

*АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ*

УДК 681.515.8:621.313.33:519.876.5

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗА ПОРТАЛЬНЫМ КРАНОМ***

Н.С. РОГОВА¹, В.Д. ЮРКЕВИЧ²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, магистрант кафедры автоматизи. E-mail: sosnovaya_4@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизи. E-mail: yurkev@ac.cs.nstu.ru

Рассматривается задача управления перемещением груза, прикрепленного на подвесе к горизонтально перемещаемой тележке. Данная задача встречается во многих технических приложениях, в частности, при управлении работой портального крана и управлении положением маятника, закрепленного на подвижной платформе. В статье рассмотрена математическая модель, описывающая поведение груза с тележкой, сформулирована задача синтеза и предложена методика расчета системы управления движением подвешенного груза и устранения его колебаний при перемещении в заданное положение. Выполнен синтез двухкаскадной системы регулирования, где в каждом каскаде используется модифицированная структура ПИД-регулятора, реализуемого без операции идеального дифференцирования. Особенность предлагаемой методики синтеза состоит в том, что параметры регуляторов выбираются таким образом, чтобы в замкнутой системе сформировать быстрые и медленные процессы, где медленные процессы соответствуют желаемым требованиям к динамике процесса перемещения груза. Анализ свойств замкнутой системы осуществляется на основе метода разделения движения. Проведено численное моделирование переходных процессов при перемещении груза с тележкой на основе предложенных алгоритмов управления. Численное моделирование выполнено в среде MatLab/Simulink. Результаты численного моделирования при различных значениях параметров груза и длины подвеса показали, что применение данной методики позволяет обеспечить формирование желаемых показателей качества переходных процессов в широком диапазоне изменений массы перемещаемого груза и длины подвеса. Предлагаемые в работе результаты могут представлять интерес и для решения задач управления другими механическими подвижными системами с ограниченными возможностями управляющего воздействия.

* Статья получена 06 июня 2017 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-01004-а).

Ключевые слова: нелинейная система, управление, ПИД-регулятор, маятник с тележкой, порталный кран, каскадная система управления, подавление колебаний груза, синтез регулятора, метод разделения движений

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-2-7-18

ВВЕДЕНИЕ

Портальные краны широко используются при выполнении погрузочно-разгрузочных работ в производственных процессах, в железнодорожных и портовых терминалах, в судоремонте на берегу и в плавучих доках [1]. При перемещении грузовой тележки порталного крана подвешенный груз начинает раскачиваться и совершает колебания, что затрудняет его точное позиционирование в заданное место и увеличивает время выполнения погрузочно-разгрузочного цикла [2–4]. В данной статье рассматривается задача перемещения груза порталным краном из одного положения в другое. Предлагается методика синтеза алгоритмов управления, которые обеспечивают затухание колебаний груза и одновременно его перемещение в заданную позицию. Необходимо отметить, что обсуждаемая задача управления относится к классу проблем управления механическими подвижными системами с ограниченными возможностями управляющего воздействия, когда механическую систему необходимо переместить из одного состояния равновесия в другое равновесное состояние, но в силу особенностей управляющего воздействия невозможно реализовать произвольную траекторию движения механической системы в пространстве [5–7]. Можно привести множество примеров исследований, посвященных задачам управления для подобного класса систем: стабилизация положения перевернутого маятника [8], планирование и управление движением летательных аппаратов [9], стабилизация траектории движения подвижных роботов [10]. Поэтому предлагаемые в работе результаты могут представлять интерес и для решения задач управления другими механическими подвижными системами с ограниченными возможностями управляющего воздействия. Особенностью используемого подхода к решению задачи синтеза в данной статье также является применение идей каскадного принципа построения систем управления [11] и метода разделения движений для анализа свойств замкнутой системы [12, 13].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ

Процесс перемещения груза порталным краном в данной работе рассматривается на основе упрощенной системы вида «маятник–тележка», которая показана на рис. 1. Данная система состоит из подвеса, который удержи-

вает груз, и тележки, способной перемещаться в плоскости оси закрепления под действием силы, прикладываемой управляющим двигателем. Здесь M – масса тележки; m – масса маятника; F – коэффициент трения при движении тележки; L – расстояние между точкой крепления маятника и центром его масс; J – момент инерции относительно центра масс для подвеса длиной L , который удерживает груз; $u(t)$ – сила, прикладываемая к тележке (управление); $x(t)$ – координата тележки; $\varphi(t)$ – угловое отклонение маятника от вертикали; g – ускорение свободного падения.

