

УДК 621.3.078

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С АДАПТИВНЫМИ К ВНЕШНЕЙ СРЕДЕ ЭТАЛОННЫМИ МОДЕЛЯМИ

Даденков Д.А., Казанцев В.П., Муравьев Д.И.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: dadenkov@mail.ru

Рассмотрены вопросы построения микропроцессорных инвариантных систем управления электроприводами с эталонными динамическими моделями, формирующими оптимальное по критерию быстродействия изменение фазовых переменных электроприводов с учетом ограничения энергетических ресурсов. В основе предлагаемого подхода – теорема об n интервалах дискретного управления применительно к цифровым системам предельного быстродействия, а также адаптация нелинейной эталонной модели к заведомо непредсказуемым приращениям задающего воздействия и ограничениям старшей фазовой переменной за счет формирования переменного периода цифрового управления. На основе предложенного подхода разработана оригинальная методика синтеза эталонных моделей, обеспечивающих формирование переменного такта дискретного управления и оптимальность формирования до четырех фазовых переменных ЭМСУ по критерию быстродействия. Представлена функциональная структура электромеханической системы управления с адаптивной нелинейной эталонной моделью, имитационная модель в среде MexBIOSDevelopmentStudio и результаты имитационного моделирования, которые подтвердили эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: электромеханическая система управления, электропривод, предельное быстродействие, адаптация, эталонная модель, имитационное моделирование

ELECTROMECHANICAL CONTROL SYSTEM ADAPTIVE TO THE ENVIRONMENT REFERENCE MODELS

Dadenkov D.A., Kazantsev V.P., Muravyev D.I.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: dadenkov@mail.ru

Consider building a microprocessor invariant control systems of electric drives with standard dynamic models that produce optimum by criterion of performance change of phase variables of actuators, taking into account the constraints of energy resources. The proposed approach is based on the theorem of n intervals, discrete control in digital systems the limit speed, as well as the adaptation of nonlinear reference model to the notoriously unpredictable increments which specifies impact and limitations of the older phase variable by a variable period of digital control. On the basis of the offered approach the original technique of synthesis of the reference models providing formation of variable clock period of the time quantized control and an optimality of formation to four phase variables to EMS by criterion of high-speed performance is developed. Provides functional structure of the electromechanical control system with adaptive nonlinear reference model, a simulation model and simulation results, which confirmed the effectiveness of the proposed approach.

Keywords: electromechanical control system, electric drive, limit performance, adaptation, reference model, simulation

Современные автоматизированные и автоматические системы управления технологическими процессами (АСУТП) ориентированы на реализацию предельного быстродействия обработки задающих и возмущающих воздействий. Это предопределено, с одной стороны, требованиями форсирования производительности технологических процессов с учетом заданных ограничений на значения переменных процесса, с другой – возросшими возможностями программно-технической реализации сложных нелинейных алгоритмов управления на основе микропроцессорных контроллеров и сервоприводов [1–3].

Выходной переменной той или иной локальной электромеханической системы управления (ЭМСУ) в составе АСУТП является, как правило, либо скорость, либо положение (угловые или линейные) некоторого рабочего органа. В общем же случае в ЭМСУ выделяют до четырех фазовых переменных с интегро-дифференцирующими

зависимостями: положение, скорость, ускорение, рывок [1, 2, 4, 6]. Поскольку в соответствии с общеизвестными положениями теории управления [5] управлять объектами, содержащими интеграторы второго и более высокого порядка с контролем только выходной переменной, не представляется возможным из-за потери устойчивости, то применяют декомпозицию объекта и введение обратных связей по ряду промежуточных переменных. Это позволяет организовать оптимальное в некотором смысле подчиненное регулирование координат электроприводов и, как следствие, компромиссное качество регулирования выходной переменной. При насыщении координаты управления или некоторой фазовой переменной, применяют нелинейные, например, параболические регуляторы с искусственно введенными ограничениями на коэффициент передачи для исключения образования предельных циклов вблизи установившихся состояний [1, 2]. Однако такой подход

не позволяет в полной мере реализовать предельное быстродействие обработки заданных приращений выходной переменной.

