ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 62-83

В. Т. Вишнеревский, И. С. Стасенко, Г. С. Леневский, А. В. Лекарева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕМЕНТ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЕ

UDC 62-83

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

SIMULATION OF ELECTRIC DRIVES CONTAINING A LINEAR ELEMENT WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN THE MECHANICAL SUBSYSTEM

Аннотация

Рассматриваются вопросы математического и натурного моделирования электроприводов, содержащих линейный элемент с распределенными параметрами. Для синтеза более совершенных систем управления электроприводом с распределенными параметрами разработана математическая модель, учитывающая колебательные свойства механической части и ее влияние на электрическую часть системы, позволяющая моделировать в среде Matlab электромеханические системы с учетом любого количества резонансных частот в механической подсистеме. Адекватность модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова:

электропривод, распределенные параметры, моделирование.

Abstract

Mathematical and full-scale modeling of electric drives containing a linear element with distributed parameters is considered. For the synthesis of more sophisticated systems to control the electric drive with distributed parameters, the mathematical model has been developed that takes into account vibrational properties of the mechanical part, as well as its effect on the electrical part of the system and allows modeling electromechanical systems in the Matlab environment, taking into consideration any number of resonant frequencies in the mechanical subsystem. The adequacy of the model is confirmed by experimental studies.

Key words:

electric drive, distributed parameters, simulation.

Механическая подсистема электропривода с распределенными параметрами является сложным объектом с точки зрения теории автоматического управления. Для данного объекта характерны явно выраженные колебательные свойства наряду с запаздыванием распространения прикладываемого воздействия. Особенность систем электропривода с распределенными параметрами – отсутствие возможности составления их адекватной математической модели с помощью широко распространенных расчетных схем электропривода с двумя либо тремя массами. Разбиение протяженных упругих элементов на большое количество сосредоточенных масс приводит к неоправданному усложнению

© Вишнеревский В. Т., Стасенко И. С., Леневский Г. С., Лекарева А. В., 2015

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

их математического описания. В представленной работе рассматриваются линейные элементы с распределенными параметрами, которые можно выделить в механической части электроприводов шахтных грузоподъемных установок. При синтезе систем управления электроприводами таких установок приходится решать задачу устранения возникающих при пуске колебаний с достижением максимального быстродействия установки. Возникающие колебания являются опасными для оборудования и обслуживающего персонала, поскольку приводят к преждевременному износу тросов и могут стать причиной возникновения аварийных ситуаций и выхода оборудования из строя [1]. Существующие способы формирования процесса пуска указанных установок, основанные на плавном повышении задающего воздействия, в настоящее время следует признать устаревшими. В связи с развитием микропроцессорных средств стало возможным применение более совершенных систем управления, синтез которых подразумевает наличие математической модели, адекватной объекту управления в достаточной для проведения компьютерного моделирования степени.

Математическое описание элементов систем с распределенными параметрами (бесконечномерных систем, систем с бесконечным числом масс) [2] подразумевает использование систем уравнений в частных производных. На основании ранее проведенных исследований, направленных на выбор подходящего способа аппроксимации бесконечномерных выражений передаточных функций, которые описывают поведение различных элементов с распределенными параметрами, был выбран способ, заключающийся в разложении исходной передаточной функции на простейшие дроби. Также были проведены исследования, подтвердившие достаточно высокую точность аппроксимации, выполненной данным способом [3].

Таким образом, благодаря наличию указанного математического описания создается возможность учитывать любое количество резонансных частот объекта управления. Поскольку рабочий диапазон электроприводов, как правило, лежит в диапазоне до 10 Гц [2], в [3] были даны рекомендации по выбору числа учитываемых резонансных частот.

Для того чтобы проводить полноценный анализ системы электропривода, в том числе оценку влияния механической подсистемы на электрическую, необходимо располагать структурой математической модели, в которой присутствует четкое разделение на электрическую и механическую части. Так как в электроприводе шахтных грузоподъемных установок традиционно используются двигатели постоянного тока с независимым возбуждением [2], то целесообразно применять линеаризованную модель двигателя, входной величиной для которой является напряжение якорной цепи, а выходной – электромагнитный момент [4]. В такой модели учитывается обратная связь по противо-ЭДС двигателя, которая зависит от скорости вращения его вала. В качестве механической подсистемы в данном случае может служить одно-, двух- или трехмассовая расчетная схема [5]. Входной величиной для всех расчетных схем является момент на валу двигателя, а выходной величиной – угловая скорость вращения. Угловая скорость первой массы каждой из расчетных схем используется для реализации обратной связи по противо-ЭДС приводного двигателя.