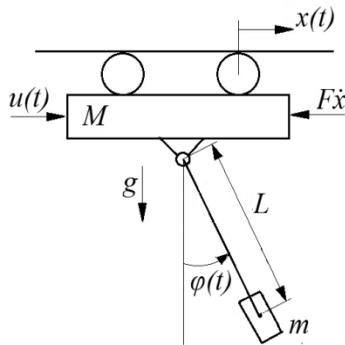


Рис. 1. Система «маятник–тележка»

Математическая модель, описывающая поведение системы «маятник–тележка», имеет следующий вид [14]:

$$\begin{aligned} (m + M)\ddot{x} + mL\ddot{\varphi} \cos \varphi - mL\dot{\varphi}^2 \sin \varphi + F\dot{x} &= u(t), \\ (J + mL^2)\ddot{\varphi} + mL\ddot{x} \cos \varphi + mgL \sin \varphi &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Целью данной работы является синтез системы управления, обеспечивающей выполнение следующих требований:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x^d,$$

где x^d – желаемое положение груза после его перемещения.

Кроме того, необходимо обеспечить технически приемлемые значения для колебательности и времени переходных процессов по $\varphi(t)$ и $x(t)$.

2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

В данной работе рассматривается двухконтурная система управления, где в первом контуре обеспечивается задача управления величиной угла $\varphi(t)$ отклонения груза от вертикали, а во втором контуре решается задача перемещения груза в заданное положение x^d (рис. 2).

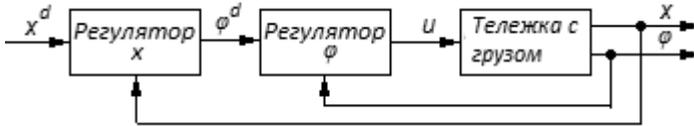


Рис. 2. Структурная схема двухконтурной системы управления

Модель перемещения груза (1) может быть представлена в виде следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\dot{x}_1 = x_3,$$

$$\dot{x}_2 = x_4,$$

$$\dot{x}_3 = f_\varphi(x_2, x_3, x_4) + b_\varphi(x_2)u,$$

$$\dot{x}_4 = f_x(x_2, x_3, x_4) + b_x(x_2)u,$$

где $[x_1, x_2, x_3, x_4] = [x, \varphi, \dot{x}, \dot{\varphi}]$,

$$f_\varphi(x_2, x_3, x_4) = r^{-1} \left[(J + mL^2)mLx_4^2 \sin x_2 + m^2 L^2 g \sin x_2 \cos x_2 - (J + mL^2)Fx_3 \right],$$

$$f_x(x_2, x_3, x_4) = r^{-1} \left[mL Fx_3 \cos x_2 - m^2 L^2 x_4^2 \sin x_2 \cos x_2 - (M + m)mgL \sin x_2 \right],$$

$$b_\varphi(x_2) = (J + mL^2)r^{-1}, \quad b_x(x_2) = -mLr^{-1} \cos x_2,$$

$$r = (M + m)(J + mL^2) - m^2 L^2 \cos^2 x_2.$$

При синтезе регулятора для внутреннего контура регулирования величины угла отклонения груза φ рассматриваются уравнения для отклонения маятника от вертикальной оси в предположении, что процесс перемещения тележки протекает существенно медленнее, чем процесс $\varphi(t)$. Поэтому при

расчете внутреннего контура не рассматриваются процессы по перемещению x . Алгоритм управления для внутреннего контура имеет вид

$$\mu_{\varphi}^2 \ddot{u} + d_{\varphi} \mu_{\varphi} \dot{u} = k_{\varphi} \left[\frac{1}{T_{\varphi}^2} [\varphi^d - x_2] - \frac{1}{T_{\varphi}} a_{\varphi}^d x_4 - \ddot{x}_2 \right],$$