Постановка задачи. Как известно [1, 2, 5], ограничение координат состояния электропривода (напряжений, токов, электромагнитных моментов, скорости вращения вала и др.) приводит к нелинейности математической модели ЭМСУ, однако большинство методов синтеза оптимального управления, в том числе по критерию быстродействия, ориентировано на линейные модели объектов управления.

Предлагаемый подход к построению ЭМСУ предельного быстродействия базируется на применении адаптивных к параметрам внешней среды эталонных моделей на входе замкнутых ЭМСУ, обеспечивающих формирование оптимальных по быстродействию изменений именно фазовых переменных [6–10]. К параметрам внешней среды будем относить, прежде всего, заведомо неизвестное во времени изменение положения $x_1^{**}(t)$ рабочего органа, определяемое датчиками системы локации, технического зрения или иными внешними подсистемами, в том числе с участием оператора. Поскольку внешняя среда может накладывать ограничения на энергетические ресурсы ЭМСУ, то к параметрам внешней

среды целесообразно отнести и ограничения на энергию управления. Проще всего это реализовать введением ограничения самой величины управления U_m или старшей фазовой переменной.

Основная часть. На рис. 1 приведена обобщенная функциональная схема ЭМСУ, на которой приняты следующие обозначения: АЭМ – адаптивная эталонная модель, адаптер – устройство, обеспечивающее адаптацию АЭМ к параметрам внешней среды за счет формирования переменного такта управления T_p , ЭМСУ – электро механическая система управления.

В основе решения задачи синтеза оптимального по быстродействию управления ЭМСУ с АЭМ лежат следующие положения.

АЭМ представляет собой замкнутую по вектору состояния дискретно-непрерывную систему финитного управления [1, 2, 6–8]. При этом в качестве объекта управления в самой АЭМ выступает интегратор первого-четвертого порядка, что, по сути, отражает интегро-дифференцирующие связи до четырех заданных фазовых переменных инвариантной ЭМСУ – положения $\phi^*(t)$, скорости $\omega^*(t)$, ускорения $\varepsilon^*(t)$ и рывка $\rho^*(t)$.

Векторы фазовых переменных ЭМСУ и АЭМ (рис. 1) в общем случае могут быть представлены в виде:

$$\mathbf{X}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) & x_2(t) & x_3(t) & x_3(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \phi(t) & \omega(t) & \varepsilon(t) & \rho(t) \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{X}^*(t) = \begin{bmatrix} x_1^*(t) & x_2^*(t) & x_3^*(t) & x_3^*(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \phi^*(t) & \omega^*(t) & \varepsilon^*(t) & \rho^*(t) \end{bmatrix}^T.$$