В свою очередь, передаточные функции элементов с распределенными параметрами могут быть сведены к одномассовой расчетной схеме путем предельного перехода при значении жесткости, стремящемся к бесконечности. На основании изложенного можно сделать вывод, что аппроксимированные передаточные функции линейного эле-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

мента с распределенными параметрами [3] могут быть пригодны для совместного использования с моделью двигателя постоянного тока только после коэффициентного преобразования входных и выходных величин.

Поскольку при выводе передаточной функции [2] производится переход к безразмерным величинам, то для получения входного воздействия для подсистемы линейного элемента с распределенными параметрами значение электромагнитного момента должно быть преобразовано путем умножения последнего на передаточное число редуктора и деления на радиус приводного барабана, суммарную массу упругого элемента и квадрат скорости распространения волны упругой продольной деформации. Очевидно, что значение линейной скорости для перехода к угловой необходимо умножить на значение скорости распространения волны и передаточное число редуктора, а это произведение разделить на радиус приводного барабана.

На основании системы дифференциальных уравнений, представленной в [6], с учетом использования аппроксимированной передаточной функции от усилия к скорости линейного элемента с распределенными параметрами можно получить структурную схему математической модели исследуемой электромеханической системы (рис. 1).

На представленной структурной схеме (см. рис. 1) приняты следующие обозначения: $W_{ТП}$ – передаточная функция транзисторного преобразователя; $R_Я$ – сопротивление якорной цепи приводного электродвигателя постоянного тока; $T_Я$ – электрическая постоянная времени приводного электродвигателя; C_M – конструктивный коэффициент двигателя постоянного тока; i – передаточное число редуктора; R – радиус приводного шкива; l – длина распределенно-упругого элемента; m_Σ – суммарная приведенная масса линейного элемента с распределенными параметрами; a – скорость распространения волны упругой продольной деформации по упругому элементу; $W_{РП0}$ – передаточная функция линейного элемента с распределенными параметрами в точке крепления первой массы; $W_{РП1}$ – передаточная функция линейного элемента с распределенными параметрами в точке крепления второй массы; $W_{РПS}$ – передаточная функция линейного элемента с распределенными параметрами в сечении S указанного элемента.

Кроме того, представлены изображения по Лапласу следующих величин: $U_З(p)$ – сигнал задания для транзисторного преобразователя; $U_{ТП}(p)$ – выходное напряжение транзисторного преобразователя; $E(p)$ – противо-ЭДС двигателя постоянного тока; $I_Я(p)$ – ток якоря двигателя постоянного тока; $M_Д(p)$ – момент на валу приводного двигателя; $F(p)$ – усилие, прикладываемое к распределенно-упругому элементу; $\varphi(p)$ – нормированное входное усилие для передаточной функции линейного элемента с распределенными параметрами; $V_0(p)$, $V_s(p)$, $V_1(p)$ – нормированные значения скорости в точке крепления первой массы, в сечении S распределенно-упругого элемента и в точке крепления второй массы соответственно; $\upsilon_0(p)$, $\upsilon_s(p)$, $\upsilon_1(p)$ – значения линейной скорости в точке крепления первой массы, в сечении S распределенно-упругого элемента и в точке крепления второй массы соответственно; $\omega_0(p)$, $\omega_s(p)$, $\omega_1(p)$ – значения угловой скорости в точке крепления первой массы, в сечении S распределенно-упругого элемента и в точке крепления второй массы соответственно.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

