

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83

В. Т. Вишнеревский, И. С. Стасенко, Г. С. Ленеvский, А. А. Корнеев

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ
МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

UDC 62-83

V. T. Vishnerevsky, I. S. Stasenko, G. S. Lenevsky, A. A. Korneyev

**EXPERIMENTAL STUDY OF FREQUENCY PROPERTIES OF MECHANICAL
ELEMENTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS**

Аннотация

Рассматриваются вопросы экспериментального получения логарифмических амплитудно-частотных характеристик протяженного упругого элемента с распределенными параметрами. Данный элемент является составной частью электромеханической системы статически уравновешенного скипового подъемника с большой высотой подъема. Приведено описание лабораторного оборудования, измерительных устройств и методики проведения эксперимента. Представлены характеристики исследуемых элементов с различными параметрами, а также выводы о применимости этих элементов в дальнейших исследованиях.

Ключевые слова:

электропривод, распределенные параметры, частотные характеристики, лабораторная установка, кривошипно-шатунный механизм.

Abstract

The paper deals with the issues of obtaining experimentally some logarithmic amplitude-frequency characteristics from the family of characteristics of an extended resilient member, taking into account the distribution of its parameters. This member is an integral part of the electromechanical system of the statically balanced skip hoist with a high hoisting height. The paper describes the laboratory equipment, measuring devices and methods of performing the experiment. The characteristics of studied elements with different parameters are presented. The paper also gives the conclusions on the applicability of the studied elements and of some components of the laboratory setup for further research aimed at testing the laws of controlling the linear system of the electric drive.

Key words:

electric drive, distributed parameters, frequency characteristics, laboratory setup, crank mechanism.

В связи с растущими требованиями, предъявляемыми к энергетической эффективности промышленных установок, существует необходимость в постоянном совершенствовании систем управления электроприводами. В настоящее время электропривод играет

особенно важную роль в формировании режимов работы, регулировании координат и энергосбережении при работе промышленных установок. В некоторых отраслях горнодобывающей промышленности для приведения в движение рабочих машин часто применяются

электромеханические системы, в составе которых можно выделить упругие элементы. К таким системам относятся электроприводы шахтных подъемников и конвейеров. При достаточно большой длине протяженных упругих элементов целесообразно рассматривать системы таких электроприводов как системы с распределенными параметрами [1]. Построение систем управления указанными электроприводами подразумевает наличие исчерпывающих знаний об объекте управления. Поскольку рассмотрение объекта управления как элемента с распределенными параметрами предполагает учет нескольких резонансных и антирезонансных частот в рабочем диапазоне электропривода, возникает необходимость в изучении амплитудно-частотных характеристик, которые важны при синтезе систем автоматического управления. В связи с тем обстоятельством, что частотные характеристики реальных объектов не могут быть получены экспериментально,

исследования в данной области направлены на разработку методики расчета указанных характеристик.

На кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» ранее проводились экспериментальные исследования, направленные на получение частотных характеристик кольцевых элементов с распределенными параметрами [2]. Однако в настоящее время приоритетным направлением таких исследований является получение частотных характеристик линейного протяженного упругого элемента, который можно выделить в составе механической части шахтных подъемников со значительной высотой подъема. В связи с данным обстоятельством была разработана и создана лабораторная установка, предназначенная для проведения указанных исследований, детальное описание которой приведено в [3, 4]. Фотографии лабораторной установки представлены на рис. 1.