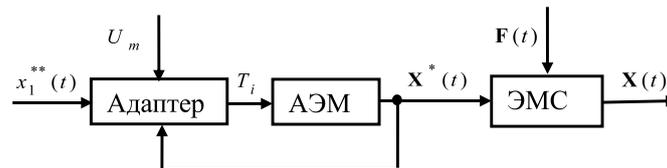


Рис. 1. Функциональная схема ЭМСУ

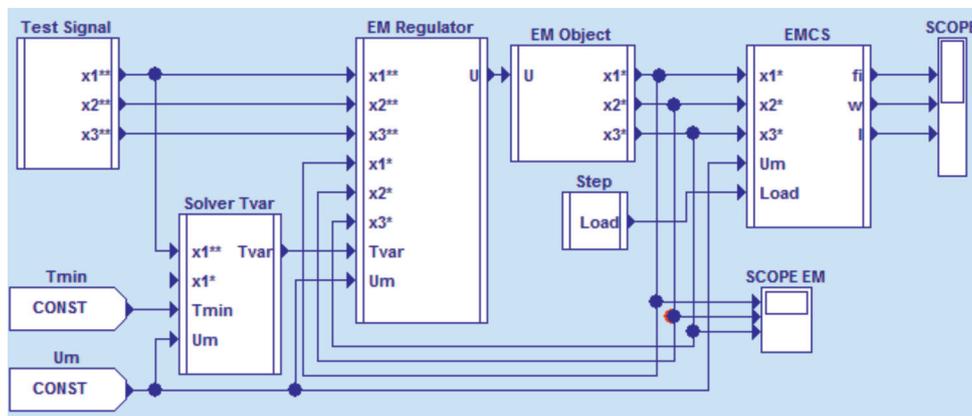


Рис. 2. Схема имитационного моделирования ЭМСУ с АЭМ

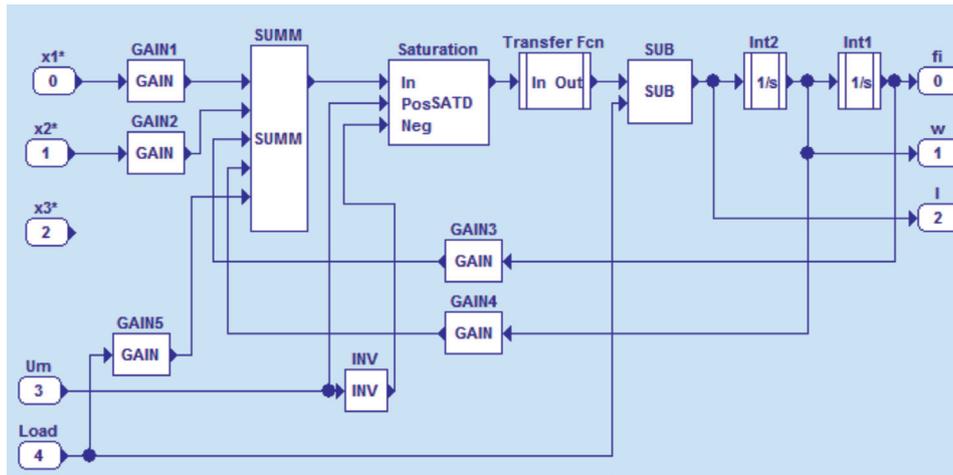


Рис. 3. Схема модели ЭМСУ

Поскольку состояние внешней среды априори неизвестно, будем полагать, что начальные значения всех фазовых переменных АЭМ при синтезе могут быть приняты нулевыми:

$$x_1^*(0) = x_2^*(0) = x_3^*(0) = x_4^*(0) = 0.$$

Тогда период T_i дискретного управления в АЭМ может быть представлен нелинейной функцией приращения задающего воздействия $\Delta x_{1,i}^{**}$ в некоторые дискретные моменты времени ($i = 0, 1, 2, \dots$) и предельно допустимого управления U_m , т.е. параметров внешней среды.

Для принятого порядка АЭМ анализ соотношений относительных изменений фазовых переменных в переходных процессах позволяет получить значения переменного периода управления в дискретные моменты времени изменения задающего воздействия:

$$-n = 1: T_i = \frac{\Delta x_{1,i}^{**}}{U_m}; \quad (1)$$

$$-n = 2: T_i = \sqrt{\frac{\Delta x_{1,i}^{**}}{U_m}}; \quad (2)$$

$$-n = 3: T_i = \sqrt[3]{\frac{\Delta x_{1,i}^{**}}{0,5 U_m}}; \quad (3)$$

$$-n = 4: T_i = \sqrt[4]{\frac{\Delta x_{1,i}^{**}}{0,333 U_m}}. \quad (4)$$

При условии, что максимальное управление численно равно максимальному значению старшей фазовой переменной,

рассчитанные по выражениям (1) – (4) периоды дискретного управления гарантированно обеспечивают ограничение наиболее быстрой старшей фазовой переменной на допустимом уровне.

Критерий качества, лежащий в основе синтеза замкнутой АЭМ, представляет собой предельное быстродействие в концепции цифровых финитных систем управления:

$$J = n = \min, \quad (5)$$

где n – число тактов дискретного управления, равное числу интеграторов АЭМ; соответственно оптимальное конечное время отработки приращения задающего воздействия составит именно n периодов управления, причем длительность периодов управления в соответствии с (1) – (4) является варьируемой.

