

УДК 681.51

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ С РЕЦИКЛОМ*

*Мышляев Л.П.¹, д.т.н., профессор кафедры автоматизации
и информационных систем (nicsu@ngs.ru)**Циряпкина А.В.¹, аспирант кафедры автоматизации и информационных систем**Ивушкин К.А.², к.э.н., заместитель генерального директора**Киселев С.Ф.¹, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем*¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)² ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой»
(654034, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, шоссе Кузнецкое, 9)

Аннотация. В статье рассматривается вопрос управления объектами с положительной обратной связью или с рециклом. Введение положительных обратных связей в объекты управления различной природы придает им качественно новые свойства и существенно изменяет динамику поведения, что требует особого подхода в вопросах регулирования. Приведена классификация объектов с рециклом с выделением четырех типов: рецикл «по концентрации», «по массе», «по массе и по концентрации», а также объекты с «координатными и параметрическими воздействиями рецикла». Описана структура модели объекта с рециклом для первых трех классов в общем виде. Приведена система регулирования для объектов с рециклом «по массе» и система координатно-параметрического управления для объекта с рециклом. Представлены результаты аналитического и численного исследований, результаты анализа эффективности систем регулирования, а также графики переходных процессов «по возмущению» и «по заданию».

Ключевые слова: объект управления, положительная обратная связь, объект с рециклом, система автоматического регулирования, координатное управление, параметрическое управление.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-381-385

Введение положительных обратных связей в объекты управления (объекты с рециклом) различной природы придает им качественно новые свойства и существенно изменяет динамику поведения. Примерами таких объектов могут служить процессы окомкования материалов для получения окатышей и агломерата в металлургической промышленности: замкнутые водношламовые системы обогащения полезных ископаемых, социально-экономические системы при постоянном выделении организации материальных и финансовых средств в зависимости от результатов деятельности; процессы образования фрактальных структур материалов [1 – 6].

Математические модели объектов с рециклом в пространстве состояний в достаточно общем виде описываются выражениями

$$X(t) = A(t)X(t - \tau_x) + B(t)U(t - \tau_u) + C(t)W(t - \tau_w);$$

$$Y(t) = D(t)Y(t - \tau_y) + F(t)E(t - \tau_e),$$

где X , U , W , Y и E – векторы состояний, управления, внешних воздействий, выходов и погрешностей измерений; τ_x , τ_u , τ_w , τ_y , τ_e – соответствующие времена запаздывания; $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$, $F(t)$ – матрицы соответствующих размерностей; t – непрерывное время.

Объекты с рециклом можно разделить на следующие классы.

1. Объекты с рециклом «по концентрации» (по терминологии [5]), когда соотношение расходов материалов (энергии, финансовых средств) прямой цепи и цепи рецикла фиксировано, а показатели (температура и пр.) материала изменяются. В этом случае матрица $A(t)$ не зависит от состояния $X(t)$ и $D(t) = 1$.

2. Объекты с рециклом «по массе», когда за выходное воздействие принимается часть материала (готовой продукции), поступающей на выход объекта, а другая часть материала поступает в цепь рецикла. Соотношение этих частей может изменяться в зависимости от внешних условий, состояний, агрегатов и т.д. и, как правило, специально не контролируется. В этом случае матрица $A(t)$ зависит от состояния $X(t)$ и $D(t) \neq 1$.

3. Объекты с рециклом «по концентрации» и «по массе», объединяющие первые два класса.

4. Объекты, в которых рецикл влияет на характеристики отдельных их составляющих. В этом случае матрицы $B(t)$ и $C(t)$ зависят от состояния $X(t)$.

При рассмотрении возмущенного (в отклонении от опорного) движения [7] структура модели объекта с рециклом для классов объектов 1 – 3 имеет вид, представленный на рис. 1.

* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту № 15-07-01972.