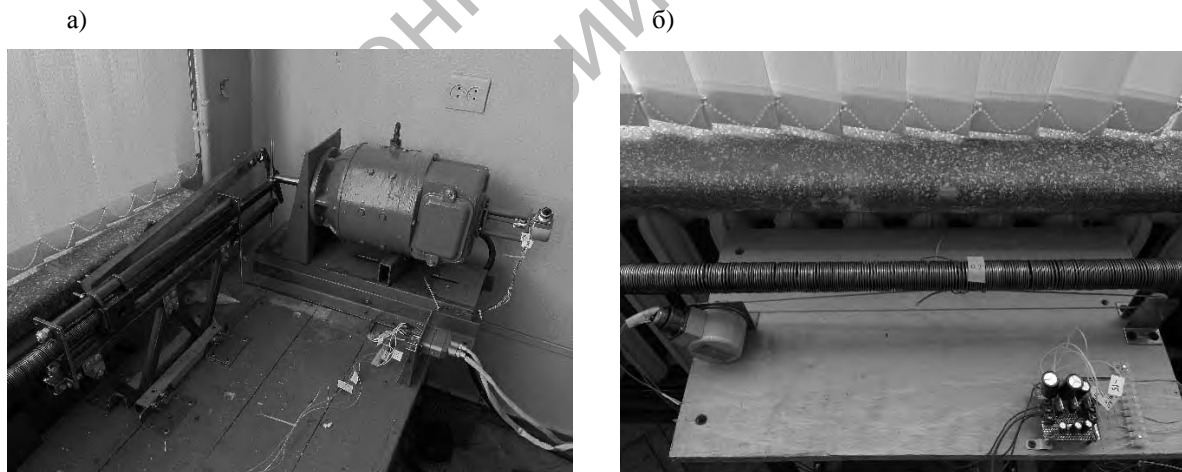


Рис. 1. Лабораторная установка для исследования частотных свойств элементов с распределенными параметрами: а – приводная станция лабораторной установки; б – устройство для измерения амплитуды колебаний скорости исследуемого упругого элемента

Для повышения точности измерения координат вектора состояния электромеханической системы было проделано следующее.

1. Разработан частотомер для измерения частоты вращения вала двигателя, который осуществляет квадратный счет импульсов, поступающих

с энкодера, закрепленного на валу приводного электродвигателя. Данный прибор измеряет частоту с точностью до 0,01 об./с и обеспечивает быстрое действие в 0,1 с.

2. Усовершенствована информационно-измерительная система. Используемый микроконтроллер с помощью внешних прерываний подсчитывает фронты и срезы импульсов, поступающих с энкодера, за определенный промежуток времени, таким образом, была увеличена разрешающая способность датчика скорости без снижения быстродействия. Была обеспечена передача данных на персональный компьютер по интерфейсу RS-232 с возможностью отображения на мониторе тренда измеряемой величины с требуемой разверткой по времени, а также сохранения значений полученного тренда в файл для дальнейшей обработки. Подсчет поступающих с энкодера импульсов осуществляется устройством в течение промежутка времени, равного 0,02 с. Полученные шестнадцатиразрядные двоичные числа передаются на персональный компьютер после запроса, сделанного программой.

3. Установлен широтно-импульсный регулятор напряжения на якоре приводного двигателя. Данный преобразователь содержит цифровой регулятор в контуре регулирования скорости, который обеспечивает практически нулевой статизм по задающему воздействию [5]. Широтно-импульсная модуляция осуществляется на частоте 7800 Гц. При использовании обратной связи по скорости величина быстродействия контура скорости составляет 0,005 с.

С помощью представленной лабораторной установки в результате проведения предварительного эксперимента был получен график логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) исследуемого элемента от усилия к скорости.

После приведения масс механической части исследуемой электромехани-

ческой системы к валу приводного двигателя [6] были определены следующие параметры линейного элемента с распределенной упругостью: $\mu_1 = 0,98$, $\mu_2 = 0,0017$, $\mu_k = 0,013$. На основе результатов опыта по измерению скорости распространения волны упругой продольной деформации был вычислен нормирующий коэффициент $k = 1,4$ [7]. Время распространения волны по упругому элементу фиксировалось посредством цифровой видеосъемки с последующим покадровым просмотром для определения момента возврата волны.

ЛАЧХ, полученная экспериментально (линия 1), а также расчетная ЛАЧХ [7] исследуемого элемента с распределенными параметрами (линия 2) изображены на рис. 2. Расчетная ЛАЧХ представлена без учета коэффициентов диссипации. Измерение скорости производилось в точке с координатой $\zeta = 1$, что соответствует незакрепленному концу исследуемого упругого элемента.

