УДК 62-523

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ НЕЛИНЕЙНОГО РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В РЕЖИМЕ ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Немонтов В.А., Егоров И.Н.

ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: nemontov@vlsu.ru, egorovmtf@mail.ru

Системы управления электроприводами многофункциональных робототехнических систем автоматической подачи тепловыделяющих сборок являются многорежимными гибридными (логико-динамическими) системами, обеспечивающими решение нескольких задач управления функциональным движением исполнительных устройств в условиях технологической неопределённости. В статье рассматривается один из вариантов решения подобной задачи с помощью нелинейных логико-динамических законов регулирования в двухканальных электроприводах с независимым позиционно-силовым управлением на примере канала позиционного управления. Реализация логического закона регулирования осуществляется последовательным нелинейным корректирующим устройством, изменяющим структуру привода в зависимости от величины сигнала ошибки по положению с помощью аналогового или цифрового логического переключающего устройства. Анализ динамики приводов с переменной структурой для робототехнической системы в режиме позиционного управления функциональным перемещением субтильных объектов проводился на примере вентильного электропривода подчиненного регулирования. Результаты математического моделирования подтвердили работоспособность предложенной структуры.

Ключевые слова: электропривод, динамика, регулятор, робот, позиционирование, нелинейный

SYNTHESIS OF STRUCTURE OF THE NONLINEAR REGULATOR OF ELECTRIC DRIVES OF MULTIPURPOSE ROBOTIC SYSTEM IN THE MODE OF POSITION MANAGEMENT

Nemontov V.A., Egorov I.N.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, e-mail: nemontov@vlsu.ru, egorovmtf@mail.ru

Control systems of electric drives of multipurpose robotic systems of robotic giving of the heatallocating assemblies are the multimode hybrid logical and dynamic systems providing the solution of several problems of management of the functional movement of actuation mechanisms in the conditions of technological uncertainty. In article one of versions of the solution of a similar task by means of nonlinear logical and dynamic laws of regulation in two-channel electric drives with independent position and power management on the example of the channel of position management is considered. The realization of the logical law of regulation is enabled by the consecutive nonlinear device changing structure of the drive depending on mistake signal size by situation with the help analog or the digital switching device. The analysis of dynamics of drives with variable structure for robotic system in the mode of position management of functional movement of slender objects was carried out on the example of the electric drive of the subordinate of regulation. Results of mathematical modeling confirmed operability of the offered structure.

Keywords: electric drive, dynamics, regulator, robot, positioning, nonlinear

Системы управления (СУ) многофункциональных робототехнических систем (РТС) автоматической подачи тепловыделяющих сборок (ТВС) являются многорежимными гибридными (логико-динамическими) системами [5, 2], обеспечивающими решение нескольких задач управления функциональным движением исполнительных устройств (ИУ) в условиях технологической неопределённости. Многорежимные динамические СУ РТС являются системами с переключением целей, структуры и параметров алгоритмов программно-логического управления, что затрудняет анализ и синтез подобных систем. Это приводит к целесообразности применения: различных вариантов метода декомпозиции [8]; разрывных (кусочно-непрерывных и релейных) управлений, в т.ч. при наличии запаздывания в структуре обратной связи (нелинейных систем с последействием) [8, 10]; нелинейной коррекции [7, 3]; адаптивных систем с разнотемповыми движениями и переменной структурой [9]; основанных на событиях и логических правилах организации переключений методов интеллектного [1] и интеллектуального управления [4].

Реализация алгоритмов и структур систем управления РТС при выполнении транспортных, измерительных, сборочных и других технологических операций предъявляет высокие и достаточно противоречивые требования к электроприводам (ЭП) исполнительных устройств (ИУ). Значительная часть этих

RETRACTED

требований может быть устранена совершенствованием структуры электроприводов, которая должна обеспечивать возможность автономного и координированного регулирования перемещений, сил и моментов применением позиционно-силового управления [3, 6] при условии обеспечения высокой точности позиционирования без перерегулирования и плавности перемещения рабочего органа ИУ при переменных нагрузках и моментах инерции.