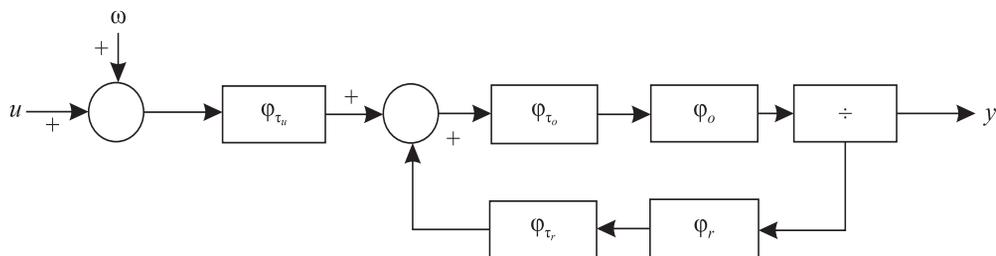


Рис. 1. Структура модели объекта с рециклом:

u, w и y – управляющее, приведенное к управляющему входу неконтролируемое возмущение и выходное воздействие; Φ_o и Φ_r – операторы прямой цепи и рецикла без учета запаздывания; $\Phi_{\tau_u}, \Phi_{\tau_o}$ и Φ_{τ_r} – операторы запаздывания в управлении, прямой цепи (состоянии) и рецикле; \div – блок деления

Fig. 1. The structure of model of object with recycle:

u, w, y – controlling action, controlling input disturbance and output action; Φ_o, Φ_r – direct circuit operators with and without time lag; $\Phi_{\tau_u}, \Phi_{\tau_o}, \Phi_{\tau_r}$ – control time lag operator, direct circuit time lag operator and recycling time lag operator; \div – dividing block

Для объектов первого класса синтезирована система регулирования с компенсацией эффектов действия рецикла Φ_r, Φ_{τ_r} и элементов запаздывания $\Phi_{\tau_u}, \Phi_{\tau_o}$. Операторная зависимость выходного воздействия y от входных воздействий u и w для этих систем имеет вид

$$y(S) = \frac{A(S)B(S)w(S) + \Phi_{\tau_o}^M(S) \left[1 - \Phi_{\tau_o}(S)\Phi_o(S)\Phi_{\tau_r}(S)\Phi_r^M(S) \right] B(S) + A(S)f_{\tau_u+\tau_o}(S)f(S)y^*(S)}{\Phi_{\tau_o}^M(S) \left[1 - \Phi_{\tau_o}(S)\Phi_o(S)\Phi_{\tau_r}(S)\Phi_r^M(S) \right] B(S) + \Phi_{\tau_u+\tau_o}(S)\Phi_o(S)\Phi_{\tau_r}^M(S)B(S)};$$

$$A(S) = \Phi_{\tau_u+\tau_o}(S)\Phi_{\tau_u}^M(S)\Phi_o(S);$$

$$B(S) = 1 + f(S)\Phi_{\tau_o}(S) \left[1 - f_{\tau_u+\tau_o}(S)\Phi_{\tau_u+\tau_o}(S) \right], \quad (1)$$

где $f(S)$ – оператор регулирующего блока; $f_{\tau_u+\tau_o}(S)$ – оператор экстраполяции.

При адекватности модели объекту характеристическое уравнение выражения (1)

$$1 + \Phi_o(S)f(S) = 0 \quad (2)$$

не содержит операторов запаздывания и рецикла, и синтез оператора $f(S)$ осуществляется как для объекта $\Phi_o(S)$. Полученная система содержит как частные случаи системы регулирования Смита, Ресвика [8], а также системы с типовыми законами регулирования.

Для второго класса объектов с рециклом методом эквивалентных преобразований [9, 10] синтезирована система управления, представленная на рис. 2, где знаком « \times » обозначен оператор умножения, а « Σ » – суммирование.

В этой системе оперативно оценивается величина α – соотношение между выходным воздействием объекта y и воздействием y_r , поступающим на вход рецикла. Эта величина в последующем учитывается при выработке управляющего воздействия.

Аналитические и численные исследования системы управления рис. 2 в сопоставлении с системой с типо-

выми законами регулирования проведены для объекта, в котором оператор $\Phi_o(S)$ задается звеном с самовыравниванием и без самовыравнивания. В результате получены следующие выводы.