который соответствует ПИД-регулятору, реализуемому без операции идеального дифференцирования [15, 16]. В результате уравнения замкнутой системы для внутреннего контура можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 &= f_{\varphi}(x_2, x_3, x_4) + b_{\varphi}(x_2)u, \\ \mu_{\varphi}^2 \ddot{u} + d_{\varphi} \mu_{\varphi} \dot{u} &= k_{\varphi} [F_{\varphi}(x_2, x_4, \varphi^d) - \ddot{x}_2], \end{aligned}$$

где $F_{\varphi}(x_2, x_4, \varphi^d) = T_{\varphi}^{-2} [\varphi^d - x_2] - T_{\varphi}^{-1} a_{\varphi}^d x_4$.

Полагая, что μ_{φ} – малый параметр, и привлекая метод анализа свойств систем с разнотемповыми процессами [15, 16], можно получить из данной системы подсистему быстрых движений (ПБД)

$$\mu_{\varphi}^2 \ddot{u} + d_{\varphi} \mu_{\varphi} \dot{u} + k_{\varphi} b_{\varphi}(x_2)u = k_{\varphi} [F_{\varphi}(x_2, x_4, \varphi^d) - f_{\varphi}(x_2, x_3, x_4)],$$

где x_2, x_3, x_4, φ^d рассматриваются как постоянные величины на интервале времени переходных процессов ПБД, характеристический полином которой имеет вид $\mu_{\varphi}^2 s^2 + d_{\varphi} \mu_{\varphi} s + 1$. Коэффициент k_{φ} выбирается равным величине $b_{\varphi}^{-1}(x_2)$. Уравнения подсистемы медленных движений (ПМД) внутреннего контура имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= x_4, \\ \dot{x}_4 &= F_{\varphi}(x_2, x_4, \varphi^d). \end{aligned}$$

Подсистема имеет характеристический полином вида $T_{\varphi}^2 s^2 + a_{\varphi}^d T_{\varphi} s + 1$. Показатели качества формируемых переходных процессов по $\varphi(t)$ обеспечиваются выбором параметров T_{φ} , a_{φ}^d алгоритма управления.

При расчете второго контура управления перемещением тележки полагаем, что имеет место установившийся режим во внутреннем контуре регулирования, т. е. $\varphi = \varphi^d$, тогда для процесса перемещения тележки получаем упрощенную модель следующего вида:

$$\ddot{x}_1 = -g\varphi^d.$$

Во втором контуре регулирования используется алгоритм управления

$$\mu_x^2 \ddot{\varphi}^d + d_x \mu_x \dot{\varphi}^d = k_x \left\{ \frac{1}{T_x^2} [x^d - x_1] - \frac{1}{T_x} a_x^d x_3 - \ddot{x}_1 \right\},$$

который имеет такую же структуру, как и алгоритм управления внутреннего контура регулирования. Рассматривая μ_x как малый параметр и применяя аналогичную процедуру разделения движений, получаем подсистемы быстрых и медленных движений для второго контура:

$$\text{ПБД: } \mu_x^2 \ddot{\varphi}^d + d_x \mu_x \dot{\varphi}^d - k_x b_x(x_2) \varphi^d = k_x [F_x(x_1, x_3, x^d)],$$

$$\text{ПМД: } \dot{x}_1 = x_3, \quad \dot{x}_3 = F_x(x_2, x_4, \varphi^d),$$

где $F_x(x_1, x_3, \varphi^d) = T_x^{-2} [\varphi^d - x_1] - T_x^{-1} a_x^d x_3$, характеристические полиномы ПБД и ПМД внешнего контура имеют вид $\mu_x^2 s^2 + d_x \mu_x s + 1$ и $T_x^2 s^2 + a_x^d T_x s + 1$ соответственно. Коэффициент k_x выбирается равным величине $b_x^{-1}(x_2)$. Показатели качества формируемых переходных процессов по $x(t)$ обеспечиваются выбором параметров T_x, a_x^d в алгоритме управления внешнего контура.