В данной работе в качестве одного из путей обеспечения эффективной работы ЭП в подобных условиях рассматривается применение ЭП с переменной структурой (рис. 1). Если при отработке малых рассогласований оптимальное качество регулирования достигается применением линейных ПИ и ПИД- регуляторов положения (ЛРП), то при отработке больших значений сигналов рассогласования, существенно превышающих величину линейной зоны, или других технологических ограничений целесообразно с помощью логического переключающего устройства ($ЛПУ_1$) перевести процесс регулирования на использование далее рассматриваемых нелинейных регуляторов положения (НРП) [7, 3, 6].

При свободном движении ИУ РТС силовая обратная связь ЭП с помощью $ЛПУ_2$ разомкнута и привод работает в режиме позиционного управления. При контакте ТВС с контейнером с помощью $ЛПУ_2$ замыкается силовая обратная связь. Обратная связь по положению размыкается, и ЭП работает в режиме управления силовым взаимодействием ТВС с контейнером.

Здесь приняты следующие обозначения: ВЭП – вентильный электропривод; ЛРП и НРП – линейный и нелинейный регуляторы положения; РСк – регулятор скорости; РС – регулятор силы; РТ – регулятор тока; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; ДЗ – дифференциатор знака; ЛПУ1...ЛПУ3 – логические переключающие устройства; $К_М$ – матрица силовых ключей; М – исполнительный двигатель; ДТ – датчик тока; ДПР – датчик положения ротора; ДСк – тахогенератор; ДП – датчик положения; $F(DS)$ – нелинейность типа «упор»; $C_М$ – матрица жёсткости; ДС – датчик силы.

В качестве базовой компоненты ЭП ИУ РТС с независимым позиционно-силовым управлением рассматривался регулируемый ВЭП в виде двуконтурной САР подчинённого регулирования скорости. Регуляторы скорости и тока реализуют ПИ-закон. Тип привода – ЭПБ-2 с двигателем 2ДВУ165М. В двигатель встроен переключатель ПДФ-8, имеющий датчик положения ротора, датчик скорости и импульсный датчик положения. Датчик тока – шунт с фильтрацией сигнала. Замыкание по положению выполняется в микроЭВМ контроллера привода с программной реализацией регулятора положения.

Динамика автономного перемещения ИУ рассматривалась на примере вентильного ЭП с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) методом математического моделирования с последующим проведением экспериментальных работ.