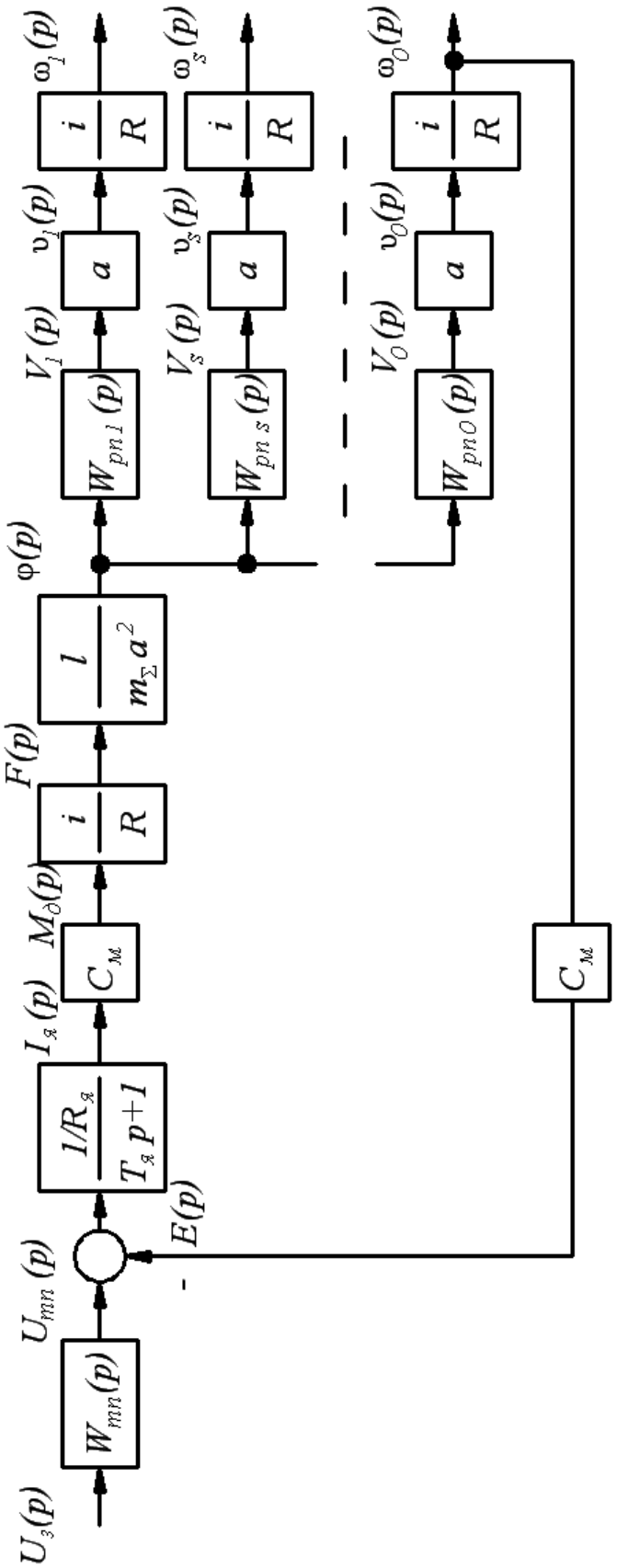

Рис. 1. Структурная схема модели электромеханической системы с распределенными параметрами

При нормировании величин применяются следующие соотношения [7]:

$$\varphi(p) = F / F_{\Sigma}; \quad (1)$$

$$F_{\Sigma} = \frac{m_{\Sigma} \cdot a^2}{l}; \quad (2)$$

$$V = \upsilon / a. \quad (3)$$

Как видно из рис. 1, для осуществления обратной связи по противо-ЭДС двигателя используется выходное значение передаточной функции в точке крепления первой массы. Считается, что первая масса жестко соединена с валом приводного двигателя. Передаточные функции $W_{РП1}$, $W_{РПS}$ применяются для вычисления мгновенных значений скорости в различных сечениях распределенно-упругого элемента. Данные значения могут быть использованы напрямую или после дифференцирования в качестве сигналов обратных связей для системы автоматического управления. Возможность получения при моделировании мгновенного значения скорости или ускорения делает представленную модель пригодной для синтеза и исследования наблюдателей состояния в системах управления электроприводами шахтных грузоподъемных установок.

Следует отметить, что представленная на рис. 1 структурная схема предназначена для моделирования процесса пуска статически уравновешенной подъемной установки [7]. При синтезе систем управления электроприводами с распределенными параметрами в данной работе рассматриваются только динамические нагрузки, величина которых значительно превышает величину статических нагрузок, вызванных силами трения в механизмах. При проведении моделирования переходные процессы рассматриваются до момента выхода на установившееся значение. Считается, что время переходного процесса пуска мало́ по сравнению со временем цикла подъема. Поэтому длина подъемных тросов и масса поднимаемого груза остаются неизменными за время пуска установки.

