

УДК 681.5.013

**СИНТЕЗ ДВУХКАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА СО СКОЛЬЗЯЩИМИ РЕЖИМАМИ****Д.А. Суворов, Г.А.Французова, А.С.Востриков***Новосибирский государственный технический университет*

В работе обсуждается процедура синтеза двухкаскадной системы автоматического поиска экстремума для динамического объекта. Его особенностью является наличие двух составляющих: динамической части и статической функции качества, имеющей экстремальный характер. В соответствии с особенностями объекта предлагается формировать двухконтурное управление, где внутренний контур содержит динамическую часть, а внешний – экстремальную характеристику. С целью подавления влияний внешних возмущений предлагается во внутреннем контуре организовать скользящий режим. Показано, что возникающие при этом автоколебания являются управляемыми, и их можно использовать в качестве поисковых колебаний для оценки градиента функции качества аналогично методу синхронного детектирования. Для обеспечения поиска экстремума с заданным качеством во внешнем контуре формируется интегральный регулятор, использующий полученную оценку градиента. Предлагается искусственно ускорить стабилизацию динамических свойств внутреннего контура, что порождает разнотемповые процессы. В этом случае исследование свойств системы осуществляется с использованием метода разделения движений. Описана процедура синтеза, которая включает в себя рекомендации по выбору значенных параметров регуляторов и поисковых колебаний, а также соответствующих автоколебаний во внутреннем контуре. Представлены результаты имитационного моделирования двухкаскадной экстремальной системы в среде MatLab, иллюстрирующие процесс поиска экстремума.

Ключевые слова: поиск экстремума, каскадное управление, скользящий режим, метод локализации, дифференцирующие устройства, разнотемповые процессы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-82-92

Введение

Системы автоматического поиска экстремума составляют отдельный класс систем автоматического регулирования. Их отличительной особенностью является наличие в объекте двух разнородных составляющих. Одна из них представляет собой обычный динамический объект, а вторая составляющая – это статическая функция качества с явно выраженным экстремумом. Задача заключается в определении положения экстремума и стабилизации системы в найденном состоянии методами теории управления при действии на объект внешних возмущений. Впервые задача такого рода была сформулирована в работах [1, 2], а возможности систем с регулятором на основе информации о градиенте экстремальной характеристики показаны в [3]. В настоящее время наиболее интересные результаты для объектов с нелинейной динамической частью представлены в [4].

Примерами динамических объектов с экстремальной характеристикой качества могут служить различные виды топок, паровых котлов и химических агрегатов, система максимизации давления в авиационном компрессоре, шлифовальные процессы, фотогальванический элемент, регулировка антенны радиотелескопа для максимизирования принимаемого сигнала и ряд других [4, 5].

Различные регуляторы могут быть использованы с целью организации движения и стабилизации системы в точке экстремума. Их выбор зависит прежде всего

от типа динамической части. В случае ее линейного описания целесообразно применять типовые регуляторы. Адекватными методами синтеза для нелинейных объектов являются метод локализации [6–8] и метод скользящих режимов [9].

Цель данной работы – показать особенности синтеза системы автоматического поиска экстремума с организацией скользящего режима во внутренней части системы. Оригинальность подхода заключается в организации двухконтурного управления с разными темпами движений в каждом из них [10–12]. Это позволяет каждый контур управления рассчитывать независимо от другого. Техническая реализация подобных систем предполагает, в первую очередь, возможность адекватной оценки градиента функции качества. С этой целью используются возникающие во внутреннем контуре автоколебания и организуется оценка градиента аналогично методу синхронного детектирования.

Для иллюстрации особенностей расчета и свойств исследуемых систем представлен класс одноканальных объектов с нелинейной динамической частью второго порядка. При этом объект подвержен влиянию неконтролируемых внешних возмущений. Полученные результаты могут быть распространены на общий класс одноканальных объектов регулирования.