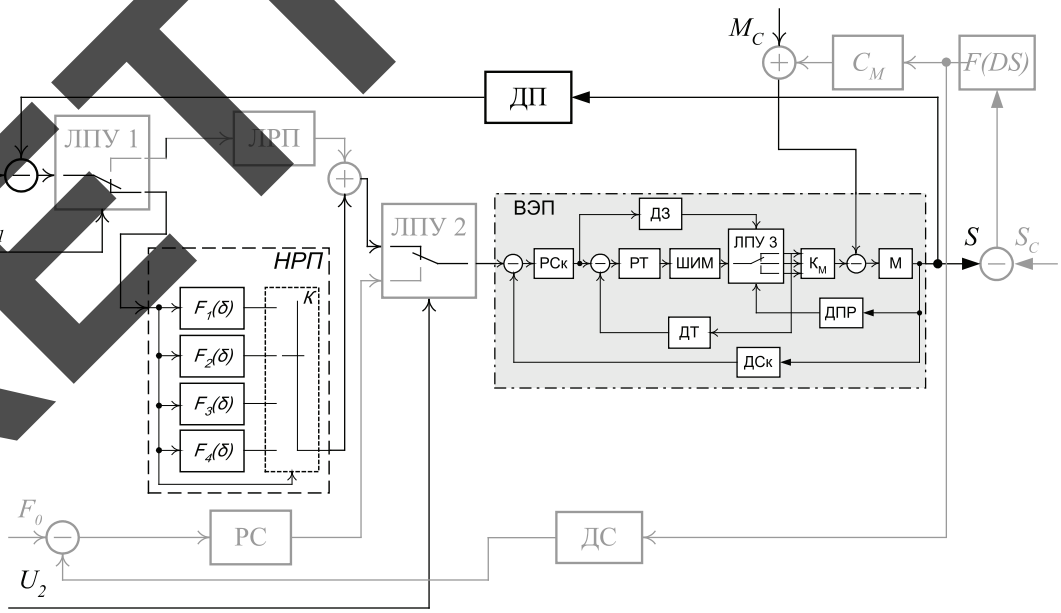


Рис. 1. Функциональная схема двухканального вентильного ЭП с независимым позиционно-силовым управлением

