

**Исследование различных подходов к управлению двухмассовыми объектами****М. П. Белов<sup>1</sup>, Н. С. Благодарный<sup>2</sup>, О. А. Кундюков<sup>1</sup>✉, К. К. Ершов<sup>2</sup>, А. А. Наумов<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербург, Россия

✉ kundyukov94@mail.ru

**Аннотация.** Рассмотрены причины возникновения упругих колебаний в механизмах многомассовых объектов. Приведен анализ различных систем управления сложными двухмассовыми объектами. Приводится математическое описание двухмассовой системы, взаимосвязанной через упругий приводной ремень. По приведенной системе уравнений построена структурная схема рассматриваемого объекта в математической среде MatLab and Simulink. Проведены синтез и сравнительный анализ следующих систем управления двухмассовым объектом: подчиненного регулирования с внешней обратной связью по скорости первой массы; многоконтурного подчиненного регулирования; модального управления; подчиненного регулирования с применением корректирующего коэффициента и нейроконтроллера с эталонной моделью. Приведены и проанализированы полученные графики переходных процессов по моменту и скорости ведомого шкива рассматриваемой двухмассовой системы с упругим замещающимся ремнем. Результаты моделирования показали, что системы управления с модальным регулятором и нейроконтроллером показывают хорошие результаты для гашения упругих колебаний двухмассовой системы по сравнению с другими рассмотренными системами управления.

**Ключевые слова:** двухмассовая система, упругий приводной ремень, упругие колебания, подчиненное регулирование, модальный регулятор, нейрорегулятор

**Для цитирования:** Исследование различных подходов к управлению двухмассовыми объектами / М. П. Белов, Н. С. Благодарный, О. А. Кундюков, К. К. Ершов, А. А. Наумов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 7. С. 76–87. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-76-87.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

**Research of Different Approaches to Control of Two-Mass Objects****M. P. Belov<sup>1</sup>, N. S. Blagodarny<sup>2</sup>, O. A. Kundyukov<sup>1</sup>✉, K. K. Ershov<sup>2</sup>, A. A. Naumov<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia<sup>2</sup> Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg, Russia

✉ kundyukov94@mail.ru

**Abstract.** The reasons for elastic oscillations occurring in the mechanisms of multi-mass objects are considered. Various control systems for complex two-mass objects are analyzed. A mathematical description of a two-mass system interconnected through an elastic drive belt is provided. According to the given system of equa-

tions, a block diagram of the object under consideration has been constructed in the mathematical environment of MatLab and Simulink. The synthesis and comparative analysis is conducted for the following control systems for a two-mass object: slave control with external feedback on the speed of the first mass; multiloop slave regulation; modal control; subordinate regulation using a correction factor and a neurocontroller with a reference model. The resulting graphs of transient processes in terms of moment and speed of the driven pulley of the considered two-mass system with an elastic replacement belt are presented and analyzed. The simulation results have shown that control systems with a modal controller and a neurocontroller show good results in the problem of damping elastic vibrations of a two-mass system in comparison with other considered control systems.

**Keywords:** two-mass system, elastic drive belt, elastic vibrations, slave regulation, modal regulator, neuroregulator

**For citation:** Research of Different Approaches to Control of Two-Mass Objects / M. P. Belov, N. S. Blagodarny, O. A. Kundyukov, K. K. Ershov, A. A. Naumov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 7. P. 76–87. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-76-87.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Система управления электроприводом формирует управляющие воздействия на двигатель, обеспечивающие необходимое по технологическим или технико-экономическим требованиям движение рабочего органа механизма. К таким требованиям можно отнести точность поддержания или регулирования координат электропривода, их перерегулирование, быстродействие, плавность движения и др.

При рассмотрении автоматизированных систем управления электроприводами часто предполагается, что кинематическая связь между двигателем и исполнительным органом не подвержена упругим деформациям. Во многих случаях идеализация, основанная на представлении о жесткой связи двигателя и исполнительного органа, допустима. Это определяется тем, что частота собственных упругих колебаний механизма оказывается значительно выше частоты, определяющей быстродействие автоматизированной системы управления электроприводом. В случае высокого быстродействия этой системы может произойти резкое увеличение амплитуды колебаний скорости, момента и тока электродвигателя [1].

Упругие колебания могут быть вызваны тем, что кинематическая схема механизма содержит упругие элементы, кроме этого приходится учитывать нелинейности, обусловленные люфтами в передачах с зубчатыми колесами, муфтах сцепления, а также ограничениями момента и тока электрической машины.

Упругие колебания приводят к увеличению динамических нагрузок на привод, появлению вибрации, ухудшению точности и снижению быстродействия. Существуют различные способы компенсации упругих колебаний. Рассмотрим некоторые из них.

В статье [2] проведен синтез системы управления приводом продольной подачи токарного станка с упругими связями с применением нестандартного задатчика интенсивности, позволяющего задавать угловое ускорение объекта, угловую скорость и время, в течение которого привод будет вращаться с заданной скоростью. Разработанная модель с задатчиком интенсивности обеспечивает высокие динамические характеристики привода подачи токарного станка по управлению.

В [3] синтезировано управление электроприводом подачи с помощью метода обобщенного нейрорегулирования с прогнозированием. Для поиска оптимальных параметров нейроконтроллера с предсказанием (Neural Network Predictive Control, NNPC) проведены несколько вариантов синтеза контроллера с различными значениями. Полученные результаты говорят о возможности применения алгоритма обобщенного управления с предсказанием при использовании многослойной нейронной сети для эффективного управления нелинейными объектами.

В [4] рассматриваются привод подачи с упругими связями и его управление с помощью нейрорегулятора NARMA-L2 Controller. Приводятся процедура синтеза нейроконтроллера и графики переходных процессов модели объекта по скорости второй массы при различных параметрах настройки контроллера. Представлен сравнительный анализ показателей качества обучения нейросетевого регулятора NARMA-L2 Controller при различных алгоритмах обучения. Исследование показало, что алгоритм Левенберга–Марквардта наиболее эффективен для обучения данного нейросетевого регулятора.

В [5] рассматривается применение линейно-квадратичного гауссовского (LQG) регулятора для

управления электроприводом крупного радиотелескопа. Согласно полученным результатам такой регулятор эффективно гасит колебания, возникающие из-за нежесткого характера кинематических передач. При условии применения фильтра Калмана, этот регулятор позволяет улучшить работу системы при случайных возмущающих воздействиях.

