

УДК 681.51

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С РЕЦИКЛОМ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ МОДЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ САР ЭТИХ ОБЪЕКТОВ\*

**Циряпкина А.В.<sup>1</sup>**, аспирант кафедры автоматизации и информационных систем (asya1990\_90@mail.ru)

**Мышляев Л.П.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных систем

**Ивушкин К.А.<sup>2</sup>**, к.э.н., заместитель генерального директора

**Грачев В.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

<sup>2</sup> ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой»

(654034, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, Кузнецкое шоссе, 9)

**Аннотация.** Работа посвящена управлению объектами с рециклом. Приведена классификация объектов с рециклом с выделением четырех типов: рецикл «по концентрации», «по массе», «по параметрам», «комбинированный». Для первых трех классов объектов представлены структуры систем автоматического регулирования, проведен анализ влияния неопределенности моделей на эффективность работы этих систем. Для объектов с рециклом «по концентрации» проведен анализ системы автоматического регулирования для объекта без самовыравнивания в прямой цепи и с самовыравниванием; для объектов с рециклом «по массе» и «по параметрам» проведен анализ системы автоматического регулирования для объекта без самовыравнивания в прямой цепи. Получены численные оценки зависимостей критерия эффективности от величины соотношения параметров (коэффициент передачи и постоянная времени) модели объекта и объекта управления для всех случаев.

**Ключевые слова:** объект управления, объект с рециклом, система автоматического регулирования, классификация объектов с рециклом, неопределенность модели.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-925-931

Управлению объектами с рециклом уделяется все больше внимания, так как именно такие объекты в большей мере удовлетворяют современным технологическим, экологическим и экономическим требованиям [1 – 7]. Основная часть работ по этой тематике посвящена только построению систем регулирования одним классом объектов с рециклом – рециклом «по концентрации» – без детального анализа их эффективности [8 – 11]. В работе [12] рассматриваются объекты с рециклом не только «по концентрации», но и «по массе», и предлагаются варианты систем регулирования. В настоящем исследовании дается более полная классификация объектов с рециклом и проводится анализ влияния погрешностей определения коэффициентов моделей объектов на показатели эффективности САР.

В общем виде модель возмущенного движения объекта с рециклом может быть представлена выражениями [13]

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t - \tau_x) + B(t)U(t - \tau_u) + C(t)W(t - \tau_w),$$

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

где  $X$ ,  $U$ ,  $W$ ,  $Y$  и  $E$  – векторы состояний, управления, внешних воздействий, выходов и погрешностей измерений;  $\tau_x$ ,  $\tau_u$ ,  $\tau_w$ ,  $\tau_y$ ,  $\tau_e$  – соответствующие времена запаздывания;  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$ ,  $D(t)$ ,  $F(t)$  – матрицы соответствующих размерностей;  $t$  – непрерывное время.

Для объектов с рециклом предложена классификация, представленная в таблице.

**Постановка задачи №1.** Анализ влияния неопределенности модели объекта на показатели качества регулирования САР с модельной компенсацией цепи рецикла с самовыравниванием в прямой цепи и без самовыравнивания.

**Дано:**

1. Структура САР объектом с рециклом «по концентрации» с модельной компенсацией цепи рецикла (рис. 1);
2. Операторы САР

$$\text{а) } \varphi_0(S) = \frac{k_0}{T_0 S + 1}; \quad \varphi_0^M(S) = \frac{k_0^M}{T_0^M S + 1};$$

$$\text{б) } \varphi_0(S) = \frac{k_0}{S}; \quad \varphi_0^M(S) = \frac{k_0^M}{S}; \quad \varphi_r(S) = \frac{k_r}{T_r S + 1};$$

$$\varphi_r^M(S) = \frac{k_r^M}{T_r^M S + 1},$$

\* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту №15-07-02231.