RETRACTED

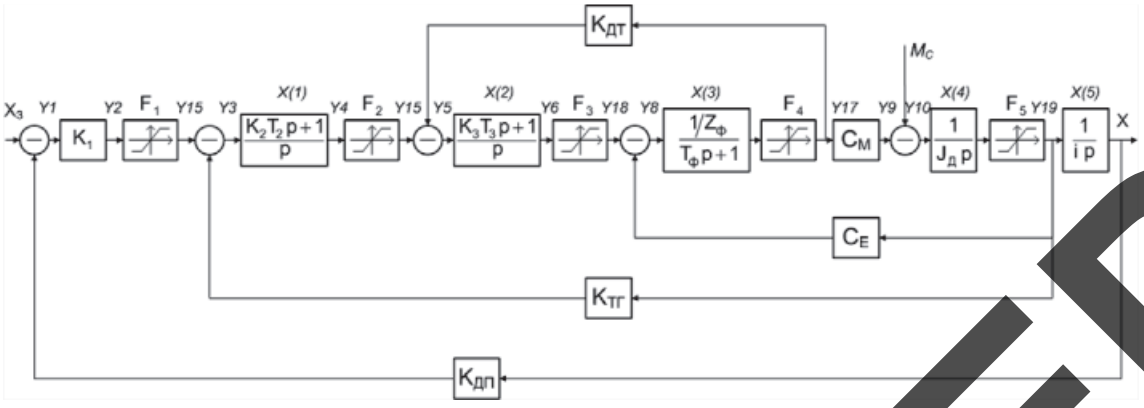


Рис. 2. Структурная схема вентильного ЭП с линейным регулятором положения

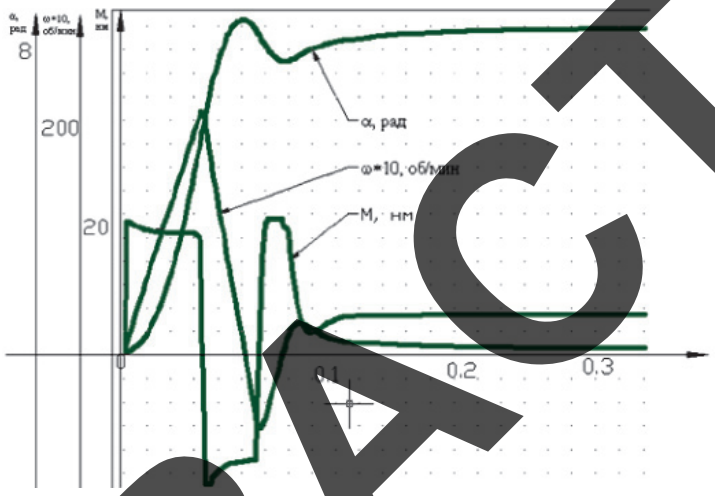


Рис. 3. Переходные характеристики позиционного привода с линейным регулятором

Структурная схема вентильного позиционного ЭП с учетом ограничений F_1-F_5 представлена на рис. 2. При моделировании приняты значения коэффициентов, ориентированные на конкретный привод и реальный технологический процесс, для которого в дальнейшем проведены экспериментальные исследования. Вентильный двигатель 2ДВУ165М имеет следующие параметры: P_M = 2,7 кВт; M_H = 17 Нм; N_H = 2000 об/мин; I_H = 12 А; I_m = 25 А. Коэффициенты структурной схемы имеют следующие значения: K_1 = 1,0; K_2 = 700; K_3 = 5500; $K_{ДТ}$ = 0,4 в/а; $K_{ТГ}$ = 0,0477 в/(рад·с); $K_{ДП}$ = 1,0; T_2 = 0,01 с; T_3 = 0,01 с; $T_Ф$ = 0,0088 с; $z_Ф$ = 1,0 Ом; C_E = 1,4; C_M = 1,4; $J_Д$ = 0,0051 кг·м²; i = 1. Цифровое моделирование проводилось с использованием пакета *MATLAB*. Переходная характеристика модели привода представлена на рис. 3.

Численное интегрирование дифференциальных уравнений осуществлялось методом Рунге – Кутты *V* с заданной точностью $\delta = 1 \cdot e^{-4}$ с автоматическим выбором шага интегрирования. За номинальную добротность привода принято ее паспортное значение K_V = 75 с[1]. Этому значению соответствует коэффициент передачи регулятора положения K_1 = 1. Амплитуда скачка угла составляла α = 8,5 рад. Привод имеет перерегулирование по скорости 33 %. По положению хотя и нет абсолютного перерегулирования относительно заданного значения угла, но характер подхода к заданному положению колебательный. Перерегулирование по положению будем рассматривать относительно амплитуды входа системы в линейную зону, что на графиках соответствует изменению знака ускорения. При этом переходный процесс по положению рассматривается и оценивается как отработка скачка угла с начальными условиями $g = \alpha = \delta_л \cdot 1(t)$; $\dot{X} = \Omega_л$; $\ddot{X} = \varepsilon_л$.

Для исследуемой системы согласно переходной характеристике имеем: $\delta_л$ = 6 рад, $\Omega_л$ = 2000 об/мин, $\varepsilon_л$ = 48300 с$^{-2}$; относительное перерегулирование, определённое при нулевом и максимальном значении скорости на этом участке составляет 0,75 рад

RETRACTED

или 12,5 %; общее время позиционирования $t_П$ = 0,22 с; время переходного процесса $t_{ПП}$ = 0,168 с.

Линейный регулятор не обеспечивает асимптотической устойчивости программного движения ИУ РТС, причем переходные процессы при отработке перемещений могут иметь колебательный характер, что недопустимо при работе с субтильными объектами типа ТВС. Кроме того, неизбежные в процессе эксплуатации возмущения и неопределённости (изменения массо-инерционных характеристик, дрейф коэффициентов трения и упругих деформаций и т.п.) приводят к снижению точности позиционирования, уменьшению быстродействия, а в ряде случаев и к аварийным ситуациям.

Это приводит к целесообразности применения методов: декомпозиции [8], разрывных (кусочно-непрерывных и релейных) управлений [8], нелинейной коррекции [7, 3]; адаптивных систем с разнотемповыми движениями и переменной структурой [9], интеллектного [1] и интеллектуального управления [4].

В настоящей работе в силу организационно-технических ограничений рассматривался только вариант применения нелинейного логико-динамического закона регулирования положения, реализуемого введением дополнительного нелинейного регулятора положения (НРП) [6]. На первом этапе рассматривались четыре варианта структур ЭП с различными местами включения нелинейного РП: в цепи входного сигнала S_0; в канале ошибки позиционного контура ЭП; параллельно линейному РП (параллельная коррекция); параллельно регулятору скорости или элементам обратных связей скоростного контура. В результате проведенного анализа структур можно сделать следующие выводы: показана принципиальная возможность повышения качества переходных процессов при отработке скачкообразного входного воздействия введением дополнительного функционала (нелинейного корректирующего звена) во внутренний контур системы; желаемую переходную характеристику проще всего можно получить включением нелинейного регулятора НРП в канал ошибки позиционного контура ЭП.