В [6] используется дискретный линейно-квадратичный регулятор с наблюдателем на основе фильтра Калмана для управления электроприводом опорно-поворотного устройства оптико-механического комплекса типа «Сажень-Т». Полученные результаты показывают, что линейно-квадратичный регулятор обеспечивает высокое качество управления при наличии упругих свойств и внешних возмущений. Однако предложенный авторами регулятор не обладает интегральным действием и для устранения внешних возмущений необходимо вводить компенсационную связь по моменту сопротивления.

В [7] рассматривается применение нечеткого регулятора для управления положением следящей системы опорно-поворотных устройств с нежесткими связями. Внутренние контуры скорости и тока при этом настраиваются в соответствии с принципами подчиненного управления. В фаззи-регуляторе использован алгоритм Мамдани, его настройка проведена с учетом условия получения минимальной ошибки регулирования. Авторы утверждают, что использование нечеткого регулятора позволяет погасить упругие колебания и повысить точность работы системы. Однако в системе присутствует постоянная ошибка слежения.

К классическим способам управления объектами относятся способы подчиненного, модального,

векторного и адаптивного управления, которые позволяют формировать высокие динамические и регулировочные свойства электропривода.

Целью данной статьи служит исследование различных подходов к управлению параметрами двухмассовых объектов.

В качестве примера рассматривается двухмассовая система, взаимосвязанная через упругий приводной ремень, структурная схема которой приведена на рис. 1.

На рисунке приняты следующие обозначения:  $L$  – длина свободного пробега ведущей ветви ремня,  $m$ ;  $K$  – коэффициент жесткости ремня,  $\text{Н/м}^2$ ;  $w_1, w_2$  – угловые скорости ведущего и ведомого шкивов,  $\text{рад/с}$ ;  $M_1$  – момент ведущего шкива,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_{c1}$  – момент сопротивления двигателя, обусловленный трением в подшипниках,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_{c2}$  – статический момент, обусловленный нагрузкой на второй инерционной массе,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_{y1}, M_{y2}$  – моменты упругого взаимодействия ведущего и ведомого шкивов,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $v_1, v_2$  – линейные скорости ведущего и ведомого шкивов,  $\text{м/с}$ ;  $R_1, R_2$  – радиусы ведущего и ведомого шкивов,  $\text{м}$ ;  $J_1$  – суммарный момент инерции двигателя и ведущего шкива,  $\text{кг/м}^2$ ;  $J_2$  – суммарный момент инерции ведомого шкива и моментов инерции заготовки и патрона, приведенных к валу ведомого шкива,  $\text{кг/м}^2$ ;

Математическое описание двухмассовой системы с упругостью второго рода описывается следующей системой уравнений [8]:

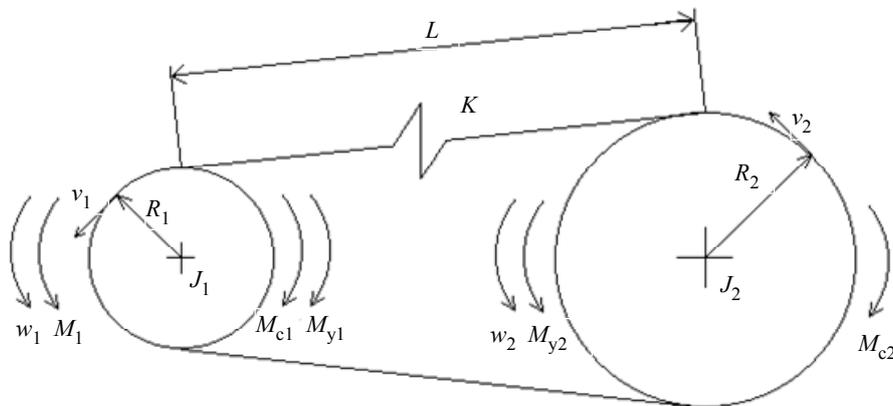


Рис. 1. Структурная схема двухмассовой системы  
Fig. 1. Structural diagram of the object under study

$$M_1 - M_{y1} = J_1 \frac{dw_1}{dt};$$

$$M_{y1} = \varepsilon KR_1;$$

$$M_{y2} - M_{c2} = J_2 \frac{dw_2}{dt};$$

$$M_{y2} = \varepsilon KR_2;$$

$$\varepsilon = \frac{v_1 - v_2}{v_1} \frac{1}{T_p p + 1};$$

$$T_p = \frac{L}{v_1},$$

где  $t$  – время, с;  $\varepsilon$  – относительное удлинение ремня;  $T_p$  – постоянная времени ремня. Система уравнений построена без учета момента сопротивления сил трения в подшипниках  $\varepsilon$ .

На рис. 2 приведена структурная схема рассматриваемого объекта, построенная по данной системе уравнений.

В качестве примера рассматриваемого объекта взята ременная передача привода главного движения патронно-центрового станка 16А20Ф3 с электродвигателем АДЧР160М4, имеющим следующие параметры: угловая номинальная скорость двигателя  $w_1 = 153$  рад/с; номинальный момент  $M_H = 73$  Н · м; тактовая частота полупроводникового преобразователя (ПП) принята равной 10 кГц; момент инерции двигателя  $J = 0.045$  кг · м<sup>2</sup>; суммарный момент инерции двигателя и ведущего шкива  $J_1 = 0.045 + 0.005 = 0.05$  кг · м<sup>2</sup>; суммарный момент инерции ведомого шкива и моментов инерции заготовки и патрона, приведен-

ных к валу ведомого шкива,  $J_2 = 0.04$  кг · м<sup>2</sup>;  $R_1 = R_2 = 0.05$  м – радиусы ведущего и ведомого шкивов; постоянная времени ремня взята усредненной:  $T_p = 0.2$  с; коэффициент жесткости ремня  $K = 60\,000$  Н/м;  $v_1 = v_2 = wR_1 = 153 \cdot 0.05 = 7.65$  м/с – линейные скорости ведущего и ведомого шкивов.

**Синтез системы подчиненного регулирования двухмассовым объектом с внешней обратной связью по скорости первой массы.** Для синтеза системы подчиненного регулирования необходимо рассчитать и настроить регуляторы тока, момента и скорости. Контуры можно рассчитывать по методике, изложенной в [9].