1. Постановка задачи

Обсуждается задача поиска экстремума для нелинейного объекта управления второго порядка. Его модель представляет собой последовательное соединение динамической части и статической экстремальной характеристики вида

$$\begin{cases} \dot{x} = f(t, x) + b(t, x)u, \\ y = x_1, \\ Y = Y(y). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $x \in R^2$ – вектор состояния объекта; $u \in R^1$ – управляющее воздействие; $y \in R^1$ – выходная переменная динамической части; для функций $f(t, x)$ и $b(t, x) > 0$ известен только диапазон их изменения (f_{\min} , f_{\max} и b_{\min} , b_{\max}), причем явная зависимость от времени отражает действие неконтролируемых внешних возмущений; $Y(y) \in R^1$ – однозначная экстремальная характеристика. В малой окрестности экстремума эта характеристика с достаточной точностью аппроксимируется параболой вида

$$Y = q(y - y_0)^2 + Y_0. \quad (2)$$

Необходимо с помощью регулятора организовать автоматический поиск экстремума ($y_0; Y_0$) с требуемым качеством (t_n^* – заданное время процесса; δ^* – относительная статическая ошибка) и стабилизацию системы в точке экстремума. Специфика проектирования экстремальной системы предполагает наличие информации о градиенте выходной характеристики $G = \partial Y / \partial y$.

2. Двухконтурная система поиска экстремума

Характерной особенностью объекта управления (1) является наличие двух относительно самостоятельных компонентов – нелинейной динамической части и статической экстремальной характеристики. В связи с этим для него возможно

организовать каскадное управление (рис. 1), где P_1 и P_2 – регуляторы разных контуров управления; УОГ – устройство оценки градиента [11–14].

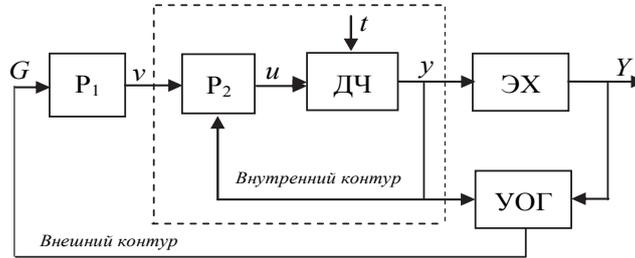


Рис. 1 – Схема двухконтурной системы управления

Fig. 1 – Diagram of a two-cascade control system

Внешние неконтролируемые возмущения влияют на динамическую часть, поэтому целесообразно предварительно стабилизировать процессы во внутреннем контуре. При этом будем формировать регулятор P_1 на основе метода скользящих режимов [9]. Потребуем, чтобы процессы во внутреннем контуре протекали существенно быстрее, чем во внешнем [13, 14], т. е. свяжем их соотношением

$$t_{\text{внутр}} \approx D t_{\text{внешн}} \quad (3)$$

где D – степень «разнесения» процессов; $t_{\text{внешн}} = t_n^*$. На практике достаточно обеспечить $D \approx 10$, что позволяет при расчете внешнего контура не учитывать динамику внутреннего, а рассматривать только его равновесный режим, т. е. $y = v$. В этом случае регулятор внешнего контура P_2 может рассчитываться независимо от внутреннего.

Таким образом, основная идея каскадного регулирования заключается в искусственном разделении системы на две относительно независимые подсистемы. В результате синтез системы экстремального регулирования осуществляется в два этапа. На одном этапе рассчитывается регулятор для стабилизации процессов в динамической части. На другом этапе обеспечивается поиск экстремума во внешнем контуре управления.

3. Внешний контур регулирования

Рассмотрим сначала, как при условии (3) и стабилизации процессов во внутреннем контуре осуществляется поиск экстремума. С этой целью во внешнем контуре используем интегральный регулятор P_1 [12–14] в функции градиента, полагая на этапе расчета, что градиент можно оценить точно,

$$v(t) = v(0) - \alpha \int_0^t G(\tau) d\tau. \quad (4)$$

В этом случае с учетом (2) градиент имеет вид $G = 2q(y - y_0)$, а дифференциальное уравнение регулятора (4) принимает форму

$$\dot{v} = -2\alpha q(y - y_0).$$

Поскольку процессы во внутреннем контуре закончились и $y = v$, то отсюда следует, что процессы во внешнем контуре соответствуют линейному дифференциальному уравнению

$$\dot{y} + 2\alpha qy = 2\alpha qy_0. \tag{5}$$

Из (5) видно, что в статике $y = y_0$. Следовательно, поиск экстремума осуществляется автоматически, ему соответствует положение равновесия внешнего контура. Причем соответствующим выбором параметра α можно обеспечить требуемую длительность процесса выхода на экстремум t_n^* .