Дискретное финитное управление состоянием АЭМ в соответствии с (1) – (5) является нелинейной функцией переменного периода T_i :

$$U(T_i) = \beta(T_i) \Delta \mathbf{X}_i^{**}, \quad (6)$$

где $\Delta \mathbf{X}_i^{**} = \mathbf{X}_i^{**} - \mathbf{X}_i^* = [\Delta x_{1,i}^{**} \Delta x_{2,i}^{**} \Delta x_{3,i}^{**} \Delta x_{4,i}^{**}]^T$ – вектор ошибок отработки приращений фазовых переменных АЭМ в i -й дискретный момент времени; $\beta(T_i)$ – матрица-строка переменных коэффициентов, являющаяся результатом синтеза оптимального по критерию (5) управления, процедура синтеза которого подробно изложена в [8, 9].

Ниже представлены результаты синтеза для АЭМ первого-четвертого порядка:

$$-n = 1: \beta(T_i) = [1/T_i \ 0 \ 0 \ 0]; \quad (7)$$

$$-n = 2: \beta(T_i) = [1/T_i^2 \ 1,5/T_i \ 0 \ 0]; \quad (8)$$

$$-n = 3: \beta(T_i) = \left| 1/T_i^3 \quad 2/T_i^2 \quad 1,833/T_i \quad 0 \right|; \quad (9)$$

$$-n = 4: \beta(T_i) = \left| 1/T_i^4 \quad 2,5/T_i^3 \quad 2,916/T_i^2 \quad 2,083/T_i \right|. \quad (10)$$