Контур момента (блок КМ на рис. 3) в данной публикации упрощен до апериодического звена первого порядка с коэффициентом усиления  $K_{KM} = 1$  и постоянной времени, равной четырем малым некомпенсируемым постоянным времени полупроводникового преобразователя  $T_{KM} = 4T_{ПП} = 0.0004$  с.

ПИ-регулятор контура скорости (блок РС на рис. 3) настроен на симметричный оптимум с коэффициентом усиления  $K_{pw}$  и постоянной времени  $T_{pw}$ , рассчитанными по формулам

$$K_{pw} = \frac{J_1}{2(4T_{ПП})};$$

$$T_{pw} = 4T_{KM}.$$

В данном случае  $K_{pw} = 62.5$  – коэффициент усиления регулятора скорости;  $T_{pw} = 0.0016$  с – постоянная времени.

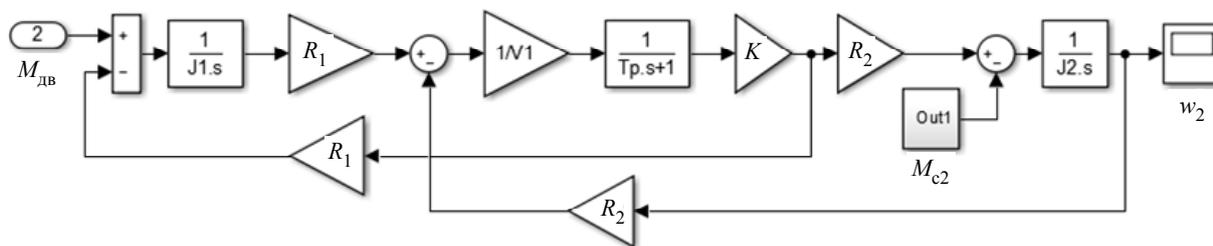


Рис. 2. Структурная схема рассматриваемого объекта  
Fig. 2. Block diagram of the object under study

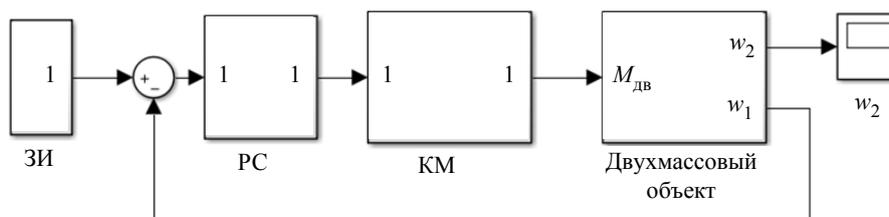


Рис. 3. Структурная схема двухмассовой системы с контурами тока, момента и скорости

Fig. 3. Block diagram of a two-mass system with current, torque, and speed circuits

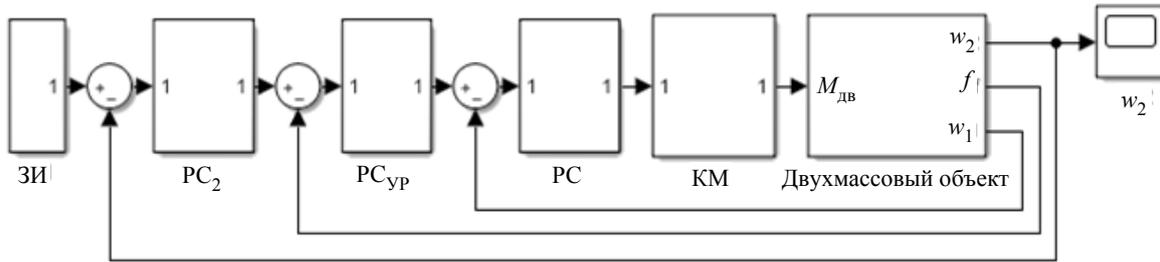


Рис. 4. Структурная схема многоконтурной системы управления с подчиненным регулированием  
Fig. 4. Block diagram of a multiloop control system with subordinate regulation

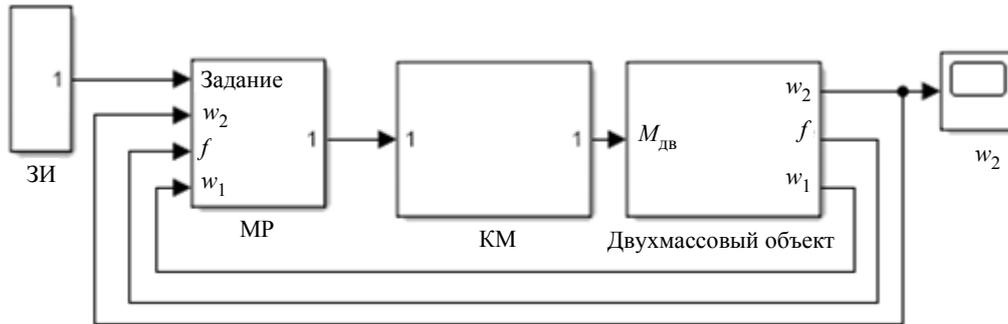


Рис. 5. Структурная схема управления скоростью ведомого шкива с модальным регулятором  
Fig. 5. Block diagram of driven pulley speed control with modal controller

В данной статье используется линейный датчик интенсивности (ЗИ на рис. 3).

В качестве двухмассового объекта применяется структурная схема, приведенная на рис. 2.

Структурная схема системы подчиненного регулирования двухмассовым объектом с внешней обратной связью по скорости первой массы приведена на рис. 3, где  $M_{дв}$  – момент двигателя.

**Синтез системы многоконтурного подчиненного регулирования двухмассовым объектом.** Для лучшей компенсации упругих колебаний целесообразно построить дополнительные контуры регулирования. К показанным на рис. 3 контурам тока двигателя и скорости первой массы добавляются контур силы упругого растяжения и контур скорости второй массы. Последний – это внешний контур, и его регулятор настраивается на симметричный оптимум. Остальные регуляторы – внутренние и настраиваются на модульный оптимум. Наличие внутренних обратных связей объекта не учитывается при настройке регуляторов. В результате получим структурную схему, изображенную на рис. 4.

Блоки  $PC_2$  и  $PC_{ур}$  содержат в себе регуляторы скорости второй массы и силы упругого растяжения.