1. Для объектов с самовыравниванием

- система управления рис. 2 остается устойчивой при любых соотношениях τ_r/τ_o , система с типовым законом регулирования становится устойчивой только при достижении τ_r/τ_o величины 38;
- для устойчивых систем во всем исследуемом диапазоне соотношений τ_r/τ_o система рис. 2 превосходит по точности систему с типовым законом регулирования.

2. Для объектов без самовыравнивания

- система управления рис. 2 остается устойчивой при любых соотношениях τ_r/τ_o , система с типовым законом регулирования не устойчива при любых соотношениях τ_r/τ_o .

3. Системы регулирования объекта с рециклом «по массе» устойчивы только при $\alpha > 0,5$.

Примером модели четвертого класса объектов могут служить зависимости, отражающие динамику преобразований внешних и управляющих воздействий:

$$y(t) = y_k(t) + y_p(t) + \omega(t);$$

$$T_k(u_p, t) \frac{dy_k(t)}{dt} + y_k(t) = k_k(u_p, t)u_k(t - \tau_k);$$

$$T_p \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = k_p u_p(t - \tau_p);$$

$$T_k(u_p, t) = T_k^* + \alpha u_p(t);$$

$$k_k(u_p, t) = k_k^* + \alpha u_p(t),$$

где $y(t)$ – выходное воздействие; $y_k(t)$ – выходное воздействие объекта под влиянием координатного управляющего воздействия; $y_p(t)$ – выходное воздействие объекта под влиянием параметрического управляющего воздействия; $\omega(t)$ – приведенное к выходу объекта управления неконтролируемое возмущающее воздей-