Расчет значений экспериментальной ЛАЧХ осуществляется следующим образом.

В ходе проведения эксперимента производится измерение значения силы тока в цепи якоря приводного двигателя. Для дальнейших расчетов используется амплитудное значение силы тока, которое имеет место при вертикальном положении кривошипа и пропорционально прикладываемому усилию. По графику сигнала тока определяется усредненное значение амплитуды колебаний за несколько периодов. Значение прикладываемого к исследуемому элементу усилия можно найти по формуле

$$F = \frac{I \cdot C}{R}, \quad (1)$$

где I – усредненное значение силы тока якоря двигателя, А; C – конструктивный коэффициент двигателя, В·с; R – радиус кривошипа, м.

Экспериментальная ЛАЧХ строится по точкам по следующей формуле:

$$L(\omega_i) = 20 \lg \frac{V_i}{F_i}, \quad (2)$$

где ω_i – значение частоты входного воздействия в точке i ; V_i – значение амплитуды колебаний скорости в точке i ;

F_i – величина входного усилия в точке i . Так же, как и при измерении тока, в качестве амплитудного значения скорости для дальнейших расчетов используется среднее значение амплитуды колебаний за несколько периодов.

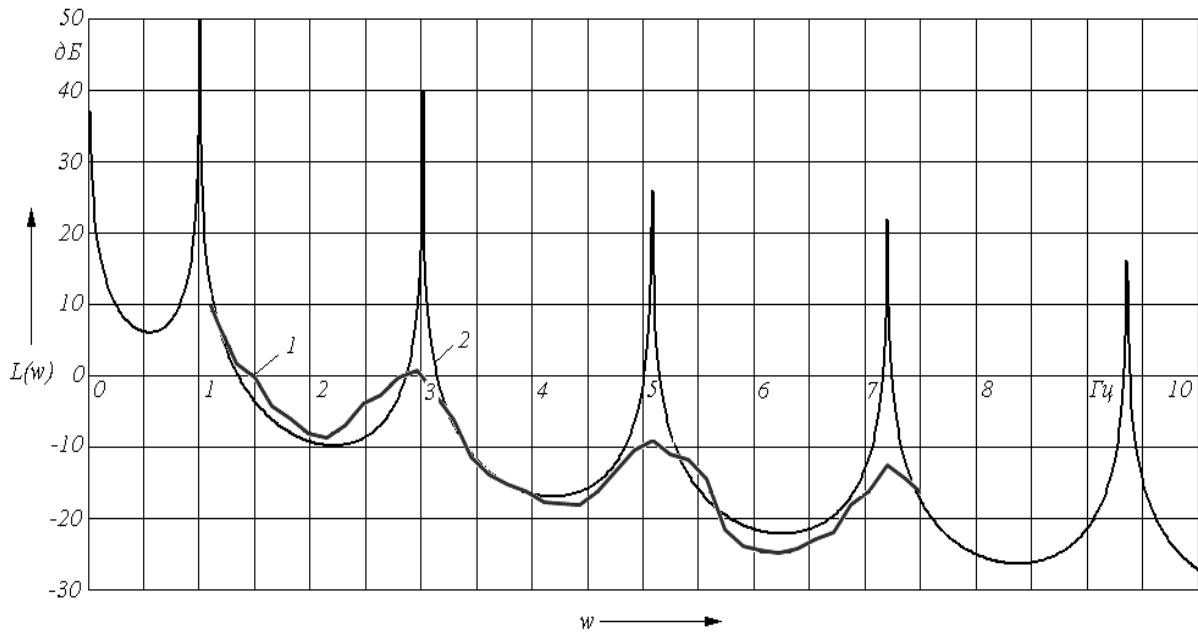


Рис. 2. Графики расчетной и экспериментальной ЛАЧХ исследуемого элемента

Максимальная абсолютная погрешность на линейных участках ЛАЧХ не превышает 5 дБ, что при совокупной погрешности средств измерения скорости и тока с учетом неточности стабилизации частоты входного воздействия является допустимым. Погрешность в области резонансных частот во внимание не принимается, поскольку реальным системам свойственна диссипация колебаний за счет сил трения. При построении расчетной ЛАЧХ коэффициенты диссипации не учитывались.