3. ПРИМЕР ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В табл. 1 и 2 представлены параметры для моделирования системы «маятник–тележка» и параметры регуляторов, которые были выбраны в соответствии с представленной методикой синтеза.

Таблица 1

Параметры модели «маятник–тележка»

m , кг	M , кг	L , м	g , м/с ²	F_{mp}	J , кг·м ²
20 000	2000	20	9,8	0,15	0

При моделировании пренебрегаем массой подвеса, так как она намного меньше массы груза m , т. е. полагаем, что момент инерции $J = 0$.

С целью обеспечить условия разделения темпов переходных процессов во внутреннем и внешнем контурах управления параметрами регуляторов выбираются в соответствии с условием $\mu_\varphi \ll T_\varphi \ll \mu_x \ll T_x$.

Таблица 2

Параметры регуляторов

T_φ	μ_φ	a_φ	d_φ	k_φ	T_x	μ_x	a_x	d_x	k_x
0.1	0.05	2	2	-40 000	8	1	2	2	-0.1

На рис. 3. приведены результаты численного моделирования системы с регулятором по углу отклонения маятника от вертикальной оси и регулятором перемещения тележки в заданное положение x^d .

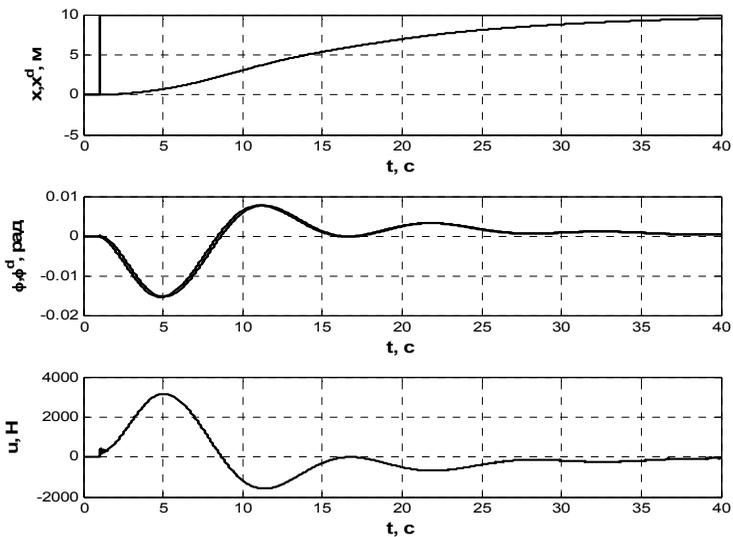


Рис. 3. Результаты численного моделирования системы управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена задача синтеза алгоритмов управления для системы перемещения груза порталным краном на основе системы «маятник–тележка». Выполнен синтез двухкаскадной системы регулирования, где в каждом каскаде используется модифицированная структура ПИД-регулятора, реализуемого без операции идеального дифференцирования. Параметры регуляторов выбираются на основе метода разделения движения. Результаты численного моделирования при различных значениях параметров груза и длины подвеса показали, что применение данной методики позволяет обеспечить формирование желаемых показателей качества переходных процессов в широком диапазоне изменений массы перемещаемого груза и длины подвеса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимьяк Р.П., Лецев В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем. – Одесса: СМИЛ, 2008. – 191 с.
2. Брусин В.А. Активное гашение колебаний и матричные уравнения // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 9. – С. 115–120.
3. Управление перемещением груза мостовым краном по методу обратных задач динамики / С.А. Кабанов, Е.Н. Никулин, Б.Э. Якушев, Д.Б. Якушева // Известия вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54, № 12. – С. 30–33.
4. Саблина Г.В. Об одном подходе к синтезу модельной системы «подвешенный груз» // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2014) : труды 12 международной конференции, Новосибирск, 2–4 октября 2014 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – Т. 7. – С. 68–71.
5. Fantoni I., Lozano R. Non-linear control for underactuated mechanical systems. – London; New York: Springer Science & Business Media, 2001. – 295 p.
6. Neusser Z., Valasek M. Control of the underactuated mechanical systems using natural motion // Kybernetika. – 2012. – Vol. 48, iss. 2. – P. 223–241.
7. Xu R., Ozguner U. Sliding mode control of a class of underactuated systems // Automatica. – 2008. – Vol. 44, iss. 1. – P. 233–241.
8. Колесников А.А. Метод синергетического синтеза системы управления колебаниями "перевернутого маятника на подвижной тележке" // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 6 (119). – С. 110–117.
9. Канатников А.Н., Крищенко А.П., Ткачев С.Б. Допустимые пространственные траектории беспилотного летательного аппарата в вертикальной плоскости // Наука и образование. – 2012. – № 3. – С. 1–15.