4. Внутренний контур регулирования

Во внутреннем каскаде, где действуют внешние возмущения, а параметры модели ДЧ известны неточно, для стабилизации процессов используем метод скользящих режимов [9] и сформируем релейный закон управления P_2 в виде

$$u = u_m \text{sign } S(x_1, x_2, v), \tag{6}$$

где u_m – размах реле; $S(x_1, x_2, v) = cv - cx_1 - x_2 = 0$ – поверхность переключений; коэффициент c – выбирается на основе требований к быстродействию процессов во внутреннем контуре. Поскольку $x_1 = y$ согласно (1), то закон управления (6) удобно представить в форме

$$u = u_m \text{sign } S(y, \dot{y}, v). \tag{7}$$

Как известно, в режиме скольжения процессы внутреннего контура будут соответствовать линейному уравнению поверхности $S(y, \dot{y}, v) = cv - cy - \dot{y} = 0$, т. е. будут инвариантны по отношению к внешним возмущениям и нестационарным параметрам ДЧ объекта.

Практическая реализация регулятора (7) предполагает оценку производной выходной переменной динамической части \dot{y} , которую можно получить с помощью следующего дифференцирующего устройства [7, 8] с малой постоянной времени μ и коэффициентом демпфирования d :

$$W_f(p) = \frac{y_1}{y} = \frac{1}{\mu^2 p^2 + 2d\mu p + 1}, \tag{8}$$

где y_1 и \dot{y}_1 – оценки выходной переменной динамической части и ее первой производной соответственно. Данное устройство порождает во внутреннем контуре регулирования дополнительные быстрые процессы [12, 13], которые локализованы в замкнутой подсистеме (рис. 2).

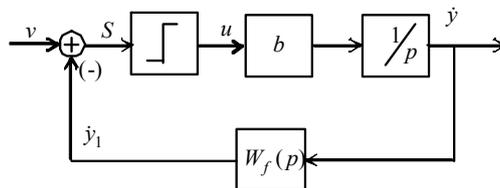


Рис. 2 – Схема подсистемы быстрых движений

Fig. 2 – The fast processes subsystem diagram

Наличие в ней нелинейного элемента типа «идеальное реле» приводит к возникновению в подсистеме быстрых движений автоколебаний [14], параметры которых на выходе дифференцирующего устройства $W_f(p)$ следующие:

$$\omega_a = \frac{1}{\mu}; \quad A_f = \frac{2u_m b_{\max} \mu}{\pi d}, \quad (9)$$

т. е. зависят от параметров дифференцирующего устройства (8) и релейного регулятора (7) и могут задаваться произвольным образом.

Автоколебания с частотой ω_a , проходя через ДЧ объекта, изменяются по амплитуде, которая на выходе внутреннего контура имеет вид

$$A_k = 2dA_f\mu. \quad (10)$$

Далее автоколебания проходят через ЭХ на выход всей системы, поэтому их целесообразно использовать в качестве поискового пробного сигнала для организации оценки градиента во внешнем контуре системы аналогично методу синхронного детектирования (рис. 3).