По графикам, представленным на рис. 2, были определены коэффициенты диссипации колебаний при каждом значении резонансной частоты, а передаточная функция исследуемого элемента разложена на простейшие дроби [7]. Таким образом, была проведена иденти-

фикация параметров элемента с распределенной упругостью по методике, изложенной в [1].

Из графика ЛАЧХ (рис. 2) видно, что значения коэффициентов диссипации оказались слишком велики. Проведение экспериментальных исследований способов коррекции в системе электропривода с рассмотренным упругим элементом затруднительно из-за чрезмерного демпфирования распространяемых колебаний. Поэтому для наиболее полной оценки влияния резонансных частот на динамику систем с распределенными параметрами необходимо было усовершенствовать лабораторную установку с целью снижения демпфирования колебаний, а также создать возможность получения ЛАЧХ в точках, находящихся на всей протяженности исследуемого

элемента. В связи с данными обстоятельствами было принято решение изменить конструкцию механической части лабораторной установки для исследования более массивных упругих элементов. Следующая серия экспериментальных исследований проводилась с использованием упругого элемента с параметрами: $\mu_1 = 0,96$, $\mu_2 = 0$, $\mu_k = 0,04$, $k = 1,15$. Значение массы до-

полнительного груза принято равным нулю из-за возрастания демпфирования колебаний при приближении волн к дальнему концу исследуемого элемента.

На рис. 3 представлены графики ЛАЧХ, полученные в точках, лежащих на расстоянии: а – $0,8l$; б – $0,6l$; в – $0,4l$; г – $0,2l$, где l – длина исследуемого элемента.