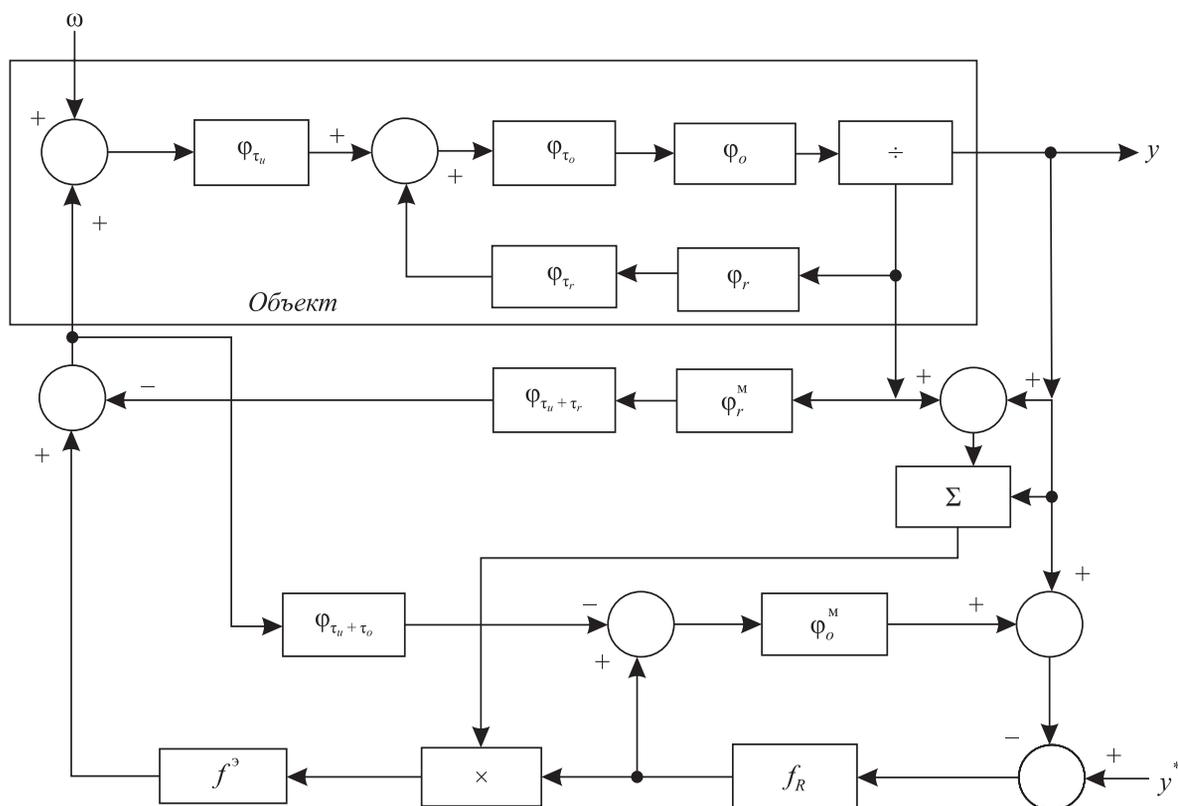


Рис. 2. Система регулирования объектов с рециклом «по массе»

Fig. 2. Weight control system of objects with recycle

стве; $u_k(t)$ – координатное управляющее воздействие; $u_p(t)$ – параметрическое управляющее воздействие; α – величина доли готового продукта, возвращаемого в объект управления по цепи рецикла; T_k^* , k_k^* и T_k , k_k – базовые и расчетные значения постоянной времени и коэффициента усиления; τ_k и τ_p – запаздывание в канале координатного и параметрического управления.

Рациональная структура системы управления такого рода объектами содержит контуры координатного и параметрического управления, а также блоки адаптации параметров законов управления этих контуров. Один из вариантов подобной системы управления представлен на рис. 3.

Численные исследования данной системы проведены для следующих условий:

- при работе системы задействован только контур координатного управления, контур параметрического управления и блок адаптации выключены;
- при работе системы задействованы контуры координатного и параметрического управления, блок адаптации выключен;
- при работе системы задействованы контуры координатного и параметрического управления; в блоке адаптации выполняется корректировка текущих значений коэффициентов моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий.

Пример переходного процесса «по возмущению» ($w = 1$) и «по заданию» ($w = 0$) представлен на рис. 4.

Введение в систему контура параметрического управления в дополнение к контуру координатного управления с корректировкой коэффициентов используемых моделей приводит к улучшению качества регулирования не менее чем на 25 %.

Выводы. Дана классификация объектов с рециклом с выделением рециклов «по концентрации», «по массе», с «координатными и параметрическими воздействиями рецикла». Для каждого класса объектов разработаны системы управления, эффективность которых подтверждена аналитическими и численными исследованиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пайтген Х.О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 176 с.
2. Старовацкая С.Н., Циряпкина И.В., Мышляев Л.П. Методы идентификации структур материалов фракталами // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. № 3. Т. 11. С. 290 – 293.
3. Starovackaya S.N., Myshlyayev L.P., Tsiryapkina I.V. Materials structure description by fractal complex // External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys: Book of the International seminar articles, 1 – 7 October 2014, Siberian State Industrial University / Gromov V. ed. – Novokuznetsk: Publishing Center SibSIU, 2014. P. 348.