Важной особенностью представленной структурной схемы является возможность измерения мгновенных значений величин скорости и ускорения в любой точке элемента с распределенными параметрами, что в будущем позволит исследовать системы управления с дополнительными обратными связями.

Все параметры представленной модели можно получить расчетным путем, кроме скорости распространения волны упругой продольной деформации – значение этой величины в лабораторных условиях было определено следующим образом: к приводному двигателю было приложено импульсное входное воздействие, после чего было измерено время отклика массы, закрепленной на противоположном конце элемента с распределенными параметрами.

Для математического моделирования исследуемой электромеханической системы были использованы значения параметров специализированной лабораторной установки, разработанной на кафедре «Электропривод и АПУ» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», предназначенной для экспериментального получения частотных характеристик электромеханической системы с распределенными параметрами, а также для исследования переходных процессов в такой системе. При работе лабораторной установки моделируется процесс пуска шахтной грузоподъемной установки. Параметры пружины, используемой в качестве элемента с распределенными параметрами, подобраны таким образом, что в диапазоне входных воздействий до 10 Гц присутствуют четыре резонансные частоты.

Проведение экспериментальных исследований подразумевает получение частотных характеристик в диапазоне до 10 Гц, в качестве приводного двигателя выбран малоинерционный двигатель постоянного тока ПЯ250Ф. В качестве си-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

лового преобразователя используется широтно-импульсный преобразователь. Его несущая частота составляет 7800 Гц, поэтому передаточная функция преобразователя при проведении математического моделирования представлена пропорциональным звеном.

Для проведения компьютерного моделирования вычислены параметры аппроксимированной модели линейного элемента с распределенными параметрами. В соответствии с выражением передаточной функции [3], с учетом коэффициентов диссипации колебаний, которые были определены экспериментальным путем [8], получена подсистема модели линейного элемента с распределенными параметрами. Значения полюсов и вычетов передаточной функции линейного элемента с распределенными параметрами от усилия к скорости в точке подвеса поднимаемого груза сведены в табл. 1.

На рис. 2 представлен процесс реакции на импульсное входное воздействие звена, которое характеризуется передаточной функцией элемента с распределенными параметрами. Представленный график получен с помощью математического пакета Mathcad.

На рис. 3 представлена модель электромеханической системы с распределенными параметрами в MatlabSimulink.

На рис. 4 представлена подсистема модели линейного элемента с распределенными параметрами в MatlabSimulink. При использовании предложенного способа аппроксимации передаточной функции коэффициенты диссипации колебаний учитываются путем прибавления к оператору Лапласа s значения коэффициента диссипации в каждом конкретном полюсе [3].

Графики переходных процессов силы тока якоря приводного двигателя и скорости поднимаемого груза представлены на рис. 5.

Табл. 1. Значения полюсов и вычетов передаточной функции линейного элемента с распределенными параметрами от усилия к скорости в точке подвеса поднимаемого груза

Значение полюса	Значение вычета	Значение полюса	Значение вычета
0,9118	–0,5639	12,5142	–0,0069
3,3765	0,0872	15,6104	0,0045
6,3628	–0,0262	18,7112	–0,0031
9,4273	0,0121	21,8149	0,0023