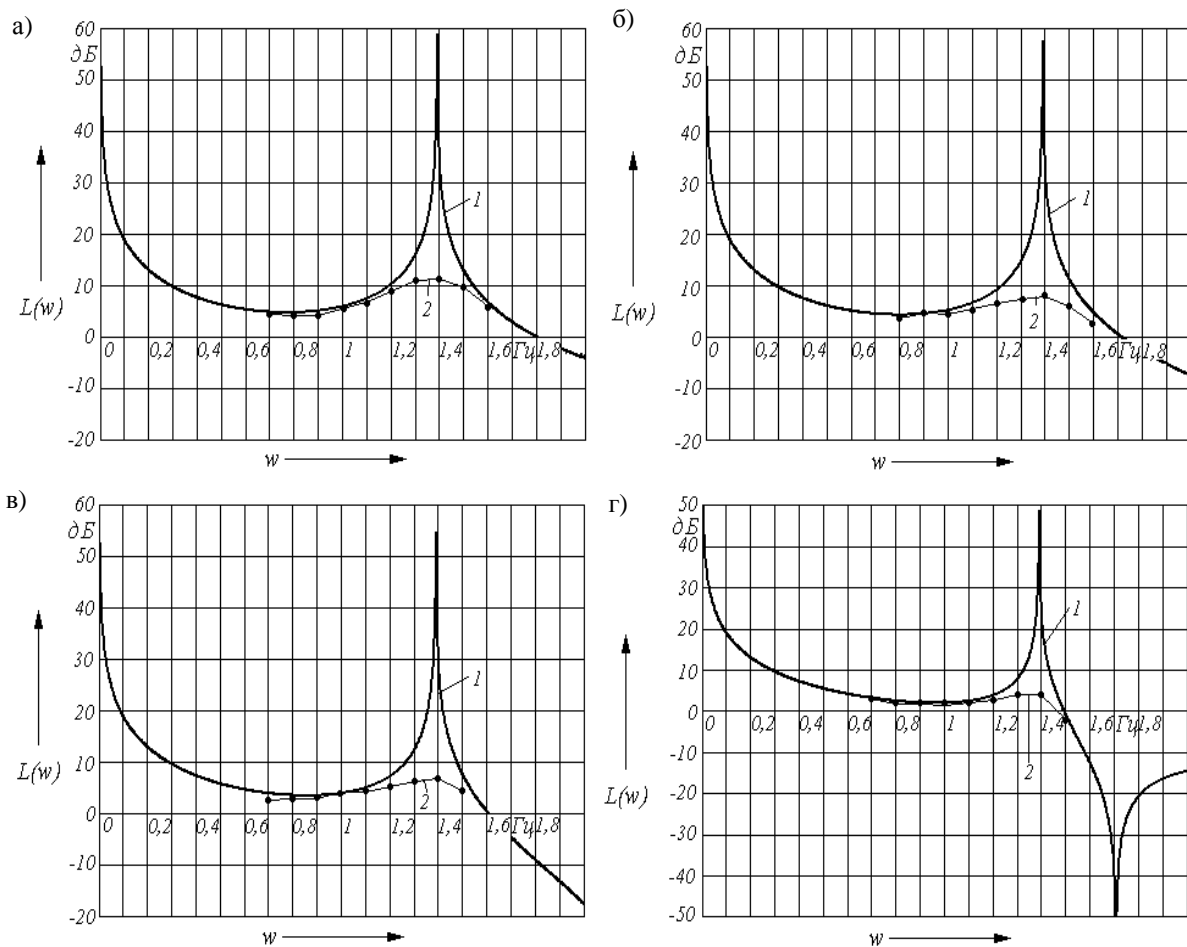


Рис. 3. Графики расчетных и экспериментальных ЛАЧХ упругого элемента с увеличенной массой

Благодаря проведенным усовершенствованиям удалось добиться существенного повышения точности соответствия экспериментальных данных расчетным. Как видно из рис. 3, экспериментальные графики на линейных участках повторяют расчетные с максимальной абсолютной погрешностью

1,5 дБ. Однако демпфирование колебаний, как и в предыдущем случае, оказалось достаточно велико, поскольку отсутствует возможность в достаточной степени понизить коэффициент трения исследуемого элемента о направляющую.

При превышении частоты в 1,5 Гц наблюдается резкое возрастание тока

двигателя при кратковременном замедлении механизма, вплоть до полного стопорения, что объясняется наличием в районе указанной частоты антирезонанса. Данное явление проиллюстрировано при помощи расчетной ЛАЧХ на рис. 3, г.

Также было зафиксировано значительное повышение амплитуды колебаний всех точек элемента вблизи частот входного воздействия, равных 4 и 7 Гц, которые соответствуют расчетным резонансным частотам упругого элемента с указанными выше параметрами.

Сравнительно небольшой диапазон частот, в котором получали ЛАЧХ, обусловлен возрастанием переменной составляющей момента инерции при движении кривошипно-шатунного механизма (КШМ), который прикладывает входное воздействие к исследуемому элементу. Момент нагрузки, обусловленный наличием сил трения шатуна о направляющие, также носит пульсирующий характер, однако возможно использование при расчетах среднего значения данной величины ввиду небольшой амплитуды ее изменения по сравнению с суммарным моментом от сил трения. При работе установки воздействие переменной составляющей момента нагрузки практически полностью ком-

пенсруется системой автоматического регулирования скорости электропривода. Величина приведенного к валу электродвигателя момента инерции кривошипно-шатунного механизма изменяется в соответствии со следующей зависимостью [6]:

$$J'_M = \frac{m_B \cdot r^2}{j^2} \times \left[\sin \varphi + \frac{r}{2 \cdot l} \cdot \frac{\sin 2\varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \right]^2, \quad (3)$$

где m_B – значение движущейся массы, кг; r – радиус кривошипа, м; j – передаточное число редуктора (в рассматриваемом случае равно 1); l – длина рычага КШМ; φ – угол поворота кривошипа относительно горизонтального положения.