Рекомендуется характеристика нелинейного регулятора, состоящая из трёх участков: параболы, участка типа «насыщение» и зоны нечувствительности, определяемой значением критической скорости характеристики «сухое» трение. Наиболее приемлемой характеристикой, обеспечивающей поставленные требования в этом режиме, является характеристика, представленная на рис. 4, *а* и образованная совокупностью двух составляющих – постоянной и переменной:

$$K = K_0 - K(\delta, t)\, F_1(\delta),$$

где

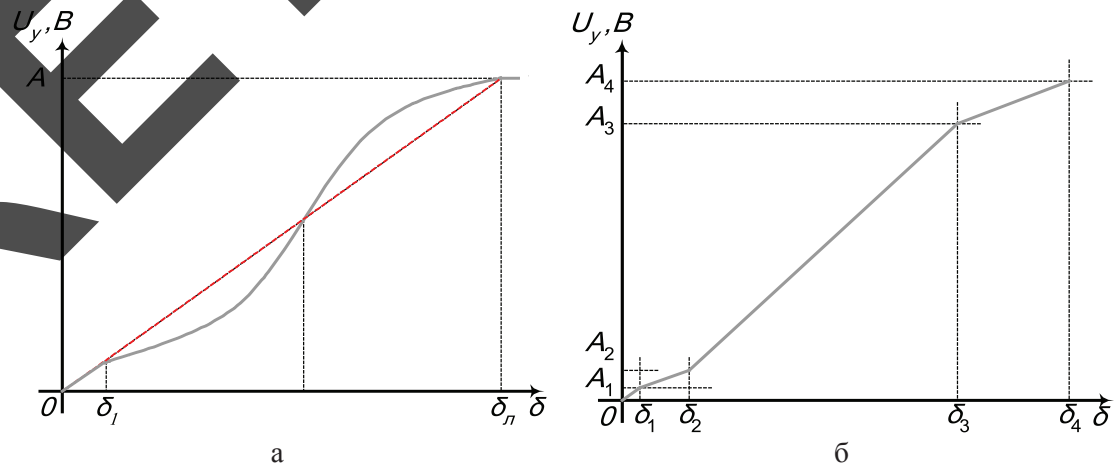
$$K(\delta, t) = \Delta K \sin\frac{2\pi}{\delta_л - \delta_1}\delta_2(t);$$

$$\Delta K = (0{,}1...0{,}2)K_0;$$

$$\delta_2(t) = \delta(t) - \delta_1;$$

$$F_1(\delta) = \begin{cases} 1 & \forall\delta_1 \left|\delta(t)\right| < \delta_л; \\ 0 & \forall\delta(t) < \delta_1. \end{cases}$$

Характерные значения ошибок выбираются в следующих соотношениях: $\delta_л = (0{,}8\ldots1{,}0)\cdot\delta_к$; $\delta_1 = (0{,}05\ldots0{,}1)\cdot\delta_л$. Положительный эффект даёт и введение зоны нечувствительности $\delta = (0{,}3\ldots0{,}5)\cdot\delta_1$. Практически аналогичные результаты можно получить, используя характеристику $K = F(\delta)$ с четырьмя опорными точками, представленную на рис. 4, *б*.



а б

Рис. 4. Характеристики нелинейного регулятора положения

RETRACTED

Нелинейный регулятор может быть реализован как программным путём на уровне управляющей программы цифрового привода, так и аппаратным в виде дополнительного модуля с программируемой памятью.

Регулятор НРП содержит набор линейных функций позиционной ошибки $F_i(\delta)$ и аналоговый переключатель K (рис. 1), формирующий желаемую характеристику регулятора из заданного набора функций по величине рассогласования δ. Аналогичным образом может быть реализован и нелинейный регулятор силы в канале управления силой, импедансом и податливостью как при действии геометрических и кинематических связей, так и сингулярных конфигураций.