10. *Kochetkov S.A., Utkin V.A.* A trajectory stabilization algorithm for mobile robot // Proceedings of the 11th International Workshop on Variable Structure systems (VSS'2010), Mexico, 26–28 June 2010. – Piscataway, NJ: IEEE, 2010. – P. 121–127.
11. *Краснова С.А.* Каскадный синтез системы управления манипулятором с учетом динамики электроприводов // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 11. – С. 51–72.
12. *Геращенко Е.И., Геращенко С.М.* Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем. – М.: Наука, 1975. – 296 с.
13. *Уткин В.А., Уткин В.И.* Синтез инвариантных систем методом разделения движений // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 12. – С. 39–48.
14. *Квакернаак Х., Сиван Р.* Линейные оптимальные системы управления: пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
15. *Юркевич В.Д.* Синтез нелинейных нестационарных систем управления с разнотемповыми процессами. – Санкт-Петербург: Наука, 2000. – 287 с.
16. *Юркевич В.Д.* Расчет и настройка регуляторов для нелинейных систем с разнотемповыми процессами // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 24–31.

Рогова Наталья Сергеевна, магистрант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета по направлению «Управление в технических системах». Основные направления научных исследований: системы автоматического управления, робототехника, управление в механических системах, метод разделения движений в задачах управления. Имеет одну публикацию. E-mail: sosnovaya_4@mail.ru

Юркевич Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: системы автоматического управления, робототехника, метод разделения движений в задачах управления. Имеет более 200 публикаций. E-mail: yurkev@ac.cs.nstu.ru

Design of control for load movement by overhead crane*

N.S. Rogova¹, V.D. Yurkevich²

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master student. E-mail: sosnovaya_4@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor of the automation department. E-mail: yurkev@ac.cs.nstu.ru

Problem of a load movement is discussed where the load is attached like a pendulum to cart and an external force can push the cart along horizontal direction. Such problem is related with the huge set of mechanical systems, for example, overhead crane control operation, suppression of pendulum oscillations by the horizontal movement of the cart, etc. The following problems are discussed in the paper such as mathematical model of pendulum on the cart, control problem statement, and controller design methodology for providing movement of the load in the desired position and suppressing load oscillations simultaneously. Cascaded control system structure is proposed where modified proportional-integral-derivative controllers without ideal differentiation are used. Controller parameters are selected such that two-time-scale motions are artificially induced in the closed-loop system where the damping of fast transients yields the desired slow-motion behavior in accordance with prescribed performance specifications. Analysis of the closed-loop system properties is provided via method of time-scale separation. Numerical simulation is provided based on MatLab/Simulink Tools. Set of simulations are provided under wide range variations of lading weight and length of pendulum. From simulation results follow that the desired behavior of transients in the closed-loop system is provided in spite of lading weight and length of pendulum variations. The proposed controller design methodology can be applied of other examples of underactuated mechanical systems as well.