Очевидно, что в соответствии с выражением (3) момент инерции массы шатуна и прикрепленного к нему груза может изменяться по периодическому закону с большой амплитудой. График изменения момента инерции в зависимости от положения представлен на рис. 4.

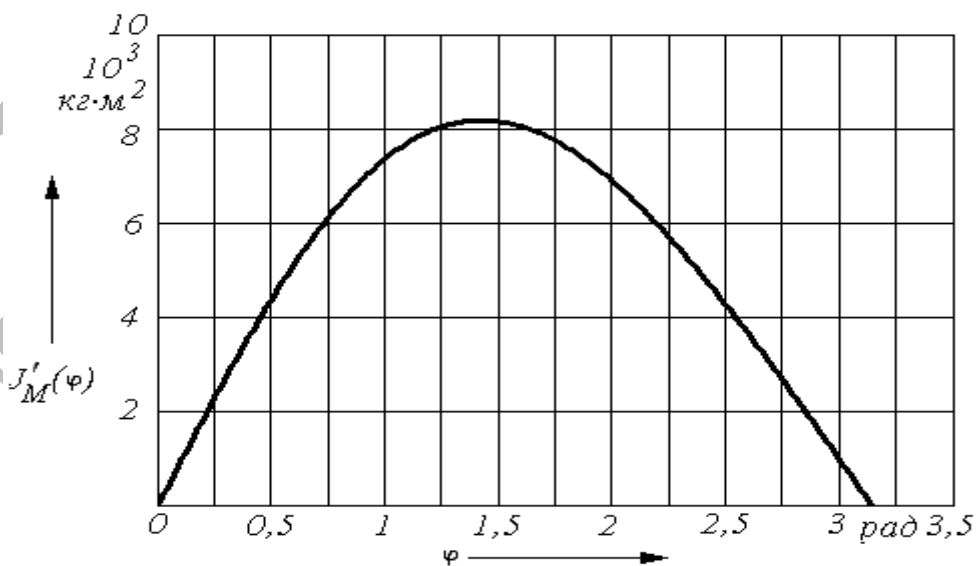


Рис. 4. Зависимость приведенного момента инерции от угла поворота кривошипа

Однако экспериментально было установлено, что по длине исследуемого упругого элемента передаются волны при минимальной скорости приводного устройства не менее 0,4 м/с, что соответствует частоте прикладываемого воздействия 0,7 Гц. Данное обстоятельство обусловлено тем, что импульс, передаваемый одним витком пружины, используемой в качестве исследуемого элемента, следующим виткам слишком мал, и вся полученная отдельным витком кинетическая энергия рассеивается при трении витка о направляющую.

Поскольку частота вращения приводного двигателя стабилизирована, скорость шатуна изменяется строго по синусоидальному закону, входное воздействие при частоте 0,7 Гц передается исследуемому элементу только тогда, когда кривошип находится в положении непосредственной близости от вертикального. Следовательно, приведенный момент инерции системы – сумма момента инерции двигателя и приведенного момента инерции кривошипа. При значении частоты входного воздействия в 1,5 Гц скорость шатуна достигает 0,4 м/с при повороте кривошипа на угол, приблизительно равный 20° относительно горизонтального положения. При этом за время прохождения кривошипом сектора, образованного углами 20 и 160° относительно горизонтального положения, приведенный момент инерции в соответствии с выражением (3) изменяется с амплитудой в 2,5 % от суммарного значения. Превышение указанного значения чрезмерно ухудшает качество регулирования скорости вращения приводного двигателя, в результате чего дальнейшее получение адекватных данных становится невозможным.

Используемая система стабилизации скорости обладает точными настройками и предназначена для поддержания скорости с точностью 0,2 % от номинального значения скорости двигателя. При достаточно большой величине колебаний момента инерции

системы возникает необходимость в постоянном изменении интегральной составляющей регулятора скорости в зависимости от положения кривошипа.