**Классификация объектов с рециклом**

**Classification of objects with recycle**

Класс объекта с рециклом	Структура модели объекта
1. Объекты с рециклом «по концентрации» [13], когда все расходы материала фиксированы, а концентрация элементов, температура материала и др. изменяется. 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 $A(t)$ не зависит от состояния $X(t)$ , и $D(t) \neq 1$ .	
3. Объекты, в которых рецикл влияет на параметры отдельных их составляющих – рецикл «по параметрам». В этом случае матрицы $B(t)$ и $C(t)$ зависят от состояния $X(t)$ .	
4. Комбинированные объекты с рециклом, объединяющие первые три класса.	

где  $k_0, k_r, T_0, T_r, k_0^M, k_r^M, T_0^M, T_r^M$  – коэффициенты передачи натурального объекта, постоянные времени натурального объекта, коэффициенты передачи модели, постоянные времени модели соответственно;  $f_r(S) = \left( k_p + \frac{1}{T_i S} \right)$  – пропорционально-интегральный закон регулирования [11];  $f_s(S)$  – оператор «сдвигки»;

3. Вариации отношений  $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$  в диапазоне [0,8; 1,2];

4. Критерий эффективности САР:

$$q(T) = \frac{1}{T} \int_0^{t+T} |y^*(\theta) - y(\theta)| d\theta,$$

где  $T$  – время переходного процесса.

**Требуется:** оценить влияние изменения значений отношений  $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$  на эффективность работы САР объектов с рециклом «по концентрации» для объектов с самовыравниванием и без самовыравнивания в прямой цепи<sup>1</sup>.

Переход от операторов  $\Phi_0, \Phi_r, \Phi_{\tau_u}, \Phi_{\tau_0}, \Phi_{\tau_r}$  к рекуррентно-разностной форме сделан методом конечных разностей. Программирование осуществлено в системе Microsoft Office Excel.

<sup>1</sup> Не рассматривается изменение соотношений времен запаздываний в прямой цепи и цепи рецикла.

Результаты численных исследований САР для объекта с самовыравниванием в прямой цепи в виде графиков зависимостей критерия эффективности  $Q$  от соотношений параметров представлены на рис. 2, а, для объекта без самовыравнивания – на рис. 2, б.

*Постановка задачи № 2. Анализ влияния неопределенности модели объекта на показатели качества регулирования САР объектов с рециклом «по массе».*

**Дано:**

1. Структура САР объектом с рециклом «по массе» (рис. 3) [14];

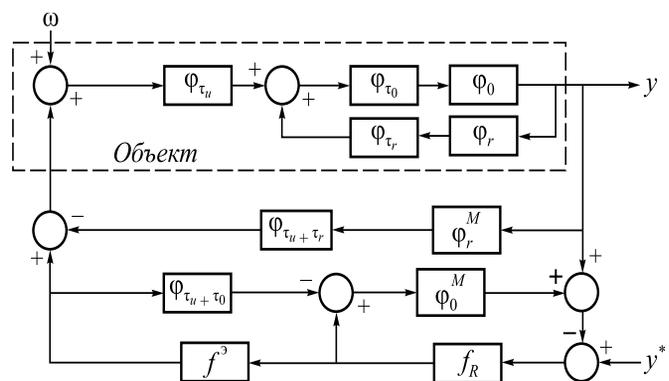


Рис. 1. САР объекта с рециклом «по концентрации»

Fig. 1. ACS of recycle objects “by concentration”