Keywords: nonlinear system, control system, PID control, pendulum, cart, control of portal crane, cascaded control system, suppression of load oscillations, time-scale separation method

DOI: 10.17212/2307-6879-2017-2-7-18

REFERENCES

1. Gerasimyak R.P., Leshchev V.A. *Analiz i sintez kranovykh elektromekhanicheskikh sistem* [Analysis and design of crane electromechanical systems]. Odessa, SMIL Publ., 2008. 191 p.
2. Brusin V.A. Aktivnoe gashenie kolebaniy i matrichnye uravneniya [Active damping of oscillations and matrix equations]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal – Soros Education Journal*, 2001, vol. 7, no. 9, pp. 115–120. (In Russian).

* Received 06 June 2017.

3. Kabanov S.A., Nikulin E.N., Yakushev B.E., Yakusheva D.B. Upravlenie peremeshcheniem gruzha mostovym kranom po metodu obratnykh zadach dinamiki [Control over load movement by bridge crane using the method of inverse problem of dynamics]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*, 2011, vol. 54, no. 12, pp. 30–33.
4. Sablina G.V. [An approach to design of “pendulum-load” system]. Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya (APEP-2014) : trudy 12 mezhdunarodnoy konferentsii [12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE-2014: Proceedings: in 7 vol.], Novosibirsk, Russia, 2–4 October 2014, vol. 7, pp. 68–71. (In Russian).
5. Fantoni I., Lozano R. *Non-linear control for underactuated mechanical systems*. London, New York, Springer Science & Business Media, 2001. 295 p.
6. Neusser Z., Valasek M. Control of the underactuated mechanical systems using natural motion. *Kybernetika*, 2012, vol. 48, iss. 2, pp. 223–241.
7. Xu R., Ozguner U. Sliding mode control of a class of underactuated systems. *Automatica*, 2008, vol. 44, iss. 1, pp. 233–241.
8. Kolesnikov A.A. Metod sinergeticheskogo sinteza sistemy upravleniya kolebaniyami "perevernutogo mayatnika na podvizhnoi telezhke" [Method of sinergetics synthesis of inverted pendulum on mobile cart oscillation control system]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Izvestiya Southern Federal University. Engineering sciences*, 2011, no. 6 (119), pp. 110–117.
9. Kanatnikov A.N., Krishchenko A.P., Tkachev S.B. Dopustimyye prostranstvennyye traektorii bespilotnogo letatel'nogo apparata v vertikal'noi ploskosti [Admissible spatial trajectories of the unmanned aerial vehicle in the vertical plane]. *Nauka i obrazovanie – Science and Education*, 2012, no. 3, pp. 1–15.
10. Kochetkov S.A., Utkin V.A. A trajectory stabilization algorithm for mobile robot. *Proceedings of the 11th International Workshop on Variable Structure systems (VSS'2010)*, Mexico, 26–28 June 2010, pp. 121–127.
11. Krasnova S.A. Kaskadnyi sintez sistemy upravleniya manipulyatorom s uchedom dinamiki elektroprivodov [Cascade design of a manipulator control system with consideration for dynamics of electric drives]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 2001, no. 11, pp. 51–72. (In Russian).
12. Gerashchenko E.I., Gerashchenko S.M. *Metod razdeleniya dvizhenii i optimizatsiya nelineynykh sistem* [Method of time-scale separation and optimization of nonlinear systems]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 296 p.
13. Utkin V.A., Utkin V.I. Sintez invariantnykh sistem metodom razdeleniya dvizhenii [Design of invariant systems by the method of separation of motions]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 1983, no. 12, pp. 39–48.

14. Kwakernaak H., Sivan R. *Linear optimal control systems*. New York, Wiley Interscience, 1972 (Russ. ed.: Kvakernaak Kh., Sivan R. *Lineinye optimal'nye sistemy upravleniya*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1977. 650 p.).

15. Yurkevich V.D. *Sintez nelineinykh nestatsionarnykh sistem upravleniya s raznotempovymi protsessami* [Design of two-time-scale nonlinear time-varying control systems]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000. 287 p.

16. Yurkevich V.D. Calculation and tuning of controllers for nonlinear systems with different-rate processes. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, vol. 48, iss. 5, pp. 447–453. doi: 10.3103/S8756699012050032. Translated from *Avtometriya*, 2012, vol. 48, no. 5, pp. 24–31.