Вышеописанные обстоятельства делают невозможным исследование систем с относительно высоким значением приведенного момента инерции упругого элемента. Даже при условии разработки и создания системы автоматического регулирования (САР), позволяющей изменять настройки ПИ-регулятора в зависимости от положения кривошипа в реальном масштабе времени, колебания момента инерции повлекут за собой получение данных, не соответствующих действительности.

Выводы

1. В результате проведения серии экспериментов с различными элементами с распределенной упругостью были получены ЛАЧХ, которые достаточно точно повторяют форму расчетных характеристик, при этом резонансные частоты совпадают с рассчитанными при известном значении скорости распространения волны по исследуемому элементу. Следовательно, можно считать, что рассматриваемый упругий элемент может быть описан системой уравнений в частных производных для линейного элемента с распределенной упругостью [1].

2. Полученные экспериментальным путем ЛАЧХ упругих элементов соответствуют расчетным, значит, предложенная математическая модель упругого элемента обладает теми же частотными свойствами, что и реальный объект. Следовательно, математическое описание линейного элемента с распределенными параметрами пригодно для моделирования в MATLAB Simulink.

3. Поскольку использованная для проведения лабораторных исследований модель электропривода с протяженным упругим элементом является

нелинейной, а также ввиду высокого коэффициента трения о направляющие, для проведения дальнейших исследований целесообразно создать другой вариант лабораторной установки, в котором будут устранены указанные недостатки. Предполагается исследование и апробация замкнутых систем управления, предназначенных для демпфирования колебаний в механической части электропривода. Компенсация нелинейности системы за счет звеньев САУ приведет к чрезмерному усложнению средств

управления, а также сделает невозможным получение адекватных данных об устойчивости системы и работе корректирующих устройств. В связи с этим обстоятельством целесообразно изменить способ приложения входного воздействия к упругому элементу таким образом, чтобы представилось возможным построение линейной математической модели исследуемой системы в математическом пакете MATLAB Simulink.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рассудов, Л. Н.** Электроприводы с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мядзель. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1987. – 144 с.
2. **Кольцов, С. В.** Последовательно-параллельная коррекция систем управления электроприводами с подчиненным регулированием параметров и упругими связями // С. В. Кольцов, О. В. Концевенко, К. В. Овсянников // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 3. – С. 113–118.
3. **Вишнеревский, В. Т.** Создание лабораторного оборудования для проведения верификации математического описания элементов с распределенной упругостью / В. Т. Вишнеревский, Г. С. Ленеvский // Авиациостроение и транспорт Сибири : сб. II Всероссийской науч.-практ. конф., приуроченной ко Дню космонавтики, Иркутск, 11–13 апр. 2012 г. – Иркутск, 2012. – С. 187–190.
4. **Вишнеревский, В. Т.** Верификация математического описания элементов с распределенной упругостью / В. Т. Вишнеревский, Г. С. Ленеvский // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 15–18.
5. **Анхимюк, В. Л.** Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
6. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.
7. **Вишнеревский, В. Т.** Аппроксимация передаточных функций звеньев электромеханических систем с распределенными параметрами / В. Т. Вишнеревский // Ползуновский вестн. – 2011. – № 2/1. – С. 57–61.

Статья сдана в редакцию 26 октября 2013 года

Владимир Тадеушевич Вишнеревский, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: 375-295-45-19-54.

Игорь Сергеевич Стасенко, ассистент-стажер, Белорусско-Российский университет. Тел.: 375-447-14-39-66.

Геннадий Сергеевич Ленеvский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-31-14-44.

Алексей Анатольевич Корнеев, студент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-336-29-53-69.

Vladimir Tadeushevich Vishnerevsky, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-295-45-19-54.

Igor Sergeevich Stasenko, intern assistant lecturer-intern, Belarusian-Russian University. Phone: +375-447-14-39-66.

Gennady Sergeevich Lenevsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-31-14-44.

Aleksey Anatolyevich Korneyev, student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-336-29-53-69.