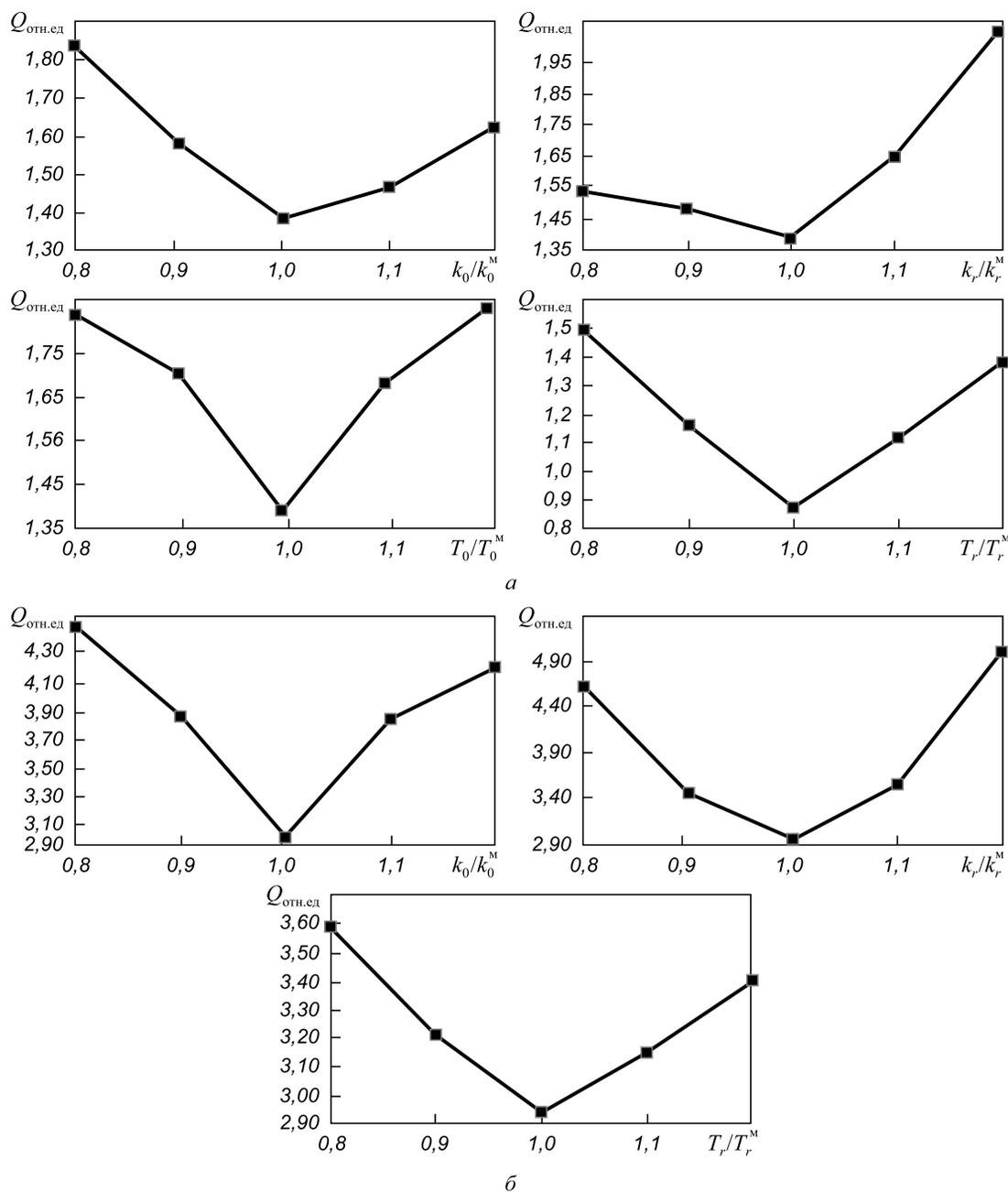


Рис. 2. Зависимость критерия  $Q$  от соотношений параметров модели и объекта управления САР объекта:  $a$  – с самовыравниванием в прямой цепи;  $b$  – без самовыравнивания

Fig. 2. Dependence of  $Q$  criteria on parameters ratio of the model and the control objects of ACS of the object:  $a$  – with self-regulation in a straight chain;  $b$  – without self-regulation

2. Операторы САР – те же, что для постановки задачи № 1 (только  $a$ );

3. Значение блока деления объекта управления:  $\alpha(i) = 0,7$ ;

4. Вариации соотношений  $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$  в диапазоне  $[0,8; 1,2]$ ;

5. Критерий эффективности САР:

$$q(T) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |y^*(\theta) - y(\theta)| d\theta,$$

**Требуется:** оценить влияние изменения значений соотношений  $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$  на эффективность работы САР объектов с рециклом «по массе» для объектов с самовыравниванием в прямой цепи.