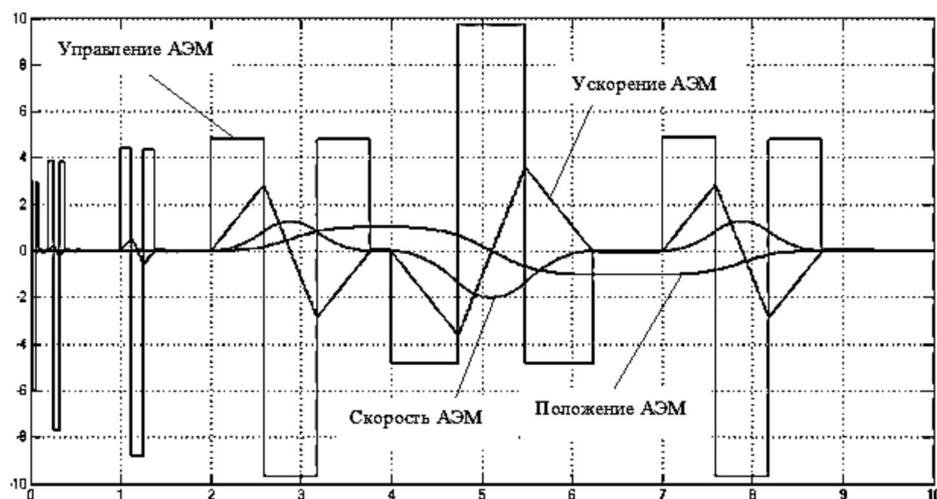


Рис. 4. Результаты моделирования процессов в АЭМ

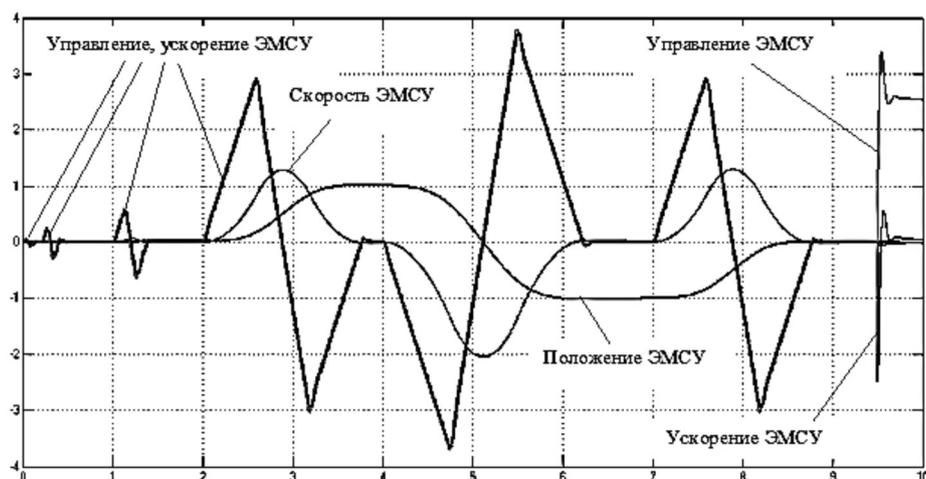


Рис. 5. Результаты моделирования процессов в ЭМСУ

Инвариантная по отношению к задающему воздействию ЭМСУ обрабатывает эталонные задающие воздействия $X^*(t)$ фазовых переменных. В общем случае – это заданное положение $\varphi^*(t)$ рабочего органа и его три производных по времени – скорость, ускорение, рывок. Форма представления сигналов определяется формой сигналов задающих воздействий самой ЭМСУ и параметрами линии связи АЭМ и ЭМСУ. Это могут быть аналоговые, цифровые или широтно-импульсные сигналы.

На рис. 2 приведена схема имитационного моделирования ЭМСУ с АЭМ в инте-

грированной программной среде *MexBIOS Development Studio*. При моделировании принято: выходная координата ЭМСУ – положение (рад), порядок АЭМ $n = 3$; минимальный период управления, определяющий зону линейности модели АЭМ $T_{\min} = 0,005$ с; уровень ограничения дискретного регулятора состояния АЭМ и рывка электропривода $U_m = 10$ рад/с³.

Обозначения модулей-подпрограмм на схеме: *TestSignal* – модуль формирования задающих воздействий, где приняты дискретные моменты времени изменения задающих воздействий (с): $t_0 = 0$, $t_1 = 0,2$,

$t_2 = 1,0$, $t_3 = 2$, $t_4 = 4$, $t_5 = 7$ и ступенчатые приращения задающего воздействия (положения ЭМСУ, рад): $\Delta x_{1,0}^{**} = 0,0001$, $\Delta x_{1,1}^{**} = 0,0009$, $\Delta x_{1,2}^{**} = 0,009$, $\Delta x_{1,3}^{**} = 0,99$, $\Delta x_{1,4}^{**} = -2,0$, $\Delta x_{1,5}^{**} = 1$; *SolverTvar* – модуль вычисления переменного периода управления АЭМ в соответствии с выражением (3); *EM Object* – объект управления АЭМ, представляющий собой идеальный интегратор 3-го порядка; *EM Regulator* – регулятор АЭМ, представляющий собой дискретный регулятор состояния с переменным периодом управления, формирующий оптимальное управление АЭМ в соответствии с формулами (6), (9); *EMCS* – квазиинвариантная по заданию электромеханическая система управления электроприводом постоянного тока, представленная, например, в виде оптимальной по быстродействию замкнутой по состоянию непрерывной системы управлением (рис. 3); *StepLoad* – модуль формирования ступенчатой нагрузки на валу электропривода. Принято, что нагрузка соответствует статическому току двигателя 2,5 А, время ступенчатого приложения нагрузки – 9,5 с.

Обозначения приведенные на схеме: *Int1*, *Int2* – идеальные интеграторы, моделирующие соответственно интегро-дифференцирующие связи между положением и скоростью, скоростью и ускорением (динамическим моментом); *TransferFcn* – инерционное звено 1-го порядка, аппроксимирующее замкнутый контур регулирования тока якоря (электромагнитного момента); *Saturation* – звено динамического ограничения, позволяющее ограничить ток якоря на допустимом уровне с возможностью внешнего управления уровнем ограничения; *Gain1 – Gain5* – масштабирующие звенья, моделирующие параметры регулятора состояния и полученные в соответствии с методикой, изложенной в [8, 9].

На рис. 4 приведены результаты моделирования процессов в АЭМ, на рис. 5 – в ЭМСУ. Обозначения графиков переменных приведены непосредственно на рисунках, по осям абсцисс – время (с), по осям ординат – абсолютные значения моделируемых переменных.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы:

– АЭМ формирует оптимальные по быстродействию задания фазовых переменных, причем ограничение рывка ЭМСУ на уровне 10 рад/с³ происходит только при достаточно больших приращениях задания, сформированных внешней средой, в частности, на 2-й, 4-й и 7-й секундах (рис. 4);

– ЭМСУ обрабатывает эталонное задание фазовых переменных с минимальной инерцией, практически дублируя задание и обеспечивая тем самым предельное быстродействие системы (рис. 5).