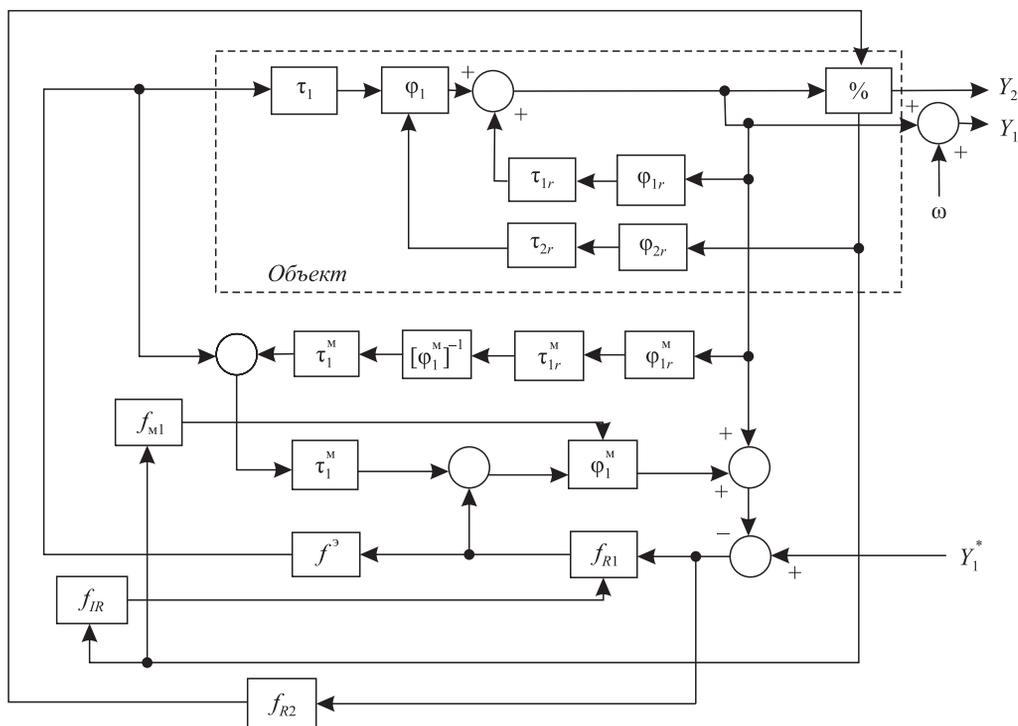


Рис. 3. Система координатно-параметрического управления объекта с рециклом:

Y_1 – выходное воздействие объекта под влиянием координатного управляющего воздействия; Y_2 – выходное воздействие объекта под влиянием параметрического управляющего воздействия; $f_{R1}, f_{R2}, f_{IM}, f_{IR}$ – операторы регуляторов координатного и параметрического контура, блоков адаптации оператора f_{R1} и модели ϕ_1^M

Fig. 3. Coordinate-parametric control system of object with recycle:

Y_1 – output action of the object under the influence of coordinate controlling action; Y_2 – output action of the object under the influence of parametric controlling action; $f_{R1}, f_{R2}, f_{IM}, f_{IR}$ – operators of: coordinate and parametric circuit controllers, adaptation block f_{R1} operator and ϕ_1^M model operator

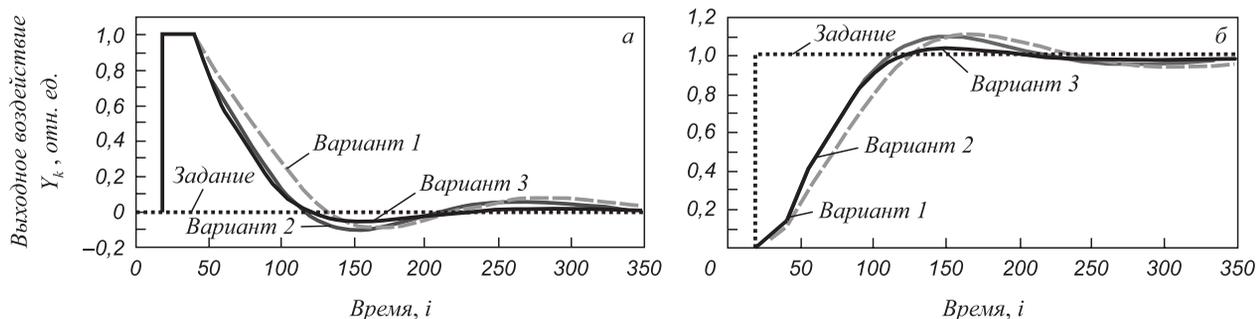


Рис. 4. Переходные процессы «по возмущению» (а) и «по заданию» (б)

Fig. 4. The transient processes of “for disturbance” (a) and “on the job” (б)

4. Kiseleva M.Y., Smagin V.I. Model predictive control for discrete systems with state and input delays / Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 1. С. 5 – 12.
5. Sim T.P., Hong G.S., Lim K.B. Modified Smith predictor with dementhon-horaud pose estimation algorithm for 3D visual servoing. – Robotica: Cambridge University Press, 2002, no. 2, pp. 615 – 624.
6. Li Yi, Ko King-Tim, Chen Guanrong A Smith predictor based PI-controller for active queue management / IEICE Transactions on communications // Oxford University Press, 2005, no. 11, pp. 42 – 93.
7. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
8. Летов А.М. Динамика полета и управление. – М.: Наука, 1969. – 360 с.
9. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
10. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: Монография в 3-х т. Т. 2. Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин и др.; Под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.