Численное моделирование осуществлялось при тех же условиях, что и в предыдущей задаче. Результаты численных исследований САР объекта с рециклом «по массе» в виде графиков зависимостей критерия эффективности  $Q$  от соотношений параметров представлены на рис. 4.

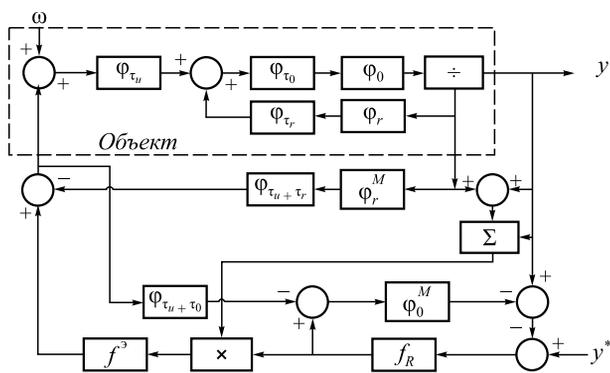


Рис. 3. САР объекта с рециклом «по массе»

Fig. 3. ACS of the recycle object “by the weight”

*Постановка задачи № 3. Анализ влияния неопределенности модели объекта на показатели качества регулирования САР объектов с рециклом «по параметрам».*

**Дано:**

1. Структура САР объектом с рециклом «по параметрам» (рис. 5) [15];
2. Операторы САР – такие же, что и при постановке задачи № 2;
3. Вариации отношений  $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$  в диапазоне [0,8; 1,2];
4. Критерий эффективности САР:

$$q(T) = \frac{1}{T} \int_0^{t+T} |y^*(\theta) - y(\theta)| d\theta.$$

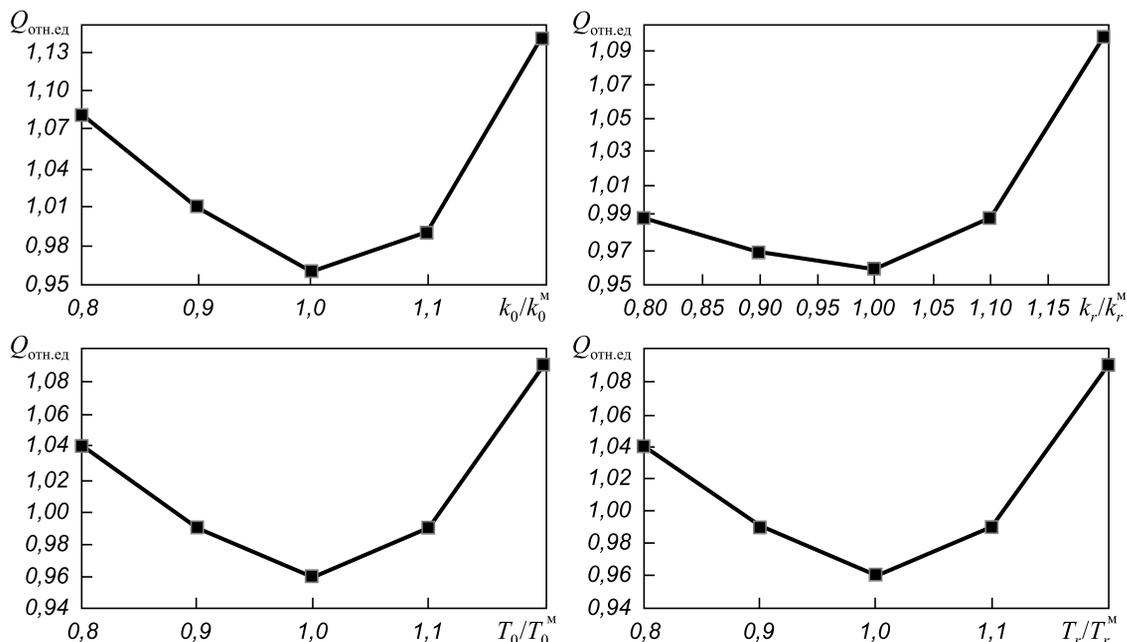


Рис. 4. Зависимость критерия эффективности  $Q$  от соотношений параметров модели и объекта управления САР объекта с рециклом «по массе»

**Требуется:** оценить влияние изменения значений отношений  $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$  на эффективность работы

САР объектов с рециклом «по параметрам» для объектов с самовывравниванием в прямой цепи.