Исследования вентильного ЭП с НРП выполнены цифровым моделированием.

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Переходный процесс имеет апериодический характер, без перерегулирования и колебаний, а время переходного процесса уменьшилось до 0,18 с. Таким образом, использование нелинейного регулятора положения в позиционном приводе позволяет полностью исключить моментные и скоростные перегрузки при работе с хрупким и субтильным объектом. В условиях действия внешних связей, вызванных нестационарностью расположения контейнеров с ТВС, неполнозаданностью координат ячеек в контейнере и нестабильностью формы самого ТВС, позиционное управление по координатам X и Y РТС должно быть дополнено электрическими или электромеханическими силовыми обратными связями с целью регулирования импеданса и податливости ЭП ИУ [3, 6].

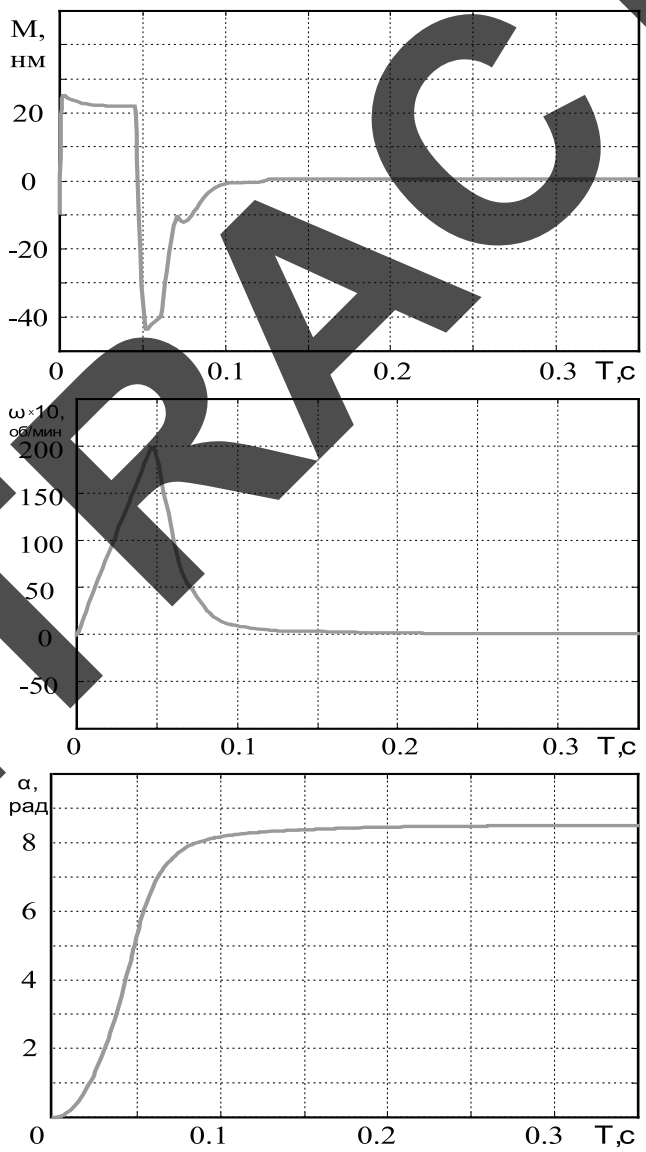


Рис. 5. Переходные характеристики позиционного ЭП с нелинейным регулятором положения

RETRACTED

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-01364).

Список литературы

1. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунов Б.Е. Интеллектное управление динамическими системами. – М.: Наука, Физматлит, 2000. – 352 с.

2. Васильев С.Н., Маликов А.И. О некоторых результатах по устойчивости переключаемых и гибридных систем // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН: сборник статей. – Т.1. – Казань: Изд-во «Фолиант», 2011. – С. 23–81.

