И. Импульсная реализация оптимального переносного движения упругих объектов военной техники / А.И. Бохонский, Г.В. Исаева, Т.В. Мозолевская // Зб. наук. пр. — Севастополь: ВМІ ім. П.С. Нахімова, 2003. — Вип. 2. — С. 21–24.

Поступила в редакцию 29.01.2010 г.