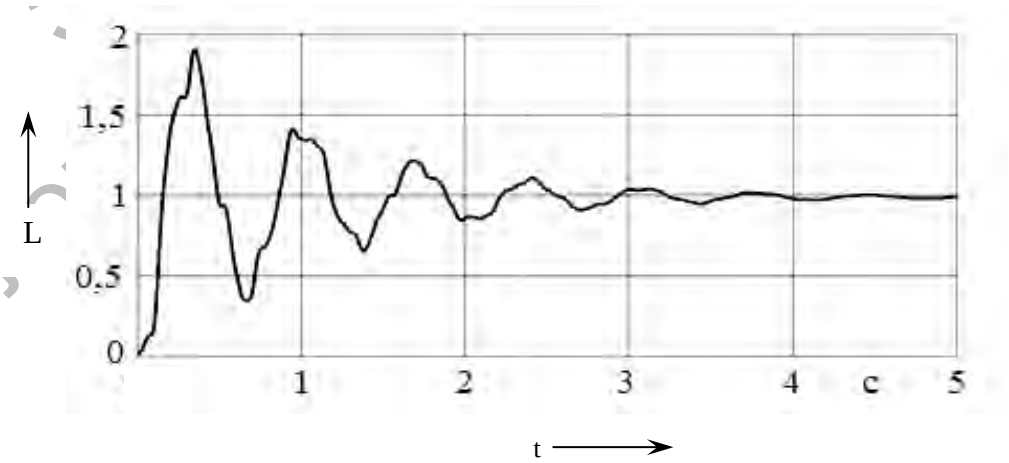

Рис. 2. График переходного процесса в результате реакции на импульсное воздействие