3. Дистанционно управляемые роботы и манипуляторы / В.С. Кулешов, Н.А. Лакота, В.А. Андрюхин, И.Н. Егоров и др. / под ред. В.С. Кулешова, Н.А. Лакоты. – М.: Машиностроение, 1986. – 328 с.

4. Макаров И.М. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов; отдел. информ. технологий и вычисл. систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333с.

5. Многорежимные и нестационарные системы автоматического управления / Б.Н. Петров, А.Д. Александров, В.П. Андреев и др.; под ред. академика Б.Н. Петрова. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

6. Управление робототехническими системами с силомоментным очувствлением: учебное пособие / И.Н. Егоров, А.А. Кобзев, Ю.Е. Мишулин, В.А. Немонтов; под ред. И.Н. Егорова. – Владимир: ВлГУ, 2005. – 276 с.

7. Хлыпало Е.И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах. – Л.: Энергия, 1973. – 344 с.

8. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.

9. Юркевич В.Д. Синтез нелинейных нестационарных систем управления с разнотемповыми процессами. – СПб.: Наука, 2000. – 287 с.

10. Яблонский Д.В. Устойчивость и управление гибридными системами с запаздыванием. – Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 105 с.

References

1. Vasilev S.N., Zherlov A.K., Fedosov E.A., Fedunov B.E. Intellektnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami, M.: Nauka, Fizmatlit, 2000. 352 p.

2. Vasilev S.N., Malikov A.I. O nekotoryh rezultatah po ustojchivosti perekljuchaemyh i gibridnyh sistem / Sbornik statej «Aktualnye problemy mehaniki sploshnoj sredy. K 20-letiju IMM KazNC RAN», T.1. Kazan: Izd-vo «Foliant», 2011. pp. 23–81.

3. Distancionno upravljaemye roboty i manipuljatory / V.S. Kuleshov, N.A. Lakota, V.A. Andrjuhin, I.N.Egorov i dr. / Pod red. V.S. Kuleshova, N.A. Lakoty. M.: Mashinostroenie. 1986. 328s.

4. Makarov I.M. Iskusstvennyj intellekt i intellektualnye sistemy upravle-nija / I.M. Makarov, V.M. Lohin, S.V. Manko, M.P. Romanov; otdel. inform. tehnologij i vychisl. sistem RAN. M.: Nauka, 2006. 333 p.

5. Mnogorezhimnye i nestacionarnye sistemy avtomaticheskogo upravle-nija / B.N. Petrov, A.D. Aleksandrov, V.P. Andreev i dr.; pod red. akademika B.N. Petrova. M.: Mashinostroenie, 1978. 240 p.

6. Upravlenie robototehnicheskimi sistemami s silomomentnym ochuvstvleniem: Uchebnoe posobie. I.N. Egorov, A.A. Kobzev, Ju.E. Mishulin, V.A. Nemontov; Pod red. I.N. Egorova. Vladimir: VlGU. 2005. 276 p.

7. Hlypalo E.I. Nelinejnye korrektirujushhie ustrojstva v avtomaticheskih sistemah. L.: Jenergija, 1973. 344 p.

8. Chernousko F.L., Ananevskij I.M., Reshmin S.A. Metody upravlenija nelinejnymi mehanicheskimi sistemami. M.: Fizmatlit, 2006. 328 p.

9. Jurkevich V.D. Sintez nelinejnyh nestacionarnyh sistem upravlenija s razno-tempovymi processami. S.Peterburg, Nauka, 2000. 287 p.

10. Jablonskij D.V. Ustojchivost i upravlenie gibridnymi sistemami s zapazdyvaniem. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 105 p.

Рецензенты:

Коростелев В.Ф., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов», Владимирский государственный университет, г. Владимир;

Морозов В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Владимирский государственный университет, г. Владимир.

RETRACTED