

сигнала, скажность. В дальнейшем, планируется реализации задания формы огибающей амплитудного спектра (и задания формы импульса), а также совершенствование пользовательского интерфейса с использованием имеющихся в среде компонентов и языка VBScript.

### Список литературы

1. Оценка эффективности эксплуатации внутриквартирных инженерных систем [Электронный ресурс] // Сайт некоммерческого партнерства инженеров АВОК. – Режим доступа: [http://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=2456](http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2456). Дата обращения: 11.03.15.
2. Фаерман В.А., Степанцов П.С. Структурные и функциональные особенности современных вибродатчиков // Молодёжь и современные информационные технологии (МСИТ XI): сб. трудов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 221–223.
3. Основы измерения вибрации по материалам фирмы DLI [Электронный ресурс] // Вибродиагностика для начинающих и специалистов / под ред. Смирнова В.А. – Режим доступа: [http://www.vibration.ru/osn\\_vibracii.shtml](http://www.vibration.ru/osn_vibracii.shtml). Дата обращения: 09.03.15.
4. Фаерман В.А. Общие принципы вибрационного контроля машинного оборудования // Молодёжь и современные информационные технологии (МСИТ XI): сб. трудов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 223–225.
5. Приборы для измерения вибрации [Электронный ресурс] // Сайт компании «Евролаб». – Режим доступа: [http://www.eurolab.ru/izmerenie\\_vibracii\\_pribory](http://www.eurolab.ru/izmerenie_vibracii_pribory). Дата обращения 09.03.15.
6. Фаерман В.А., Аврамчук В.С. Применение частотно-временной корреляционной функции для повышения эффективности вибродиагностики // Современная техника и технологии (СТТ XIX): сб. трудов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 379–380.

УДК 004

## АППРОКСИМАЦИЯ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ЦЕПЧКОЙ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

*С.А. Майков*

*Научный руководитель: А.В. Воронин, к.т.н., доцент каф. ИКСУ ИК ТПУ*

*Томский политехнический университет*

*634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 30*

*E-mail: sim3201@yandex.ru*

### Введение

Наземная отработка динамики процессов стыковки, раскрытия и сборки крупногабаритных космических конструкций, предназначенных для работы в условиях невесомости, становится всё более ответственным, трудоёмким и дорогостоящим этапом создания и освоения космической техники.

Для ее успешной реализации необходима разработка и создание стендов обезвешивания, позволяющих имитировать процессы развертывания составляющих космического аппарата, в частности солнечных батарей и больших антенн в космическом пространстве за счет компенсации всех сил, действующие на объект: силы трения, гравитационные силы, силы инерции. Это возможно лишь при активных вариантах стендов, представляющих собой замкнутые электромеханические системы, имитирующие независимость движения элементов конструкции от гравитационного воздействия Земли.

Создание активных стендов для проверки механизмов разворачивания крупных космических конструкций в вертикальной плоскости обычно предполагает использование длинных тросовых подвесов. Известно, что одной из проблем при разработке таких стендов является

исключение резонансных режимов, связанных с тем, что вся конструкция подвеса и особенно тросовая система обладает существенной нежесткостью. При этом, на этапе разработки стенда необходимо так моделировать систему обезвешивания, чтобы, с одной стороны, не потерять важные особенности ее частотных характеристик, с другой, не внести в модель неоправданные усложнения.

Таким образом, одной из задач, которую необходимо решать при создании систем обезвешивания, является получение адекватных и удобных для практического применения математических моделей тросовых подвесов, позволяющих анализировать динамические характеристики работы стенда, проводить структурно-параметрический синтез систем управления приводами.

Многие элементы тросовых систем обезвешивания являются объектами с распределёнными параметрами. При этом математический аппарат, строго описывающий объекты с распределёнными параметрами, существенно сложнее, чем аппарат объектов с сосредоточенными параметрами. Поэтому на практике всегда, где это возможно, прибегают к аппроксимации, т. е. заменяют объекты с распределёнными параметрами на объекты с сосредоточенными параметрами, например, разбивая пространство на небольшие элементы (подпространства).

Это означает, например, что одномерный упругий элемент с распределёнными параметрами заменяется на многомассовую систему с абсолютно жёсткими массами и невесомыми упругими элементами конечной жёсткости. Такая аппроксимация позволяет свести дифференциальные уравнения движения в частных производных к системе обычных дифференциальных уравнений, а в задачах статики – свести дифференциальные уравнения равновесия к алгебраическим уравнениям.

В исследованиях по аппроксимации число сосредоточенных масс колеблется в широких пределах: от одной-двух до 10–20. Слишком большое число их приводит к неоправданному усложнению расчётной модели и значительному повышению порядка дифференциального уравнения системы в целом. При этом обычно выделяются два этапа в задаче проектирования систем. На первом этапе осуществляется аппроксимация механического элемента сосредоточенной системой. На втором этапе производится понижение порядка сосредоточенной модели.

Для успешного моделирования электромеханических систем, содержащих объекты с распределёнными параметрами, необходимо иметь инструмент, позволяющий эффективно переходить к моделям с сосредоточенными параметрами при различной степени дискретизации объекта. Проведем сравнение двух методов расчета передаточных функций, описанных в литературных источниках [1] и [2].

### Аппроксимация одномерного упругого объекта цепочкой сосредоточенных осцилляторов

Рассмотрим вертикальный канал системы активного обезвешивания, состоящий из каретки массой  $m_0$ , рабочей нагрузки массой  $m_n$  и троса, обладающего массой и упругостью. Проведем дискретизацию модели троса, представив его в виде последовательного соединения абсолютно жестких масс и пружин, как это представлено на рис. 1.



Рис. 1. Цепочка осцилляторов

На примере трёхмассовой системы (рис. 2) рассмотрим возможности двух методов получения передаточных функций между входным воздействием  $F$  со стороны каретки и перемещением  $u_2$  рабочей нагрузки.

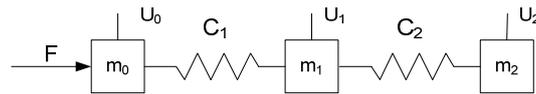


Рис. 2. Трёхмассовая цепочка сосредоточенных осцилляторов  
(где  $U_i$  смещение относительно массы  $m_i$ )

В [1] описан метод расчета, при котором дискретизированная модель тросовой подвески записывается как система трех дифференциальных уравнений второго порядка относительно выделенных масс  $m_0, m_1, m_2$ . Применяв преобразование Лапласа можно перейти перейдя к операторной матричной матричной записи, откуда сравнительно несложно определить передаточные функции линеаризованной модели по любой выходной переменной. Метод выглядит недостаточно формализованным, особенно на этапе формирования начальных уравнений.

Более наглядным представляется использование для расчета передаточной функции аппарата графов связи [2]. Метод графов связей относится к группе топологических методов, использующих графическое представление исследуемого объекта. Он основан на моделировании энергетических процессов в системе и позволяет на единой методологической базе моделировать объекты, содержащие элементы различной физической природы.

Графовая модель трёхмассовой цепочки приведена на рис. 3.

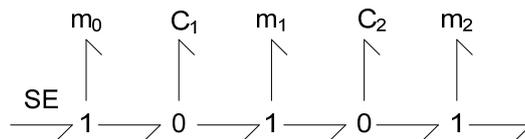


Рис. 3. Граф связей для трёхмассовой системы

Для получения передаточной функции по графу известна формализованная процедура, основанная на правиле Мейсона [2]. Она предполагает анализ структуры графа с выделением циклов и прямых путей с последующим вычислением передаточной функции по формуле

$$W = \frac{\sum_i P_i \Delta_i}{\Delta}, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – определитель графа;  $P_i$  – передаточная функция  $i$ -го пути между заданными входом и выходом;  $\Delta_i$  – определитель сокращенного графа.

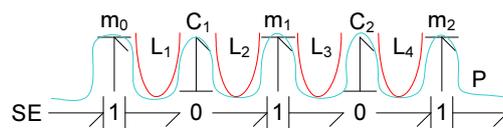


Рис. 4. Граф связей рассматриваемой системы с расставленными причинностями, независимыми циклами и прямым путём

Представленный на рис. 4 граф содержит 4 цикла со следующими передаточными функциями:

$$L_1 = \frac{-1}{m_0 C_1 p^2}; \quad L_2 = \frac{-1}{m_1 C_1 p^2};$$

$$L_3 = \frac{-1}{m_2 C_2 p^2}; \quad L_4 = \frac{-1}{m_2 C_2 p^2}.$$

Определитель графа, исходя из его структуры может, быть вычислен по формуле

$$\Delta = 1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 + L_1 L_3 + L_1 L_4 + L_2 L_4,$$

а единственный прямой путь имеет передаточную функцию

$$P = \frac{1}{m_0 m_1 m_2 C_1 C_2 p^5}.$$

Подставив полученные выражения в (1) получим

$$W^p(p) = \frac{1}{p^2(m_0 m_1 m_2 C_1 C_2 p^2 + m_1 m_2 C_2 p^2 + m_0 m_2 C_2 p^2 + m_0 m_2 C_1 p^2 + m_0 m_1 C_1 p^2 + m_0 + m_1 + m_2)}$$

Данная передаточная функция соответствует полученной в [1].

### Заключение

Использование метода графов связи в сочетании с аппроксимацией упругого троса цепочкой сосредоточенных осцилляторов позволяет реализовать наглядную и достаточно формализованную процедуру получения дискретизированных математических моделей одномерных распределенных объектов при различных уровнях дискретизации

### Список литературы

1. Электроприводы с распределёнными параметрами механических элементов. Рассудов Л.Н. Мяздель В.Н. 1987. – 143.
2. Применение метода графов связей в технике / Под ред. Кэрнопа Д. и Розенберга Р. – М.: Мир, 1973.

УДК 004

## ПОСТРОЕНИЕ ЖЕЛАЕМОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ МОБИЛЬНОГО ПРИБОРА С ФУНКЦИЯМИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

*А.В. Кудрявцев Е.В. Соколова*

*Научный руководитель: В.И. Гончаров, д.т.н., профессор ТПУ*

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

*Томский Университет Систем Управления и Радиоэлектроники*

*E-mail: kudrjawzew\_A@mail.ru, jacky\_90@mail.ru*

### Annotation

*In this article considered the method of construction of the desired transfer function by direct indicators of quality on the basis of real interpolation method and its application based on device identifier on the platform panel controller OWEN SPK-207.*

**Key words:** identification, transfer function, quality indicators, the construction of the transfer function, synthesis.

**Ключевые слова:** идентификация, передаточная функция, показатели качества, построение передаточной функции, синтез.

### Введение

Синтез систем автоматического управления (САУ) можно свести к решению уравнения  $W_{жс}^p(p) = W_{нч}(p) \cdot W_p(p)$ , в котором  $W_{жс}^p(p)$  – желаемая передаточная функция разомкнутой системы,  $W_{нч}(p)$  – передаточная функция неизменяемой части системы,  $W_p(p)$  – передаточная функция регулятора. Решением уравнения является передаточная функция регулятора  $W_p(p)$ . При формировании уравнения необходимо иметь передаточные функции  $W_{нч}(p)$  и  $W_{жс}^p(p)$ . Последняя практически всегда неизвестна, так как обычно заданы лишь показате-