Поступила 5 февраля 2015 г.

MANAGEMENT OF OBJECTS WITH RECYCLE

Myshlyayev L.P.¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Automation and Information Systems” (nicsu@ngs.ru)

Tsiryapkina A.V.¹, Postgraduate, Junior Researcher of the Chair “Automation and Information Systems”

Ivushkin K.A.², Cand. Sci. (Economics), Deputy General Director

Kiselev S.F.¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Automation and Information Systems”

¹ **Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

² **LLC United Company “Sibshahtostroy”** (9, Kuznetskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654034, Russia)

Abstract. The article discusses the management of objects with positive feedback or recycles. Introduction of positive feedbacks in the management objects of different nature gives them qualitatively new properties and change significantly the dynamics of behavior that requires a special approach in the regulation. There is classification of recycle objects with the release of four types: recycle under “concentration”, “weight”, “weight and concentration”, as well as objects with “coordinate and parametric effect recycles”. The authors describe the structure of the object model to recycle for the first three classes in general. The control system for objects recycle under “weight” and the system of coordinate-parametric control object recycle are shown. The results of analytical and numerical studies, the results of the analysis of the effectiveness of control systems, as well as graphics transients under “feedforward control” and “target control” are represented in the paper.

Keywords: control object, positive feedback, object with recycle, automatic control systems, coordinate control, parameter control.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-381-385

REFERENCES

1. Peitgen Heinz-Otto, Richter Peter H. *The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986. (Russ.ed.: Peitgen H., Richter P. *Krasota fraktalov. Obrazy kompleksnykh dinamicheskikh system*. Moscow: Mir, 1993. 176 p.)
2. Starovatskaya S.N., Tsiryapkina I.V., Myshlyayev L.P. Identification methods of material structures with fractals. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya*. 2014, no. 3, vol. 11, pp. 290–293. (In Russ.)
3. Starovatskaya S.N., Myshlyayev L.P., Tsiryapkina I.V. *Materials structure description by fractal complex. External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys: Book of the International seminar articles, 1 – 7 October 2014, Siberian State Industrial University*. Gromov V. ed. Novokuznetsk: Publishing Center SibSIU, 2014, p. 348.
4. Kiseleva M.Y., Smagin V.I. Model predictive control for discrete systems with state and input delays. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2011, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.)
5. Sim T.P., Hong G.S., Lim K.B. Modified Smith predictor with dementhon-horad pose estimation algorithm for 3D visual servoing. – *Robotica: Cambridge University Press*, 2002, no. 2, pp. 615–624.
6. Li Yi, Ko King-Tim, Chen Guanrong A Smith predictor based PI-controller for active queue management / *IEICE Transactions on communications. Oxford University Press*, 2005, no. 11, pp. 42–93.
7. Ray W. Harmon. *Advanced process control*. McGraw-Hill, New York etc. 1981, 326 p. (Russ.ed.: Ray W. *Metody upravleniya tekhnologicheskimi protsessami*. Moscow: Mir, 1983. 368 p.)
8. Letov A.M. *Dinamika poleta i upravlenie* [Flight dynamics and control]. Moscow: Nauka, 1969. 360 p. (In Russ.)
9. Guretskii Kh. *Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniem* [Analysis and synthesis of control system with the lagging]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 328 p. (In Russ.)
10. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., G.P. Sazykin etc. *Sistemy avtomatizatsii na osnove naturno-model'nogo podkhoda: Monografiya v 3-kh t. T. 2. Sistemy avtomatizatsii proizvodstvennogo naznacheniya* [Automation systems on the basis of a full-scale model approach: Monography in 3 volumes. Vol. 2. Commercial automation systems]. Myshlyayev L.P. ed. Novosibirsk: Nauka, 2006. 483 p. (In Russ.)

Acknowledgements. The work was supported by the grant of RFBR according to the project no. 15-07-02231.

Received February 5, 2015