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

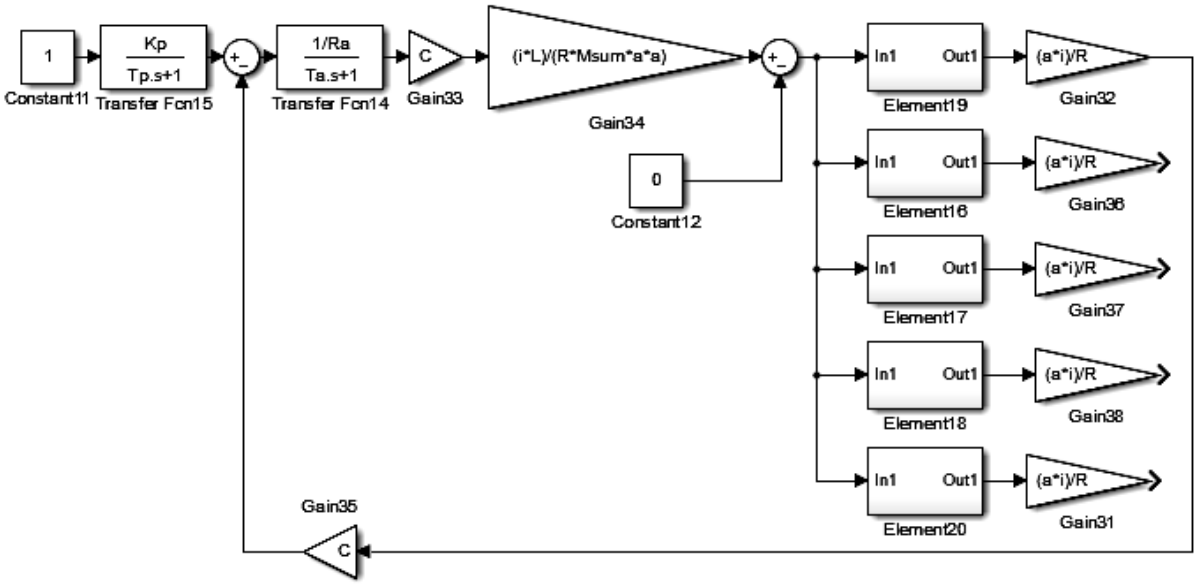

Рис. 3. Модель системы с распределенными параметрами

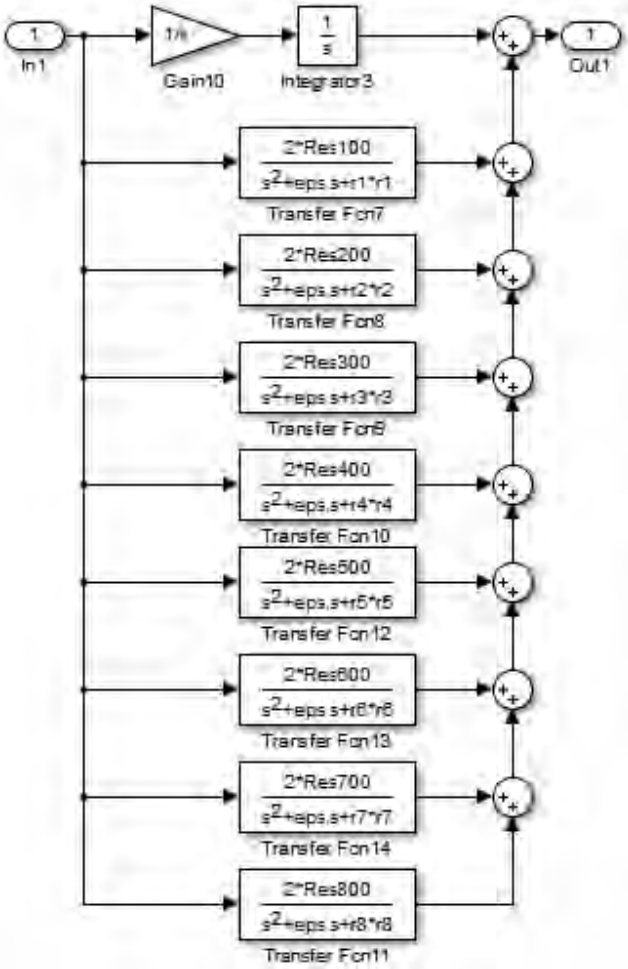

Рис. 4. Подсистема модели линейного элемента с распределенными параметрами в MatlabSimulink

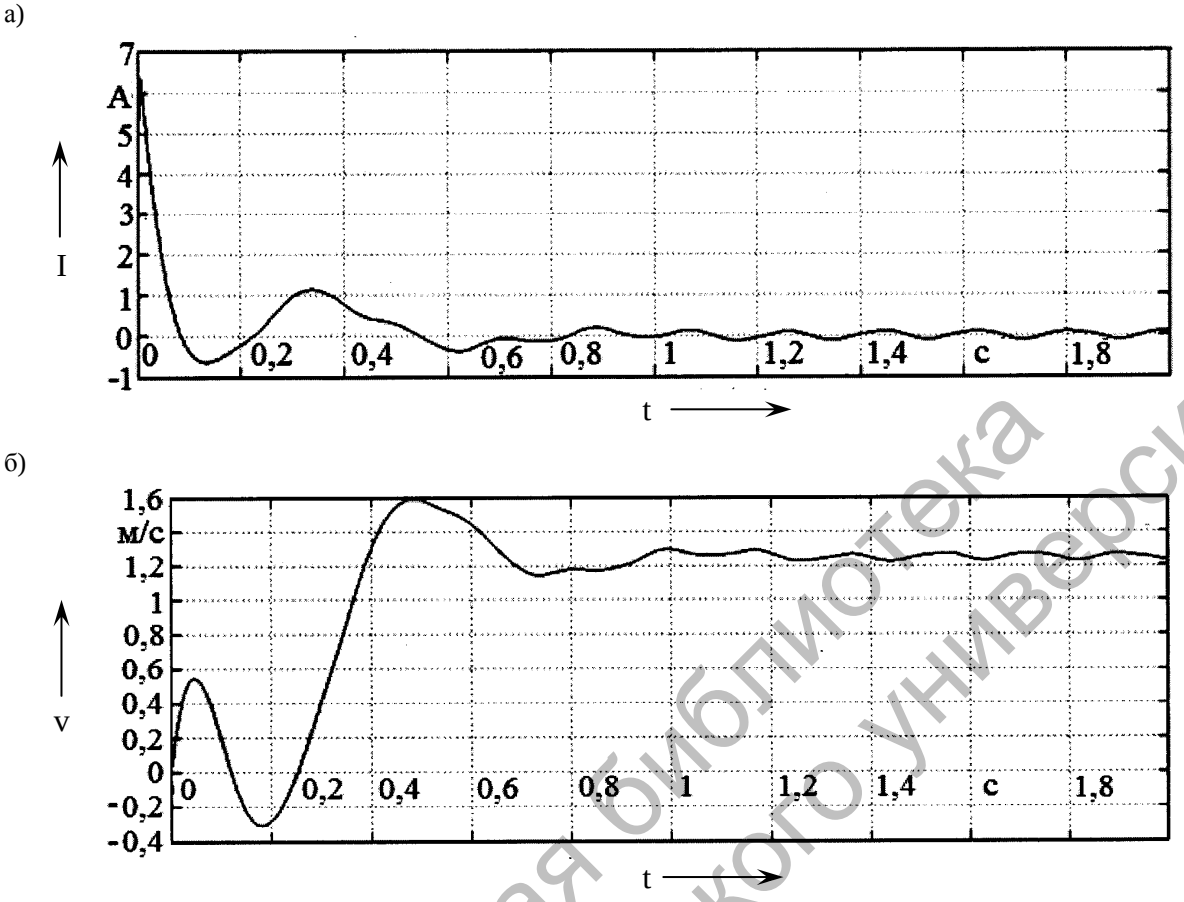

Рис. 5. Графики переходных процессов силы тока якоря приводного двигателя и скорости поднимаемого груза