Заключение

В результате проведенных исследований предложен новый подход к построению предельных по быстродействию электромеханических систем управления с адаптивными к параметрам внешней среды эталонными моделями. На основе предложенного подхода разработана оригинальная методика синтеза эталонных моделей, обеспечивающих формирование переменного такта дискретного управления и оптимальность формирования до четырех фазовых переменных ЭМСУ по критерию быстродействия. При этом реализуется возможность ограничения на допустимом уровне старшей фазовой переменной и, соответственно, энергии управления. Результаты имитационного моделирования подтвердили эффективность предложенного подхода.

Список литературы

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
2. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб: Изд-во Корона-Век, 2014. – 368 с.
4. Даденков Д.А., Казанцев В.П. Синтез электромеханических систем управления с нелинейной адаптивной эталонной моделью // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–7. – С. 1466–1471.
5. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. Пер. с англ. Б.И. Копылова. Научное издание. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832 с.
6. Казанцев В.П., Даденков Д.А. Эталонные модели для систем управления фазовыми переменными технологических процессов и установок // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 57–61.
7. Казанцев В.П., Даденков Д.А. Эталонные модели относительного движения космических аппаратов в задачах формирования управляющих ускорений двигательных установок. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4.
8. Казанцев В.П., Петренко В.И. Синтез дискретных систем управления линейными объектами произвольного порядка // Информационные управляющие системы / Перм. гос.техн. ун-т. Пермь, 1995. – С. 99–105.
9. Казанцев В.П., Даденков Д.А. Синтез дискретно-непрерывных систем управления электроприводами с упругими связями // Электротехника. – 2012. – № 11. – С. 24а–28.
10. Bobrow J.E. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths / J.E. Bobrow, S. Dubowsky, J.S. Gibson // Int. Journal Robotic Research. – 1985. – № 4(3). – P. 3–17.

References

1. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskij G.G. Upravlenie jelektroprivodami. L.: Jenergoizdat, 1982. 392 p.

2. Borcov Ju.A., Poljahov N.D., Putov V.V. Jeletromehaničeskie sistemy s adaptivnym i modalnym upravleniem. L.: Jenergoatomizdat, 1984. 216 p.
3. German-Galkin S.G. Matlab&Simulink. Proektirovanie mehatronnyh sistem na PK. SPb: Izd-vo Korona-Vek, 2014. 368 p.
4. Dadenkov D.A., Kazancev V.P. Sintez jeletromehaničeskih sistem upravlenija s nelinejnoj adaptivnoj jetalonoj modelju // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–7. pp. 1466–1471.
5. Dorf R. Sovremennye sistemy upravlenija / R. Dorf, R. Bishop. Per. s angl. B.I. Kopylova. Nauchnoe izdanie. M.: Laboratorija Bazovyh Znanij, 2002. 832 p.
6. Kazancev V.P., Dadenkov D.A. Jetalonnye modeli dlja sistem upravlenija fazovymi peremennymi tehnologičeskikh processov i ustanovok // Jeletrotehničeskie kompleksy i sistemy upravlenija. 2014. no. 3. pp. 57–61.
7. Kazancev V.P., Dadenkov D.A. Jetalonnye modeli odnositel'nogo dvizhenija kosmičeskikh apparatov v zadachah formirovanija upravljajushhij uskorenij dvigatelnyh ustanovok. // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. no. 4.
8. Kazancev V.P., Petrenko V.I. Sintez diskretnyh sistem upravlenija linejnymi obektami proizvol'nogo porjadka // Informacionnye upravljajushhie sistemy / Perm.gos.tehn. un-t. Perm, 1995. pp. 99–105.
9. Kazancev V.P., Dadenkov D.A. Sintez diskretno-nepre-ryvnyh sistem upravlenija jeletkroprivodami s uprugimi svjazjami // Jeletrotehnika. 2012. no. 11. pp. 24a–28.
10. Bobrow J.E. Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths / J.E. Bobrow, S. Dubowsky, J.S. Gibson // Int. Journal Robotic Research. 1985. no. 4(3). pp. 3–17.

Рецензенты:

Бочкарев С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Цаплин А.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой общей физики, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.