**Синтез модального управления двухмассовым объектом.** Эффективным способом демп-

фирования упругих колебаний заключается в использовании модального управления. В модальном регуляторе организуется обратная связь по полному вектору состояния объекта. Переменными состояниями служат скорости ведущего и ведомого шкивов передачи и сила упругого растяжения ремня. Для упрощения внутренний контур тока остается таким же, как и в предыдущих вариантах системы. Структурная схема системы управления скоростью ведомого шкива при этом примет вид, показанный на рис. 5.

Блок MP содержит модальный регулятор с интегральным действием. Структурная схема такого регулятора представлена на рис. 6. Процедура настройки такого регулятора подробно описана в [10].

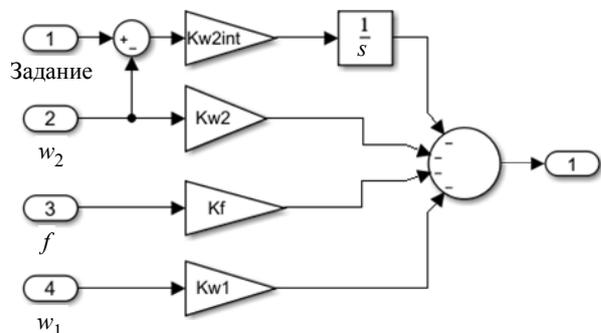


Рис. 6. Структурная схема модального регулятора с интегральным действием

Fig. 6. Block diagram of a modal regulator with integral action

На рис. 6 обозначены  $K_{w_2int}$ ,  $K_{w_2}$ ,  $K_f$  и  $K_{w_1}$  – коэффициенты модального регулятора.

В качестве желаемых корней системы с модальным регулятором выбраны корни полинома Ньютона 4-го порядка [11]:

$$D_{ж} = s^4 + 4w_0s^3 + 6w_0^2s^2 + 4w_0^3s + w_0^4.$$

Параметр  $w_0$  выбран равным 104 рад/с, чтобы обеспечить момент двигателя не больше максимально допустимого при отработке возмущающего воздействия.

**Синтез системы подчиненного регулирования двухмассовым объектом с применением корректирующего коэффициента и нейроконтроллера с эталонной моделью.** Введем в структурную схему (рис. 3) корректирующую положительную связь с коэффициентом  $K_{кор}$  для устранения статической ошибки по скорости при подаче возмущающих воздействий, а также нейроконтроллер с эталонной моделью Model Reference Controller, предназначенный для компенсации колебаний по угловой скорости ведомого шкива  $w_2$ , возникающих при подаче возмущающих воздействий (рис. 7).

Для исследования влияния упругости приводного ремня на точность поддержания скорости второй массы использовалась структурная схема, изображенная на рис. 2. В результате исследования было выявлено, что при изменении момента сопротивления со стороны ведомого шкива  $M_{c2}$  возникает статическая ошибка по скорости, устранить которую можно с помощью корректирующего коэффициента  $K_{кор}$ . Значение коэффициента

$K_{кор}$  зависит от заданной угловой скорости  $w$ , коэффициента жесткости приводного ремня  $K$  и радиуса ведомого шкива  $R_2$ , значения момента сопротивления и может быть вычислено по формуле, полученной эмпирически:

$$K_{кор} = \frac{w}{KR_2}.$$

Принцип работы нейроконтроллера состоит в том, чтобы свести к нулю рассогласование между выходами эталонной модели и объекта (реальной системы) за определенное время с гарантией устойчивости переходного процесса.

Так как при синтезе Model Reference Controller использовались нормированные данные в диапазоне от 0 до 1, то для использования нейроконтроллера при других значениях угловой скорости второй массы  $w_2$  в структурной схеме на рис. 7 введены усилители сигнала на управляющем выходе нейроконтроллера и выходе объекта, при этом уставка по заданию всегда будет оставаться единицей, что соответствует желаемому выходному сигналу по угловой скорости второй массы.

Компенсация колебаний осуществляется с помощью положительных импульсов прямоугольной формы, направленных противоположно колебаниям второй массы с задержкой во времени и подающихся в качестве корректирующей отрицательной обратной связи на вход контура скорости. Для сглаживания выходного сигнала нейроконтроллера используется фильтр в виде апериодического звена первого порядка.

Процедура синтеза нейроконтроллера на основе эталонной модели (Model Reference Control-

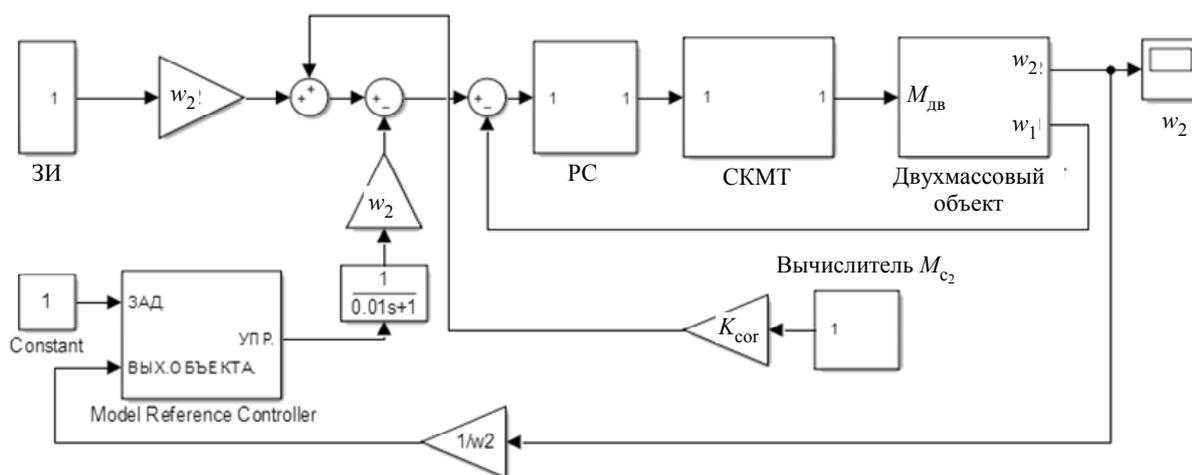


Рис. 7. Структурная схема системы управления с применением корректирующего коэффициента  $K_{кор}$  и нейроконтроллера Model Reference Controller

Fig. 7. Structural diagram of the control system using the correction factor  $K_{кор}$  and the neurocontroller Model Reference Controller

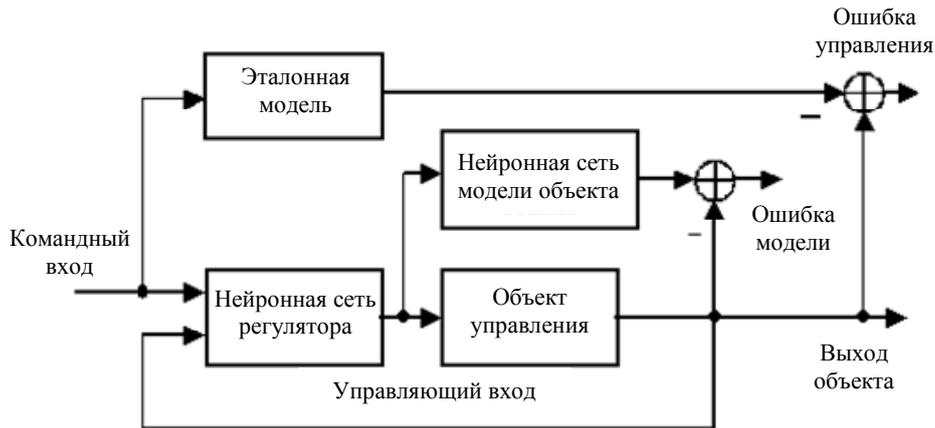


Рис. 8. Структурная схема, поясняющая принцип построения системы управления с эталонной моделью  
Fig. 8. Block diagram explaining the principle of building a control system with a reference model

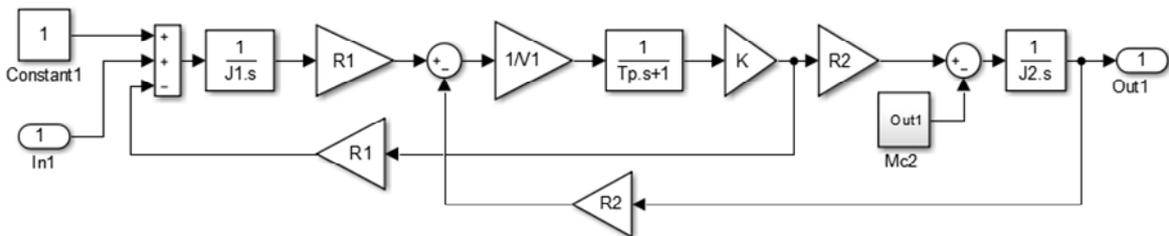


Рис. 9. Структурная схема объекта управления  
Fig. 9. Structural diagram of the control object

ler) состоит из двух этапов: идентификации модели управляемого объекта, а также синтеза закона управления. На этапе идентификации модели объекта разрабатывается модель управляемого процесса в виде нейронной сети, которая на этапе синтеза используется для синтеза регулятора.

Структурная схема, поясняющая принцип построения системы управления с эталонной моделью, показана на рис. 8 [11].

При идентификации модели объекта управления использовалась структурная схема, изображенная на рис. 9.

При идентификации модели объекта на его вход  $In_1$  подаются ступенчатые сигналы различной амплитуды и длительности, а с выхода  $Out_1$  снимаются получившиеся переходные процессы. Получившаяся выборка входных воздействий и выходов объекта используется при создании нейронной сети модели объекта. Окно настройки параметров объекта Plant Identification, находящееся в нейроконтроллере Model Reference Controller, приведено на рис. 10.

Далее через интерфейс Model Reference Control настраивается регулятор. В качестве эталонной модели использовалось апериодическое звено первого порядка с коэффициентом усиления,

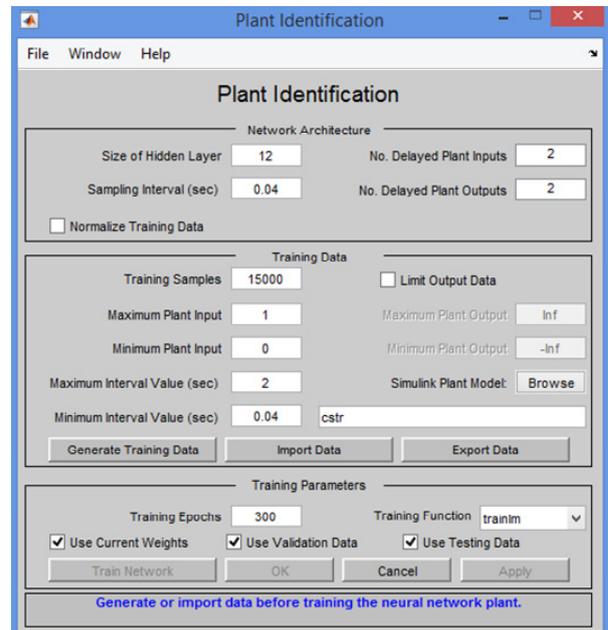


Рис. 10. Окно настройки Plant Identification  
Fig. 10. Plant Identification docker

равным единице, и постоянной времени, равной 0.08. Параметры апериодического звена выбирались, исходя из соображений о желаемом быстродействии системы. При этом стояла цель: уменьшить время переходного процесса и количество колебаний системы подчиненного регулирования

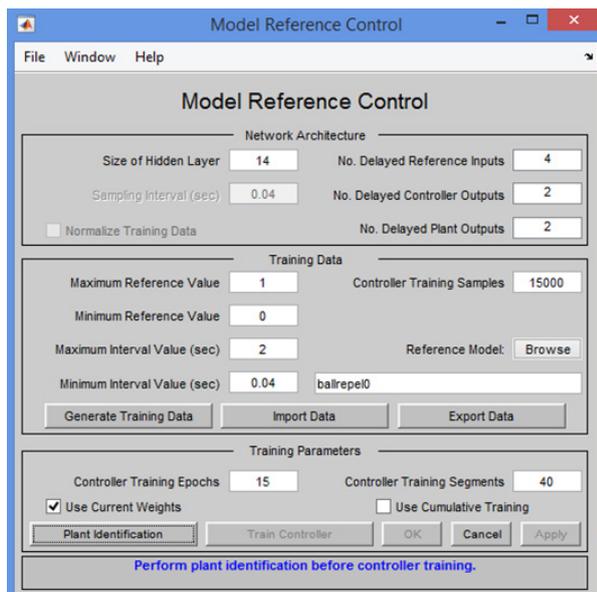


Рис. 11. Окно настройки Model Reference Control  
 Fig. 11. Model Reference Control docker

двухмассовым объектом с внешней обратной связью по скорости первой массы. Окно настройки Model Reference Control приведено на рис. 11.

**Результаты моделирования.** На рис. 12 и 13 приведены графики переходных процессов по моменту двигателя и скорости ведомого шкива при использовании различных систем управления. Управляющее воздействие формируется линейным задатчиком интенсивности, время разгона составляет 1 с. Возмущающее воздействие подается на второй секунде и равно номинальному моменту двигателя  $M_c = 73 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Из графиков рис. 12, а и 13, а видно, что двухмассовая система с подчиненным регулированием с обратной связью по скорости первой массы выходит на установившееся значение номинальной угловой скорости ведомого шкива  $\omega_2 = 152 \text{ рад/с}$  на первой секунде. При этом

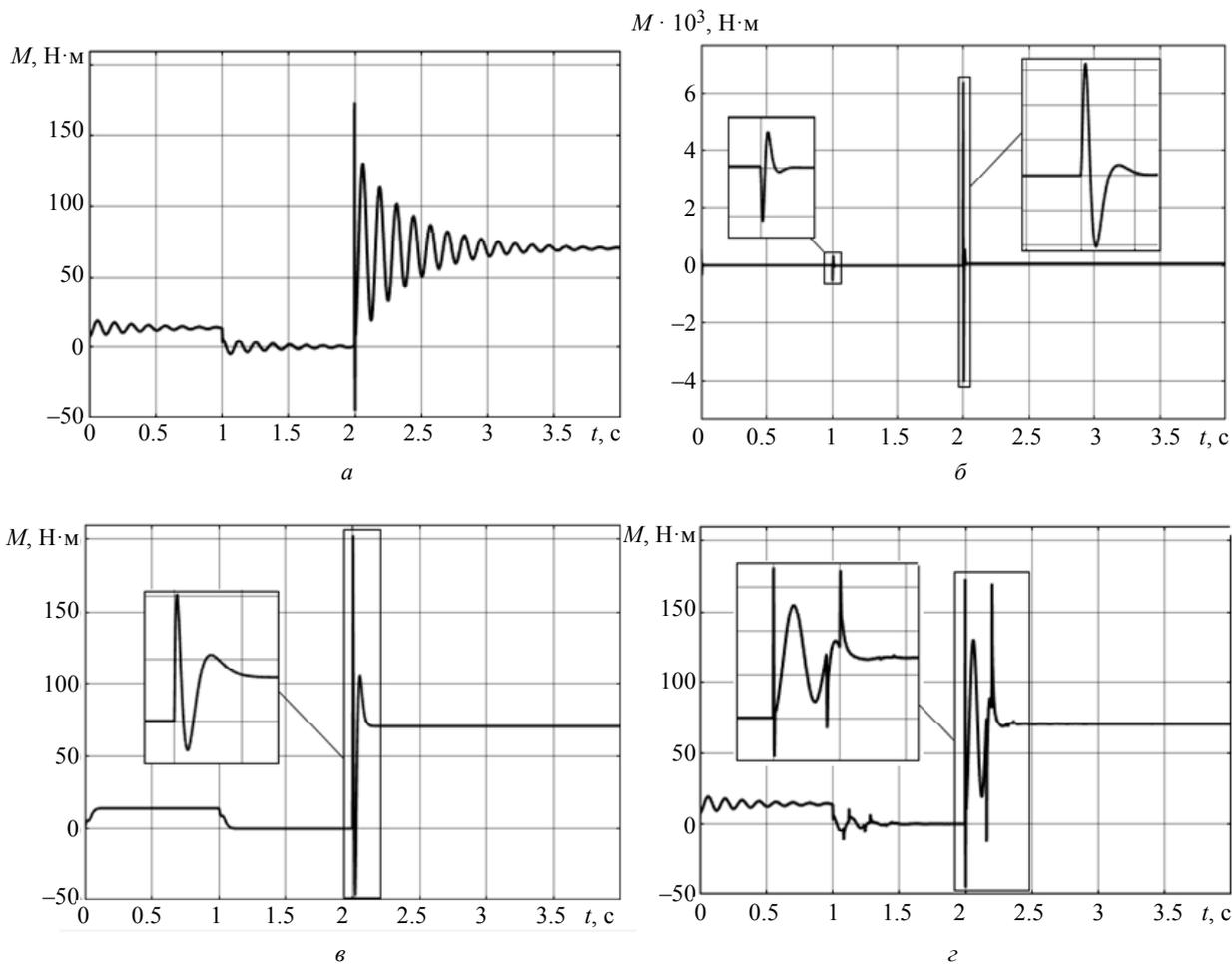


Рис. 12. Графики переходных процессов по моменту двигателя двухмассовой системы: а – с подчиненным регулированием с обратной связью по скорости первой массы; б – с многоконтурным подчиненным регулированием; в – с модальным регулятором; г – с нейрорегулятором  
 Fig. 12. Graphs of transient processes in terms of engine torque of a two-mass system: а – with a slave control with feedback on the speed of the first mass; б – with a multi-circuit subordinate regulation; в – with a modal regulator; г – with a neuroregulator

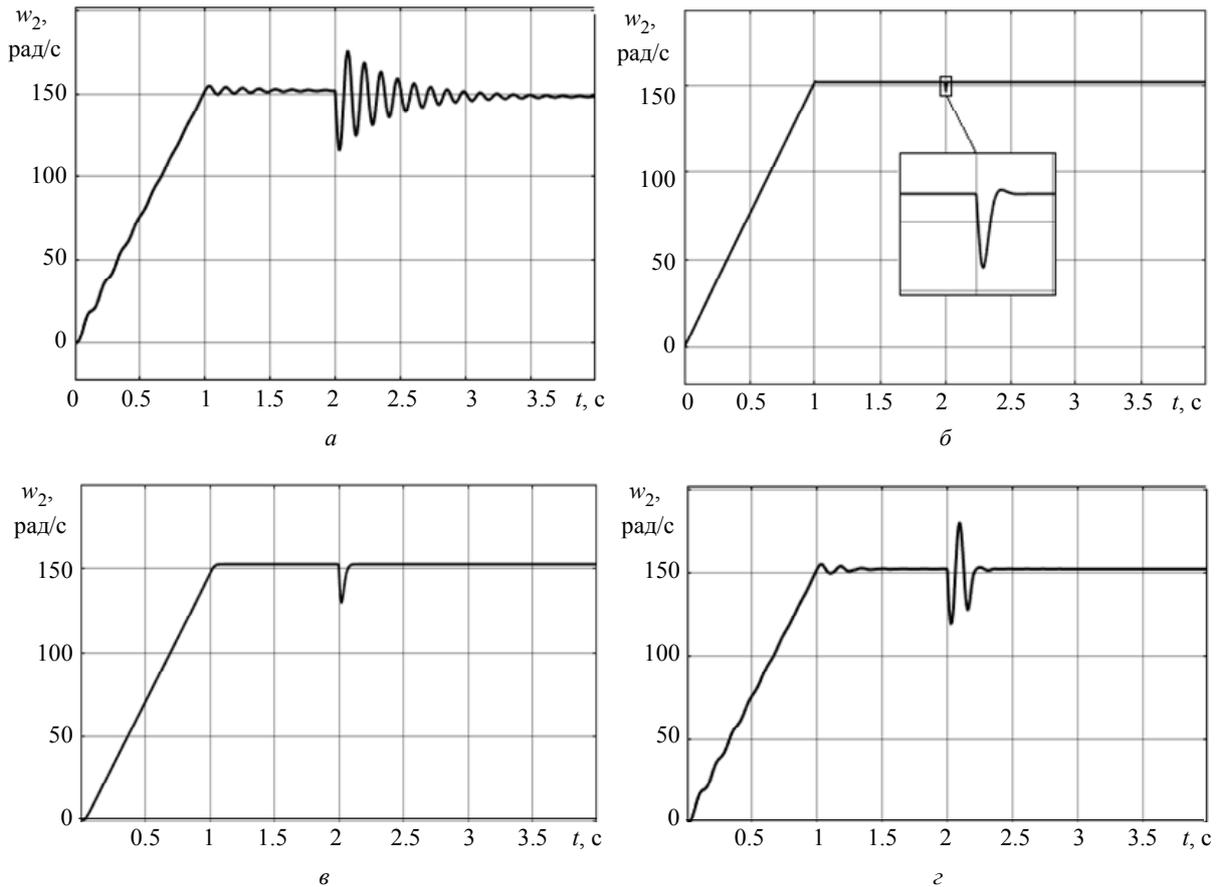


Рис. 13. Графики переходных процессов по скорости ведомого шкива двухмассовой системы:  
 а – с подчиненным регулированием с обратной связью по скорости первой массы; б – с многоконтурным подчиненным регулированием; в – с модальным регулятором; г – с нейрорегулятором  
 Fig. 13. Graphs of transient processes for the speed of the driven pulley of a two-mass system:  
 а – with a slave control with feedback on the speed of the first mass; б – with a multi-circuit subordinate regulation;  
 в – with a modal regulator; г – with a neuroregulator

наблюдаются незначительные колебания при разгоне. Момент при разгоне составляет примерно  $13 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и носит колебательный характер. После выхода ведомого шкива на установившуюся скорость момент снижается и носит колебательный характер. При подаче возмущающего воздействия возникает колебательный процесс по моменту и скорости длительностью 1.5 с, при этом возникает ошибка по скорости в статическом режиме вследствие растяжения ременной передачи. Колебания по скорости и моменту негативно влияют на качество работы системы, приводят к преждевременному износу кинематической цепи электропривода.

Из графиков рис. 12, б и 13, б видно, что введение дополнительных контуров эффективно гасит колебания, однако приводит к возникновению высокого момента, что может быть недопустимым для реальных систем. Устранить такие перегрузки можно, снизив коэффициент усиления регулятора во внешнем контуре. В результате моделирования было определено, что для обеспечения

допустимого момента двигателя необходимо снизить коэффициент регулятора в 25 раз. Однако при сниженном коэффициенте возникают значительные колебания скорости ведомого шкива, ввиду чего такой способ гашения колебаний в упругой электромеханической системе можно назвать неэффективным.

Из графиков рис. 12, в и 13, в видно, что использование модального регулятора эффективно гасит колебания, при этом значение момента заметно меньше, чем при многоконтурном подчиненном регулировании. Перерегулирование при управляющем воздействии отсутствует. Результаты показывают высокую эффективность модального управления для гашения упругих колебаний двухмассовой системы. Однако такое управление требует обратной связи по переменным состояниям. Обеспечение прямых измерений состояний объекта зачастую требует больших материальных вложений или вовсе невозможно. Построение наблюдающих устройств может позволить полу-

Параметры переходных процессов  
Transient response parameters

| Структура системы управления   | Время переходного процесса, с | Амплитуда первого колебания скорости по возмущению, рад/с | Статическая ошибка, рад/с | Средне-квадратичная ошибка, рад/с | Максимальные значения момента двигателя при отработке возмущения, Н · м |
|--|-------------------------------|---|---------------------------|-----------------------------------|---|
| Подчиненное регулирование с обратной связью по скорости первой массы | 1                             | 33  | 3.5                       | 6.2342                            | 129.6   |
| Многоконтурное подчиненное регулирование                             | 0.008                         | 5.3   | 0                         | 0.1943                            | 6372.8  |
| Модальное регулирование  | 0.07                          | 22.3  | 0                         | 3.4685                            | 202.6   |
| Система управления с нейрорегулятором                                | 0.2                           | 33  | 0                         | 4.4898                            | 173.6   |

чить информацию обо всех состояниях на основе частичных измерений, но при этом усложнит процесс синтеза системы управления и повысит требование к вычислительным мощностям системы управления.

Из графиков рис. 12,  $z$  и 13,  $z$  видно, что двухмассовая система с подчиненным регулированием с применением корректирующего коэффициента  $K_{\text{кор}}$  и нейроконтроллера Model Reference Controller по управлению практически идентична предыдущим системам управления. При подаче возмущающего воздействия возникает колебательный процесс, который длится примерно 0.2 с, что заметно меньше, чем в первой системе управления. Момент при этом не превышает допустимых значений. Недостаток данной системы управления заключается в меньшей эффективности гашения колебаний по сравнению с модальным регулятором, а также в высоких требованиях к вычислительным мощностям в про-

цессе синтеза. Однако для синтеза нейроконтроллера не требуется обратных связей по всем переменным состояниям, ввиду чего отпадает необходимость построения наблюдателя.

Для удобства сравнения параметры переходных процессов в различных системах управления сведены в таблицу.

**Выводы.** В статье исследованы различные подходы к синтезу системы управления двухмассовым объектом с упругостью в кинематических передачах. Результаты моделирования показали, что системы управления с модальным регулятором и нейроконтроллером показывают хорошие результаты при гашении упругих колебаний двухмассовой системы по сравнению с другими рассмотренными системами управления. При этом выбор между модальным регулятором и нейроконтроллером осуществляется в зависимости от требований к рассматриваемому объекту и доступных вычислительных мощностей.

#### Список литературы

1. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб.: Энергоатомиздат. 1992. 288 с.
2. Белов М. П., Кундюков О. А., Королев В. И. Синтез системы управления приводом продольной подачи токарного станка с упругими связями с применением нестандартного задатчика интенсивности // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 7. С. 47–56.
3. Белов М. П., Носиров И. С., Фьюнг Ч. Х. Исследование системы управления электроприводом подачи токарного станка с применением метода обобщенного нейрорегулирования с прогнозированием // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 4. С. 73–80.
4. Белов М. П., Носиров И. С., Белов А. М. Синтез нейросетевого регулятора двухмассовой электроме-

ханической системы привода подачи токарного станка // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2018. № 8. С. 70–76.

5. Белов М. П., Фьюнг Ч. Х., Носиров И. С. Управление электроприводом крупного радиотелескопа с линейно-квадратичным гауссовским регулятором // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 9. С. 52–58.

6. Белов М. П., Лань Н. В. Разработка дискретного оптимального квадратичного управления электроприводом наведения оптико-механических комплексов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2020. № 5. С. 78–84.

7. Лукичев Д. В., Демидова Г. Л. Нечеткая система управления позиционным следящим электроприводом опорно-поворотных устройств с нежесткими осями // Вестн. Ивановского гос. энергетического ун-та. 2013. № 6. С. 60–64.

8. Барышников В. Д., Куликов С. Н. Автоматизированные электроприводы бумагоделательного производства. Л.: Энергоиздат, 1982. 144 с.

9. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия. 2006. 272 с.

10. Ogata K. Modern Control Engineering. 5<sup>th</sup> Ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010. 912 с.

11. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.

---

#### Информация об авторах

**Белов Михаил Петрович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: milesa58@mail.ru

**Благодарный Николай Семенович** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой автоматизированного электропривода и электротехники ВШТЭ СПбГУПТД.

E-mail: blanis@yandex.ru

**Кундюков Олег Анатольевич** – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: kundyukov94@mail.ru

**Ершов Кирилл Константинович** – аспирант кафедры автоматизированного электропривода и электротехники ВШТЭ СПбГУПТД.

E-mail: volt.96@yandex.ru

**Наумов Александр Андреевич** – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: 21.01lex@mail.ru

#### References

1. Borcov Ju. A., Sokolovskij G. G. Avtomatizirovannyj jelektroprivod s uprugimi svjazjami. SPb.: Jenergoatomizdat. 1992. 288 s. (In Russ.).

2. Belov M. P., Kundjukov O. A., Korolev V. I. Sintez sistemy upravlenija privodom prodol'noj podachi tokarnogo stanka s uprugimi svjazjami s primeneniem nestandartnogo zadatchika intensivnosti // Izv. SPbGETU «LETI». 2022. T. 15, № 7. S. 47–56. (In Russ.).

3. Belov M. P., Nosirov I. S., Fyong Ch. H. Issledovanie sistemy upravlenija jelektroprivodom podachi tokarnogo stanka s primeneniem metoda obobshhennogo nejroupravlenija s prognozirovaniem // Izv. SPbGETU «LETI». 2018. № 4. S. 73–80. (In Russ.).

4. Belov M. P., Nosirov I. S., Belov A. M. Sintez nejrosetevogo reguljatora dvuhmassovoj jelektromehaničeskoj sistemy privoda podachi tokarnogo stanka // Izv. SPbGETU «LETI». 2018. № 8. S. 70–76. (In Russ.).

5. Belov M. P., Fyong Ch. H., Nosirov I. S. Upravlenie jelektroprivodom krupnogo radioteleskopa s linejno-kvadratičnym gaussovskim reguljatorom // Izv. SPbGETU «LETI». 2017. № 9. S. 52–58. (In Russ.).

6. Belov M. P., Lan' N. V. Razrabotka diskretnogo optimal'nogo kvadratičnogo upravlenija jelektroprivodom navedenija optiko-mehaničeskikh kompleksov // Izv. SPbGETU «LETI». 2020. № 5. S. 78–84. (In Russ.).

7. Lukichev D. V., Demidova G. L. Nechetkaja sistema upravlenija pozicionnym sledjashhim jelektroprivodom oporno-povorotnyh ustrojstv s nezhestkimi osjami // Vestn. Ivanovskogo gos. jenergetičeskogo un-ta. 2013. № 6. S. 60–64. (In Russ.).

8. Baryshnikov V. D., Kulikov S. N. Avtomatizirovannye jelektroprivoda bumagodelatel'nogo proizvodstva. L.: Jenergoizdat, 1982. 144 s. (In Russ.).

9. Sokolovskij G. G. Jelektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. M.: Akademija. 2006. 272 s. (In Russ.).

10. Ogata K. Modern Control Engineering. 5<sup>th</sup> Ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010. 912 s.

11. Kuzovkov N. T. Modal'noe upravlenie i nabljudajushhie ustrojstva. M.: Mashinostroenie, 1976. 184 s. (In Russ.).

---

#### Information about the authors

**Mikhail P. Belov** – Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: milesa58@mail.ru

---

**Nikolai S. Blagodarny** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automated Electric Drive and Electrical Engineering, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

E-mail: blanis@yandex.ru

**Oleg A. Kundyukov** – postgraduate student of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: kundyukov94@mail.ru

**Kirill K. Ershov** – postgraduate student of the Department of Automated Electric Drive and Electrical Engineering, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.

E-mail: volt.96@yandex.ru

**Alexander A. Naumov** – postgraduate student of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: 21.01lex@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.05.2023; принята к публикации после рецензирования 25.05.2022; опубликована онлайн 25.09.2023.

Submitted 16.05.2023; accepted 25.05.2022; published online 25.09.2023.

---