Численное моделирование осуществлялось при тех же условиях, что и в предыдущих задачах. Результаты численных исследований САР объекта с рециклом «по параметрам» в виде графиков зависимостей критерия эффективности  $Q$  от соотношений параметров представлены на рис. 6.

**Выводы.** САР объекта с рециклом «по концентрации», «по массе» и «по параметрам» устойчивы при любых отношениях  $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$ ; наилучший показатель эффективности работы САР достигается при значениях этих отношений, равных единице, т.е. в том случае, когда модель объекта адекватна объекту управления. Полученные результаты можно использовать при уточнении настроечных коэффициентов регулирования.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Утеуш Э.В., Утеуш З.В. Управление измельчительными агрегатами. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
2. Амелин А.Г., Яшке Е.В. Производство серной кислоты. – М.: Высшая школа, 1980. – 245 с.
3. Хайниш С.В. Об оптимальном управлении объектами с замкнутым циклом: Сб. «Управление сложными системами». – М.: ИАТ, 1974. С. 42 – 55.
4. Нагиев М.Ф. Теоретические основы рециркуляционных процессов в химии. – М.: Наука, 1962. – 322 с.

Fig. 4. Dependence of efficiency criterion  $Q$  on parameters ration of the model and the control object of ACS of the recycle object “by the weight”