Согласно графикам, представленным на рис. 5, в конце переходного процесса величина скорости находится около заданного значения, а величина тока – вблизи нулевого значения вследствие отсутствия статической нагрузки. Следовательно, можно сделать вывод о корректности работы математической модели.

Колебания величин тока и скорости происходят на частотах, которые соответствуют резонансным частотам входящего в состав установки элемента с распределенными параметрами.

Выводы

1. В настоящее время для моделирования и анализа систем электропривода с упругими связями широко используется математическое описание, которое предусматривает разбиение механической подсистемы на определенное количество сосредоточенных масс, соединенных упругими звеньями. Однако в тех случаях, когда упругие элементы обладают большой длиной и массой, соизмеримой с массой исполнительного органа и перемещаемого груза, необходимым становится применение математических моделей с учетом распределенности параметров. Существующее математическое описание систем электропривода с распределенными параметрами не является практичным для использования в современных математических пакетах. Поэтому возникла необходимость создания более совершенной структуры математической модели, пригодной для проведения анализа и синтеза систем управления элек-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

троприводами.

2. Предложенная авторами структурная схема может быть применена для проведения дальнейших исследований, направленных на разработку более совершенных способов построения систем управления электроприводами, в том числе с использованием наблюдателей состояния. С помощью представленной модели возможно получение графиков переходных процессов величин скорости и ускорения в любой точке линейного элемента с распределенными параметрами.

3. По результатам моделирования подтверждена корректность работы математической модели. Установлено, что переходные процессы всех выходных величин завершаются выходом на установившееся значение. В результате реакции на ступенчатое воздействие возникают колебания, которые соответствуют резонансным частотам передаточной функции элемента с распределенными параметрами. Экспериментальные исследования по проверке адекватности будут производиться путем сопоставления частотных характеристик, полученных с помощью модели, и экспериментальным путем на лабораторной установке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Католиков, В. Е.** Динамические режимы рудничного подъема / В. Е. Католиков, А. Д. Дикель. – М. : Недра, 1995. – 448 с. : ил.

2. **Рассудов, Л. Н.** Электроприводы с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мядзель. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.

3. **Вишнеревский, В. Т.** Аппроксимация передаточных функций звеньев электромеханических систем с распределенными параметрами // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 57–61.

4. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 527 с.

5. **Ключев, В. И.** Теория электропривода : учебник для вузов / В. И. Клюев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с. : ил.

6. **Киселев, Н. В.** Электроприводы с распределенными параметрами / Н. В. Киселев, В. Н. Мядзель, Л. Н. Рассудов. – Л. : Судостроение, 1985. – 220 с. : ил.

7. **Степанов, А. Г.** Динамика шахтных подъемных установок / А. Г. Степанов. – Пермь : УрОРАН, 1994. – 203 с.

8. **Вишнеревский, В. Т.** Экспериментальное исследование частотных свойств механических элементов с распределенными параметрами / В. Т. Вишнеревский, И. С. Стасенко, Г. С. Леневский // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2. – С. 23–32.

Статья сдана в редакцию 4 марта 2015 года

Владимир Тадеушевич Вишнеревский, аспирант, Белорусско-Российский университет. E-mail: Vishnerevsky@mail.ru.
Игорь Сергеевич Стасенко, аспирант, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-44-714-39-66.
Геннадий Сергеевич Леневский, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-31-14-44.
Анастасия Владимировна Лекарева, аспирант, Владимирский государственный университет.

Vladimir Tadeushevich Vishnerevsky, PhD student, Belarusian-Russian University. E-mail: Vishnerevsky@mail.ru.
Igor Sergeyevich Stasenko, PhD student, Belarusian-Russian University. Phone: +375-44-714-39-66.
Gennady Sergeyevich Lenevsky, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-31-14-44.
Anastasiya Vladimirovna Lekareva, PhD student, Vladimir State University.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета