

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 681.514

ИССЛЕДОВАНИЕ И СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДВУХМАССОВОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЗМА ПОДЪЁМА КРАНА

Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: Исследование функционирования электромеханической системы с учетом упругих связей является актуальной задачей. Упругие взаимодействия между двигателем и механизмом увеличивают нагрузку на механические передачи и рабочее оборудование и ускоряют их износ, увеличивая число степеней свободы системы и возбуждая резонансные колебания. Показан синтез модального регулятора, обеспечивающий апериодический переходный процесс. Проведен анализ достоинств и недостатков данного метода.

Ключевые слова: двухмассовая электромеханическая система, упругие связи, колебания, резонанс, модальный регулятор.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-7-8-99-106

RESEARCH AND SYNTHESIS OF THE MODAL REGULATOR OF THE TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF THE CRANE LIFTING MECHANISM

N.A. Malev, O.V. Pogoditsky

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: Research of operation electromechanical system with considering resilient liaison is an actual task. Resilient interactions between the engine and the mechanism increase the load on the mechanical transmission and working equipment and accelerate their wear, increasing degrees of freedom of the system and exciting resonance oscillations. The synthesis of a modal regulator shown that provides an aperiodic transient process. The advantages and disadvantages of this analyzed method.

Keywords: two-mass electromechanical system, resilient liaison, oscillations, resonance, modal regulator.

В процессе работы подъемной установки с упругими элементами в системе возникают различные виды колебаний: продольные, поперечные, крутильные. Данные колебания в значительной степени влияют на износ канатов в подъемной установке и на надежность установки в целом. Процесс анализа динамических свойств электромеханической системы с упругими связями целесообразно проводить, сделав следующие допущения:

1. Массивные тела считаются абсолютно жёсткими, вся их масса сосредоточена в центрах тяжести тел.
2. Силы, действующие в системе, приложены к сосредоточенным массам.
3. Деформация упругих звеньев линейна.

При таком подходе исследование исходной системы упрощается, а характер динамических процессов остается прежним. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы показана на рис. 1.

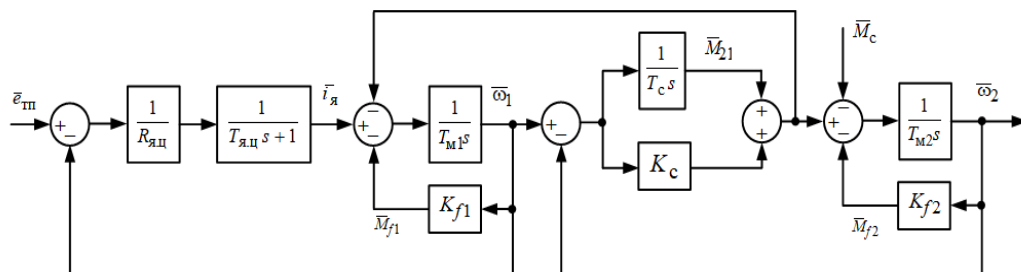


Рис. 1. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы механизма подъёма крана

В показанной на рис. 1 схеме приняты следующие обозначения: $e_{тп}$ – среднее значение ЭДС тиристорного преобразователя; ω_1 , ω_2 – скорости двигателя и исполнительного органа; $i_я$ – ток якоря; $T_{я.ц}$, $R_{я.ц}$ – постоянная времени и активное сопротивление якорной цепи; $T_{м1} = J_1 \omega_6' / M_6'$, $T_{м2} = J_2' \omega_6' / M_6'$ – механические постоянные времени первой и второй масс; $T_ц = M_6 / c \omega_6$ – постоянная времени жесткости упругого звена; $K_c = b \omega_6 / M_6$ – коэффициент внутреннего трения; $K_{f1} = a_1 \omega_6 / M_6$, $K_{f2} = a_2' \omega_6' / M_6'$ – коэффициенты вязкого трения на массах; M_{21} – упругий момент; M_{f1} , M_{f2} – моменты трения на двигателе и на исполнительном органе; M_c – момент сопротивления нагрузки; c – коэффициент жесткости; a_1 , a_2 – коэффициенты вязкого трения; b – коэффициент внутреннего трения в упругой передаче.

Применительно к крановому механизму подъёма с двигателем постоянного тока типа 2ПФ160МУХЛ4 реализуем схему рис. 1 в среде *MatLab Simulink*. Соответствующая схема с числовыми значениями параметров электромеханической системы показана на рис. 2.

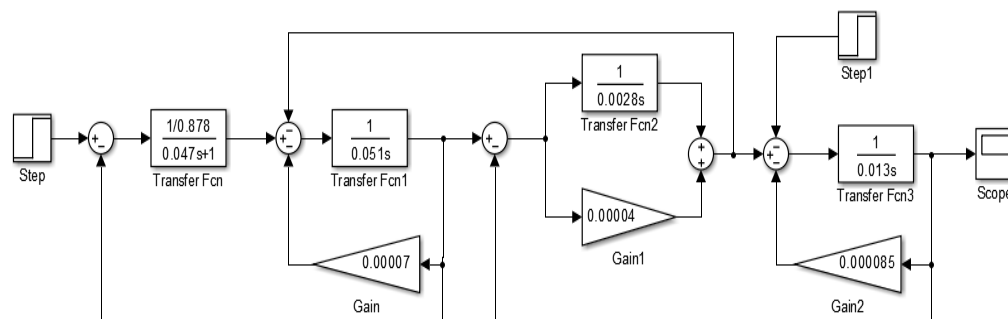


Рис. 2. Структурная схема моделирования двухмассовой электромеханической системы механизма подъёма крана в среде *MatLab Simulink*

Результаты моделирования двухмассовой электромеханической системы механизма подъёма крана показаны на рис. 3.

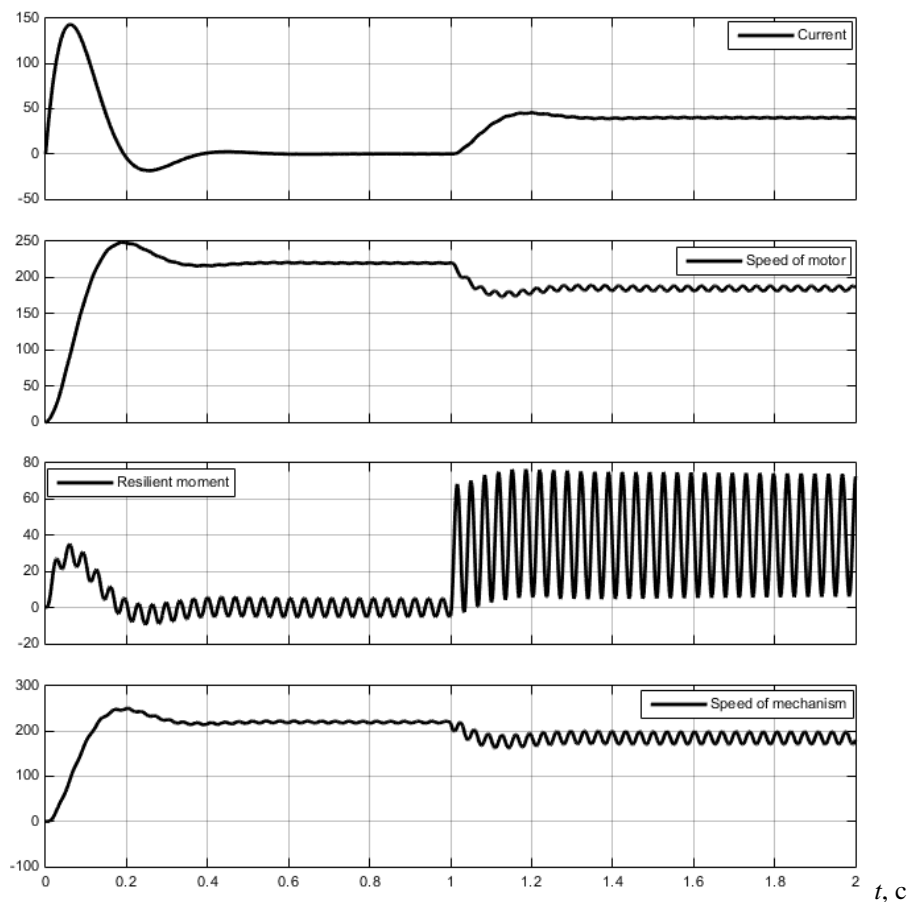


Рис. 3. Графики переходного процесса в электромеханической системе: *Current* – зависимость тока якоря i_a от времени; *Speed of motor* – зависимость скорости двигателя ω_1 от времени; *Resilient moment* – зависимость упругого момента M_{21} от времени; *Speed of mechanism* – зависимость скорости исполнительного органа ω_2 от времени

Зависимость тока якоря от времени (*Current*) характеризуется броском тока при пуске, в 3,5 раза превышающим номинальное значение $i_{a,ном} = 41$ А. При набросе нагрузки через 1 с после пуска ток якоря колеблется около номинального значения с амплитудой колебаний порядка 0,8 А.

Переходный процесс (график *Speed of motor*) протекает с перерегулированием 13% и незначительными колебаниями скорости вращения, амплитуда которых возрастает до 6 рад/с при набросе нагрузки.

График зависимости упругого момента M_{21} *Resilient moment* характеризуется колебаниями, амплитуда которых возрастает до 50 Н·м при приложении нагрузки, что соизмеримо с номинальным моментом двигателя $M_{ном} = 47,7$ Н·м.

График переходного процесса по скорости ω_2 исполнительного органа *Speed of mechanism* в целом совпадает с графиком угловой скорости двигателя $\omega_1(t)$, однако сопровождается увеличением амплитуды колебаний до 20 рад/с после приложения нагрузки.

Из приведенных зависимостей следует, что переходные процессы в исследуемой электромеханической системе сопровождаются значительными колебаниями, а в зоне рабочих частот возможно возникновение резонансных явлений. Упругие колебания не демпфируются системой, и колебательный переходный процесс в исследуемом объекте продолжается в течение 25 с, а соответствующие фазовые координаты принимают установившиеся значения только под действием сил трения.

Для устранения колебательности переходного процесса применяют способы последовательной и параллельной коррекции, синтез модального регулятора и режекторного фильтра, методы активной коррекции, в том числе с применением наблюдающих устройств и адаптивного управления.

В данной статье рассмотрен модальный синтез, обеспечивающий монотонность переходного процесса на основе применения биномиального распределения корней характеристического уравнения замкнутой системы.

Известно, что качество динамических характеристик системы характеризуется корнями характеристического уравнения или, в случае представления в векторно-матричной форме, собственными числами основной матрицы системы **A**. Желаемое расположение полюсов может быть обеспечено введением обратной связи по вектору состояния с применением модального регулятора и формированием матрицы **K** его коэффициентов.

Векторная структурная схема системы с модальным управлением показана на рис. 4.

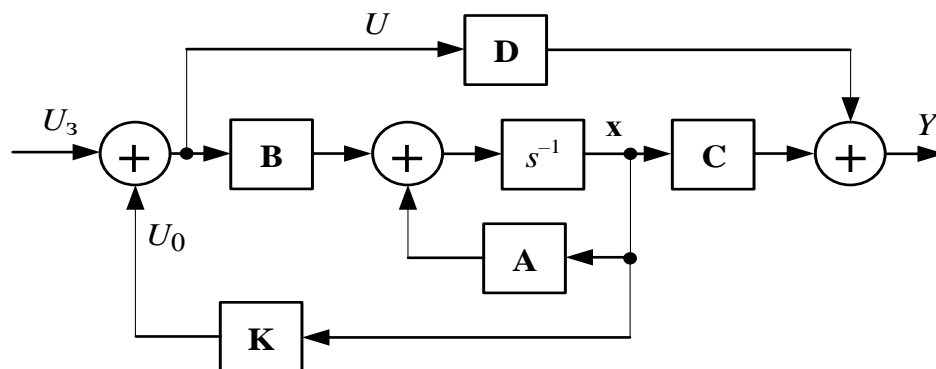


Рис. 4. Векторная структурная схема системы с модальным регулятором

Уравнение состояния с учетом обратной связи по вектору фазовых координат **X**

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}(U_3 - U_0) = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}(U_3 - \mathbf{K}\mathbf{X}) = (\mathbf{A} - \mathbf{BK})\mathbf{X} + \mathbf{B}U_3.$$

Применяя к последнему выражению преобразование Лапласа, имеем

$$(s\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{BK})\mathbf{X}(s) = \mathbf{B}U_3(s),$$

где **E** — единичная матрица.

Корни характеристического полинома определяются на основании уравнения

$$\det(s\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{BK}) = 0.$$

Процесс синтеза модального регулятора сводится к определению его коэффициентов $K_1 \dots K_n$ путем сравнения характеристического полинома со стандартными линейными формами, обеспечивающими желаемое распределение корней на комплексной *s*-плоскости.

Для систем высокого порядка вычисление коэффициентов матрицы **K** удобнее производить с применением формулы Аккермана, реализованной в программной среде *Matlab*.

Формула Аккермана записывается следующим образом:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{A}\mathbf{B} & \mathbf{A}^2\mathbf{B} & \dots & \mathbf{A}^{n-2}\mathbf{B} & \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} D_{\text{ж}}(\mathbf{A}),$$

где $D_{\text{ж}}(\mathbf{A})$ – матричный полином, образованный с применением коэффициентов желаемого характеристического уравнения

$$D_{\text{ж}}(\mathbf{A}) = \mathbf{A}^n + d_{n-1}\mathbf{A}^{n-1} + \dots + d_1\mathbf{A} + d_0\mathbf{E}.$$

Запишем дифференциальные уравнения состояния электромеханической системы в соответствии со схемой, показанной на рис. 1:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{\text{я}}}{dt} &= -\frac{1}{T_{\text{я.ц}}}i_{\text{я}} - \frac{1}{R_{\text{я.ц}}T_{\text{я.ц}}}\omega_1 + \frac{1}{R_{\text{я.ц}}T_{\text{я.ц}}}u_{\text{ТП}}; \\ \frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{1}{T_{\text{м1}}}i_{\text{я}} - \frac{K_{f1} + K_{\text{с}}}{T_{\text{м1}}}\omega_1 - \frac{1}{T_{\text{м1}}}M_{21}; \\ \frac{dM_{21}}{dt} &= \frac{1}{T_{\text{с}}}\omega_1 - \frac{1}{T_{\text{с}}}\omega_2; \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{K_{\text{с}}}{T_{\text{м2}}}\omega_1 + \frac{1}{T_{\text{м2}}}M_{21} - \frac{K_{f2} + K_{\text{с}}}{T_{\text{м2}}}\omega_2 \end{aligned} \right\}$$

а также матрицы коэффициентов исследуемой системы:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{\text{я.ц}}} & \frac{1}{R_{\text{я.ц}}T_{\text{я.ц}}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{\text{м1}}} & -\frac{K_{f1} + K_{\text{с}}}{T_{\text{м1}}} & -\frac{1}{T_{\text{м1}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{\text{с}}} & 0 & -\frac{1}{T_{\text{с}}} \\ 0 & \frac{K_{\text{с}}}{T_{\text{м2}}} & \frac{1}{T_{\text{м2}}} & -\frac{K_{f2} + K_{\text{с}}}{T_{\text{м2}}} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{\text{я.ц}}T_{\text{я.ц}}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{D} = 0.$$

Желаемое характеристическое уравнение выбираем из условия обеспечения аperiodического переходного процесса, который формируется при использовании биномиального распределения:

$$W_{\text{ж}}(s) = (s + 60,1)^4.$$

Кратный корень желаемого полинома $W_{\text{ж}}(s)$ выбирается экспериментально-аналитическим путем из условия достижения требуемого установившегося значения выходной координаты.

Обозначим коэффициент $\frac{1}{R_{\text{я.ц}}T_{\text{я.ц}}} = K_1$, а электромагнитную постоянную времени

якорной цепи $T_{\text{я.ц}} = T_{\text{а}}$ и запишем программу для реализации формулы Аккермана в командном окне *MatLab*:

K1=24,233; Tc=0,0028; Kc=0,00004; Ta=0,047; Tm1=0,051; Tm2=0,013; Kf1=0,00007; Kf2=0,000085;

```

A=[-1/Ta -K1 0 0; 1/Tm1 -(Kc+Kf1)/Tm1 -1/Tm1 Kc/Tm1; 0 1/Tc 0 -1/Tc; 0 Kc/Tm1
1/Tm2 -(Kc+Kf2)/Tm2];
B=[K1; 0; 0; 0];
C=[0 0 0 1];
D=[0];
N=ss(A, B, C, D); % передаточная функция нескорректированной системы
P=[-60,1 -60,1 -60,1 -60,1]; % желаемый полином
K=acker(A, B, P)
G=ss((A-B*K), B, C, D); % передаточная функция замкнутой системы
step(N, G)
K=9,041869847231407          -27,951307087927205          -43,719338594351761
27,953945754196127.

```

Результаты моделирования нескорректированной электромеханической системы (пунктирная линия) и системы с модальным регулятором (сплошная линия) показаны на рис. 5.

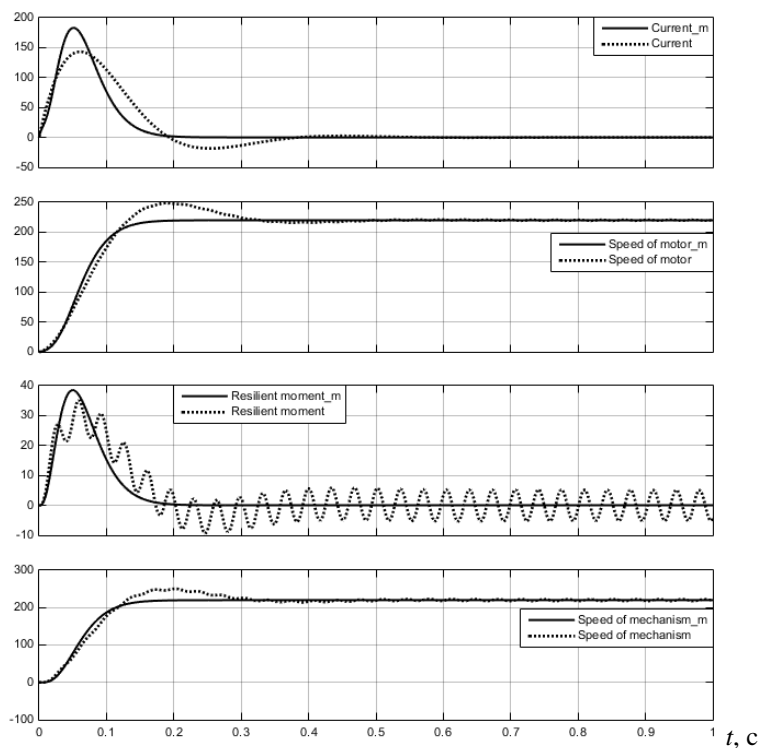


Рис. 5. Графики переходных процессов:

— в системе с модальным регулятором;
 - - - - - в нескорректированной системе

Из анализа графиков следует, что применение модального регулятора при биномиальном распределении корней желаемого характеристического полинома в целом благоприятно сказывается на качестве упругой электромеханической системы и приводит к устранению колебаний и апериодическому характеру переходных процессов.

Однако необходимо отметить, что модальное управление имеет недостатки, связанные с высокой чувствительностью скорректированной системы к внешним

возмущениям, а также большими значениями сигналов обратной связи на выходе модального регулятора, нуждающимися в ограничении по амплитуде.

По мнению авторов, интерес представляют методы, основанные на классическом подходе с использованием последовательной коррекции в цепи управления с применением цифровых технологий.

Литература

1. Барыльник Д.В., Пятибратов Г.Я. Моделирование электромеханических систем: учеб. пособие/Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т, 2013. 103 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. СПб: Корона-Век, 2014. 368 с.
3. Илюхин Ю.В. Компьютерное управление мехатронными системами: учебное пособие / Ю.В. Илюхин. М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2014. 320 с.
4. Pyatibratov G.Ya., Danshina A.A. Multifactorial determination of the electric drive for the force compensating manipulator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Tomsk, 27–29 October 2017. Vol. 177. № 1.
5. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Ya., Sukenko N.A. Forge Control Optimization in Forge Compensation Systems with Elastic Mechanical Gears // Life Science Journal. 2014. Vol. 11(12). Pp. 178 – 184.
6. Пятибратов Г.Я. Условия оптимизации и эффективность демпфирования электроприводом колебаний упругих механизмов // Электротехника. 2015. № 7. С. 9 – 15.
7. Пятибратов Г.Я., Сухенко Н.А. Электромеханические силокомпенсирующие системы подъёмно-транспортных механизмов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. № 4. С. 67 – 75.
8. Pyatibratov G.Ya., Bogdanov D.Yu., Bekin A.B. Synthesis of an Object Moving Control System with Flexible Suspension under the Action of External Forces // International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). Chelyabinsk, October 22–23 2015. Procedia Engineering, Vol.129 (2015). P. 29–36.
9. Пятибратов Г.Я., Барыльник Д.В., Сухенко Н.А. Математические модели и идентификация электромеханических систем: учеб. пособие. Новочеркасск: Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ), 2014. 158 с.
10. S. Ghazanfar, “Modeling and Simulation of a Two-mass Resonant System with Speed Controller”, International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 3, №. 5, pp. 449 – 452, 2013.
11. Малёв Н.А. Синтез и реализация цифрового регулятора высокого порядка на программируемом логическом контроллере / Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий, А.Н. Цветков // IX Международная (XX Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016): сборник материалов. 2016.
12. Малёв Н.А. Синтез регулятора измерительного контура автоматического компенсатора для измерения термоЭДС / Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий // Актуальные проблемы электронного приборостроения: матер. 13-й Междунар. науч.-техн. конф. 2016. Т. 10. С. 220–222.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборостроение и мехатроника» (ПМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Barylnik D.V., Pyatibratov G.Ya. Modeling of electromechanical systems: Schoolbook / Novochoerkassk: South-Russian State Polytechnic University, 2013. 103 с.
2. Herman-Galkin, S.G. Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC / S.G. Herman-Galkin. St. Petersburg: Corona-Vek, 2014. 368 p.

3. Ilyukhin Yu.V. Computer management of mechatronic systems: schoolbook / Yu.V. Ilyukhin. - Moscow: MSTU "Stankin", 2014. 320 p.
4. Pyatibratov G.Ya., Danshina A.A. Multifactorial determination of the electric drive for the force compensating manipulator // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Tomsk, 27–29 October 2017. Vol. 177. № 1.
5. Kravchenko O.A., Pyatibratov G.Ya., Sukenko N.A. Forge Control Optimization in Forge Compensation Systems with Elastic Mechanical Gears // Life Science Journal. 2014. Vol. 11(12). Pp. 178–184.
6. Pyatibratov G.Ya. Optimization conditions and efficiency of damping of the electric drive of oscillations of resilient mechanisms // Electrical engineering. 2015. № 7. P. 9 - 15.
7. Pyatibratov G.Ya., Sukhenko NA Electromechanical Power-Compensating Systems of Hoisting-and-Transport Mechanisms // Vestnik SUSU. Series "Energy". 2014. № 4. P. 67 - 75.
8. Pyatibratov G.Ya., Bogdanov D.Yu., Bekin A.B. Synthesis of an Object Moving Control System with Flexible Suspension under the Action of External Forces // International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2015). Chelyabinsk, October 22–23 2015. Procedia Engineering, Vol.129 (2015). P. 29–36.
9. Pyatibratov G.Ya., Barylnik D.V., Sukhenko N.A. Mathematical models and identification of electromechanical systems: Schoolbook. Novocherkassk: South-Russian State Polytechnic University, 2014. 158 p.
10. S. Ghazanfar, "Modeling and Simulation of a Two-mass Resonant System with Speed Controller", International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 3, №. 5, pp. 449 – 452, 2013.
11. Malev N.A. Synthesis and implementation of a high-order digital regulator on a programmable logic controller / N.A. Malev, O.V. Pogoditsky, A.N. Tsvetkov // IX International (XX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2016 (ICPDS'2016): a collection of materials. 2016.
12. Malev N.A. Synthesis of a regulator of a measuring loop of an automatic compensator for thermoEMF measurement / N.A. Malev, O.V. Pogoditskii // Actual Problems of Electronic Instrument Making: Mater. 13th Intern. scientific-techn. Conf. 2016. T. 10. P. 220-222.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – associate professor, Department «Instrument Making and Mechatronics», Kazan State Power Engineering University.

Oleg V. Pogoditsky – cand. sci. (techn.), associate professor, Department «Instrument Making and Mechatronics», Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

07 мая 2018 г.