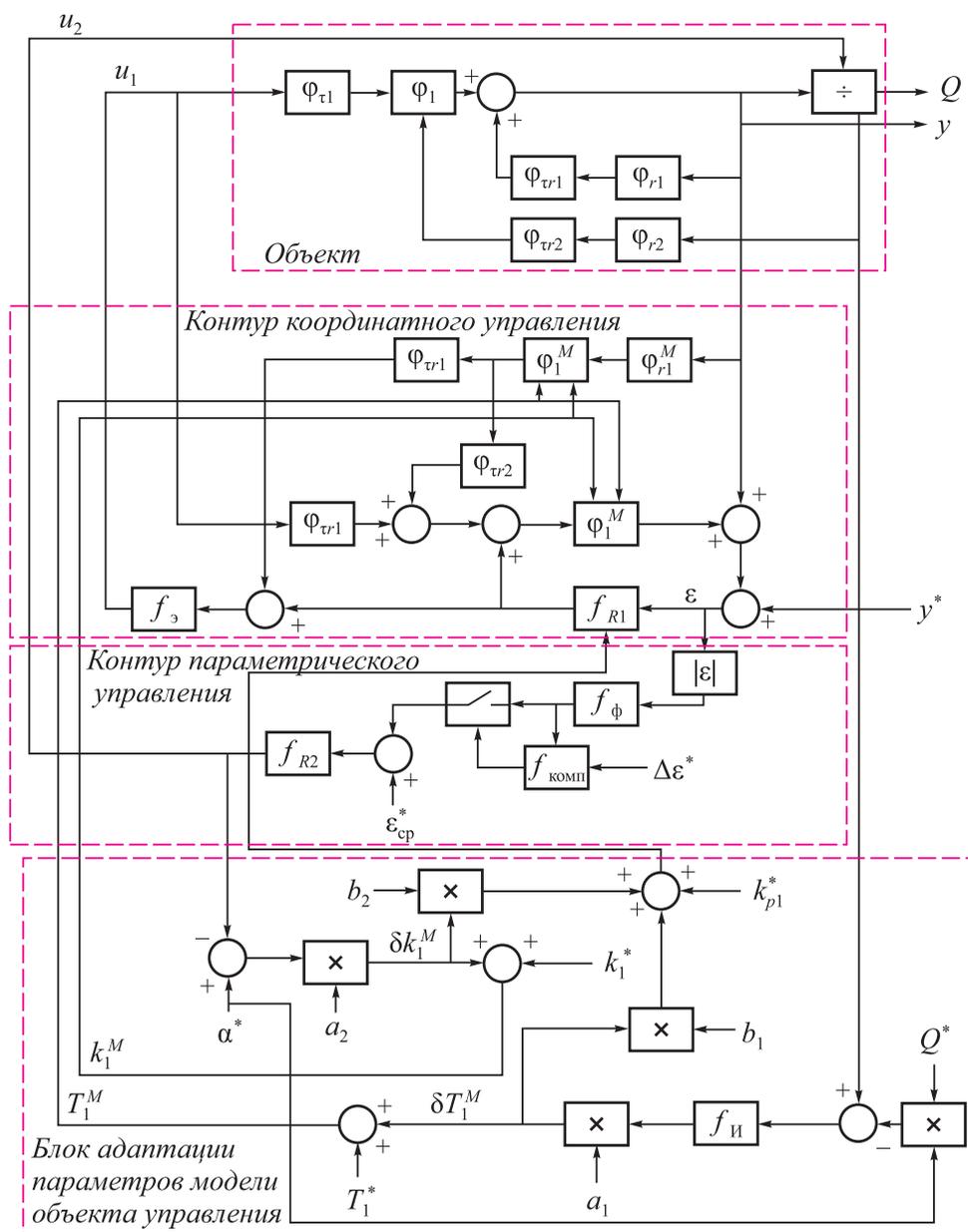


Рис. 5. САР объекта с рециклом «по параметрам»:

$f_{r1}$  и  $f_{r2}$  – первый и второй регулирующий блоки;  $f_3$  – блок экстраполяции;  $f_{\phi}$  – блок фильтрации;  $f_{\text{и}}$  – интегратор;  $f_{\text{комп}}$  – компаратор;  $|\varepsilon|$  – блок расчета модуля ошибки регулирования;  $\times$  – блок умножения;  $Q$  – выходные воздействия (расход готового продукта, поступающего на выход объекта управления);  $Q^*$  – базовая величина расхода готового продукта;  $\alpha^*$ ,  $k_1^*$ ,  $T_1^*$ ,  $k_{p1}^*$  – базовые значения параметров системы;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , – задаваемые константы, рассчитываемые исходя из параметров конкретного технологического объекта

Fig. 5. ACS of the recycle object “by the parameters”:

$f_{r1}$  and  $f_{r2}$  – the first and the second controlling blocks;  $f_3$  – extrapolation block;  $f_{\phi}$  – filtration block;  $f_{\text{и}}$  – integrator;  $f_{\text{комп}}$  – comparator;  $|\varepsilon|$  – calculation block of control error module;  $\times$  – multiplication block;  $Q$  – output actions (end product consumption, going into the withdrawal of the control object);  $Q^*$  – baseline flow rate value of the end product;  $\alpha^*$ ,  $k_1^*$ ,  $T_1^*$ ,  $k_{p1}^*$  – baseline values of system parameters;  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , – the driven constants, calculated in terms of the parameters of the concrete technological object

- Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием. – М: Наука, 1978. – 416 с.
- Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
- Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода 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.
- Дылевский А.В., Лозгачев Г.И. Построение регулятора для объекта с распределенными параметрами по передаточной функции замкнутой системы // Вестник ВГУ. Серия физика, математика. 2004. № 2. С. 154 – 157.
- Дылевский А.В., Лозгачев Г.И., Малютин В.С. Синтез модального регулятора для объекта с распределенными параметрами // Вестник ВГУ. 2007. № 1. С. 128 – 132.
- 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. № 11. P. 42 – 93.

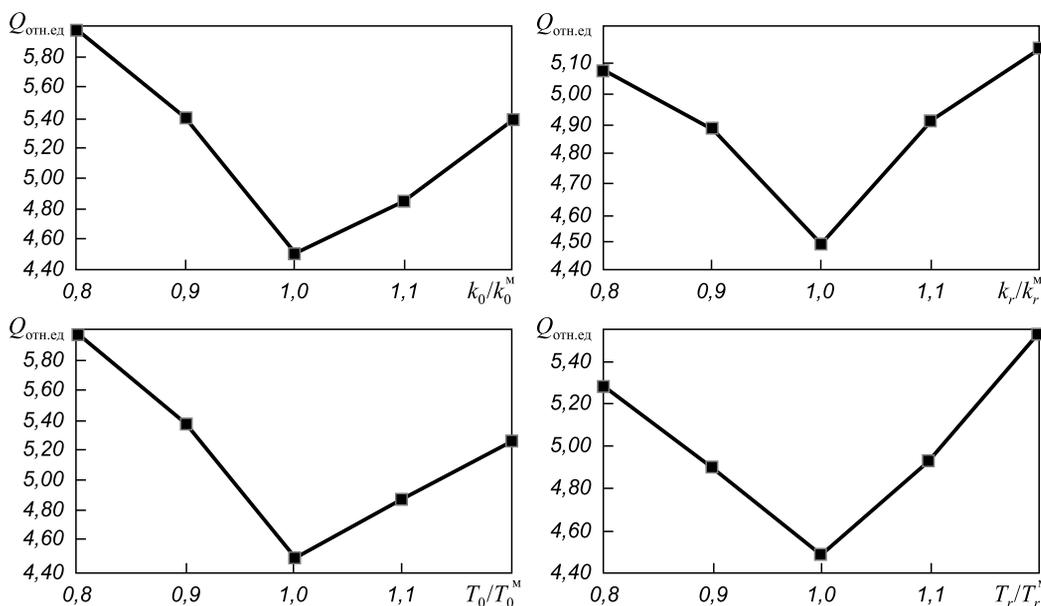


Рис. 6. Зависимость критерия эффективности  $Q$  от соотношений параметров модели и объекта управления САР объекта с рециклом «по параметрам»

Fig. 6. Dependence of efficiency criterion  $Q$  on parameters ration of the model and the control object of ACS of the recycle object “by the parameters”

11. Еремин Е.Л., Леянов Б.Н., Шеленок Е.А. Дискретные алгоритмы робастного управления нелинейно-нестационарным объектом в периодических режимах // Вестник ТОГУ. 2010. № 1 (16). С. 45 – 54.
12. Мышляев Л.П., Циряпкина А.В., Ивушкин К.А., Киселев С.Ф. Управление объектов с рециклом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58, № 5. С. 381 – 385
13. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
14. Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Венгер К.Г. и др. Система регулирования объекта с рециклом // Бюл. евразийского патентного ведомства 021192 В1, № 2011130360/08 G05B13/00.
15. Пат. 2542910 РФ. Система регулирования объекта с рециклом / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, К.А. Ивушкин, С.Ф. Киселев, А.В. Циряпкина; заявл. 19.03.2014; опубл. 27.02.2015. Бюл. № 6.

Поступила 5 октября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 12, pp. 925–931.

## CLASSIFICATION OF OBJECTS WITH RECYCLE AND IMPACT ANALYSIS OF MODELS UNCERTAINTY ON EFFECTIVE MANAGEMENT SYSTEMS OF THESE OBJECTS

*A.V. Tsiryapkina*<sup>1</sup>, Postgraduate, Junior Researcher of the Chair “Automation and Information Systems” (asya1990\_90@mail.ru)

*L.P. Myshlyaev*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Automation and Information Systems”

*K.A. Ivushkin*<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Econ.), Deputy General Director

*V.V. Grachev*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Automation and Information Systems”

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University (42, Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

<sup>2</sup>LLC United Company “Sibshahtostroy” (9, Kuznetskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 650341, Russia)

**Abstract.** The work is dedicated to the recycle object control. There is a classification of recycle objects with the release of four types: recycle “by the concentration”, “by the weight”, “by the parameters”, as well as “the combined recycle”. For the first three classes of objects the structure of automatic control systems was presented, the analysis of

the impact of uncertainty on the performance of the models of these systems was carried out. For recycle objects “by the concentration” the analysis of the automatic control system was done for an object without self-leveling in a straight chain with self-leveling; for the recycle objects “by the weight” and “by the parameters” the analysis of the automatic control system was carried out for an object without self-leveling in a straight chain. Numerical evaluation criterion of efficiency dependencies on the magnitude of the ratio parameters (gain and time constant) model of the object and the object of control for all occasions were received.

**Keywords:** control object, recycle object, automatic control system, classification of recycle objects, model uncertainty.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-12-925-931

### REFERENCES

1. Uteush E.V., Uteush Z.V. *Upravlenie izmel'chitel'nymi agregatami* [Control of chopping cutter]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 280 p. (In Russ.).
2. Amelin A.G., Yashke E.V. *Proizvodstvo sernoi kisloty* [Production of sulfuric acid]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 245 p. (In Russ.).

3. Khainish S.V. On the optimal control of the objects with closed cycle. In: *Sb. Upravlenie slozhnymi sistemami* [In: Control of complex systems]. Moscow: IAT, 1974, pp. 42–55. (In Russ.).
4. Nagiev M.F. *Teoreticheskie osnovy retsirkulyatsionnykh protsessov v khimii* [Theoretical basis of the recirculation processes in chemistry]. Moscow: Nauka, 1962, 322 p. (In Russ.).
5. Yanushevskii R.T. *Upravlenie ob"ektami s zapazdyvaniem* [Control of the objects with lagging]. Moscow: Nauka, 1978, 416 p. (In Russ.).
6. Gorecki Henryk. *Analiza i syntesa ukladow regulacji z opoznieniem*. Warszawa: Wydaw. Naukowo-Techniczne, 1971. (Russ.ed.: Gorecki H. *Analiz i sintez sistem upravljeniya s zapazdyvaniem*. Trans. from Pol. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 328 p.).
7. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., Sazykin G.P. *Sistemy avtomatizatsii na osnove naturno-model'nogo podkhoda v 3-kh t. T. 2: Sistemy avtomatizatsii proizvodstvennogo naznacheniya* [Automated systems based on natural-model approaches in three volumes. vol. 2: Commercial automated systems]. Novosibirsk: Nauka, 2006, 483 p. (In Russ.).
8. Dylevskii A.V., Lozgachev G.I. Construction of the regulator for the objects with the dispersed parameters by the transfer function of the closed system. *Vestnik VGU. Seriya fizika, matematika*. 2004, no. 2, pp. 154–157. (In Russ.).
9. Dylevskii A.V., Lozgachev G.I., Malyutina V.S. Synthesis of the modal regulator for the object with the dispersed parameters. *Vestnik VGU*. 2007, no. 1, pp. 128–132. (In Russ.).
10. 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.
11. Eremin E.L., Lelyanov B.N., Shelenok E.A. Discrete algorithms of robust control with nonlinear-unsteady objects in periodic modes. *Vestnik TOGU*. 2010, no. 1 (16), pp. 45–54. (In Russ.).
12. Myshlyayev L.P., Tsiryapkina A.V., Ivushkin K.A., Kiselev S.F. Management of objects with recycle. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015. vol. 58, no. 5, pp. 381–385. (In Russ.).
13. Ray W. Harmon. *Advanced process control*. McGraw-Hill, New York etc. 1981, 326 p. (Russ.ed.: Ray W. *Metody upravljeniya tekhnologicheskimi protsessami*. Moscow: Mir, 1983. 368 p.).
14. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., Venger K.G., Kiselev S.F., Tsiryapkina A.V., Berezin D.G., Chichindaev M.G. Baragichev K.E. *Sistema regulirovaniya ob"ekta s retsiklom* [Control system of recycle objects]. *Byulleten' evraziiskogo patentnogo vedomstva* 021192 V1, no. 2011130360/08 G05B13/00.
15. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., Ivushkin K.A., Kiselev S.F., Tsiryapkina A.V. *Sistema regulirovaniya ob"ekta s retsiklom* [Control system of recycle objects]. Patent RF no. 2542910, *Byulleten' izobretenii*. 2015, no. 6.

**Acknowledgements.** The work was supported by the grant of RFBR according to the project no. 15-07.02231.

Received October 5, 2015