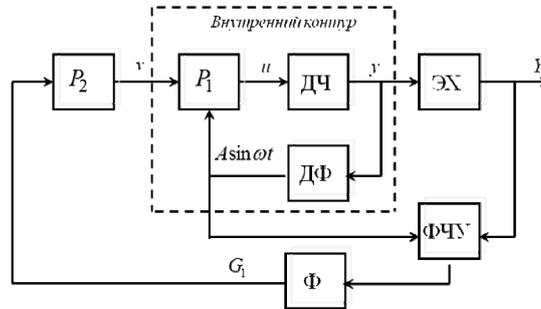


Рис. 3 – Блок-схема замкнутой системы с оценкой градиента

Fig. 3. Block-diagram of a closed-loop system with gradient estimation

Здесь введены следующие обозначения: ФЧУ – фазочувствительное устройство, в качестве которого используется блок умножения; Ф – усредняющий фильтр с передаточной функцией вида $W(s) = \frac{1}{Tp + 1}$, T – постоянная времени фильтра; ДФ – дифференцирующее устройство вида (8); G_1 – оценка градиента, которая пропорциональна его точному значению,

$$G_1 = \pi A^2 G. \quad (11)$$

Именно эта оценка градиента используется для формирования регулятора (4).

5. Порядок расчета системы поиска экстремума

Учитывая наличие управляемых автоколебаний в системе, с помощью которых можно организовать получение адекватной оценки градиента, процедуру расчета автоматической системы поиска экстремума можно представить в виде совокупности отдельных этапов.

1. На основе анализа модели ДЧ объекта и его ЭХ в соответствии с рекомендациями метода синхронного детектирования определяются параметры поиско-

вых колебаний A_0 и ω_0 , которые будут обеспечивать оценку градиента G_1 с требуемой точностью.

2. Колебания на выходе внутреннего контура регулирования должны соответствовать поисковым колебаниям, т. е. записываются равенства $A_k = A_0$ и $\omega_a = \omega_0$.

3. Определяется выражение для амплитуды автоколебаний на выходе контура быстрых движений согласно соотношению (10) в виде $A_f = \frac{A_0}{2d\mu}$.

4. Коэффициент демпфирования дифференцирующего устройства выбирается из диапазона $d = 0,5 \dots 0,7$. С учетом выражения (9) вычисляются постоянная времени $\mu = \frac{1}{\omega_0}$ и размах реле для регулятора внутреннего контура $u_m = \frac{A_0\pi}{4b_{\max}\mu^2}$.

5. В соответствии с заданной длительностью процесса поиска t_n^* и требуемой ошибкой выхода на экстремум δ^* для системы (5) модальным методом находится коэффициент α регулятора внешнего контура (4) с учетом оценки градиента (11).

6. Определяется длительность процессов во внутреннем контуре $t_{\text{внутр}} = Dt_n^*$, на основе которой вычисляется коэффициент c регулятора внутреннего контура (7).

Таким образом, в результате представленной процедуры формируются регуляторы внешнего и внутреннего контуров регулирования системы, обеспечивающие автоматический поиск экстремума с заданными свойствами.

6. Результаты имитационного моделирования

Рассмотрим объект, модель которого имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1(t)y = b(t)u, \\ Y = Y_0 + q[y - y_0]^2, \end{cases}$$

где параметры $a_1(t)$ и $b(t)$ изменяются в диапазоне $|a_1(t)| \leq 2$, $4 \leq b(t) \leq 10$ от процесса к процессу; $a_2 = 3$; $q = 2$; $|u| \leq 20$. Необходимо за время $t_n \leq 5$ с из начального состояния $y(0) = 1$, $\dot{y}(0) = 0$ выйти в точку экстремума, заданную значениями $\{y_0 = -1; Y_0 = 2\}$.

В соответствии с требуемой длительностью процессов во внешнем контуре вычислено значение коэффициента интегрального регулятора $\alpha = 0,15$. Сформировано уравнение поверхности скольжения из условия ускорения процессов во внутреннем контуре,

$$S(y, \dot{y}, v) = -5y + 5v - \dot{y} = 0.$$

Из условия адекватной оценки градиента определены параметры регулятора P_2 и дифференцирующего фильтра: $|u_m| = 20$, $\mu_1 = 0,01$ с.

Схема моделирования системы поиска экстремума в среде MATLAB Simulink представлена на рис. 4.

Рис. 5, а и б иллюстрируют процессы движения к экстремуму на выходе системы и динамической части соответственно при изменении параметров объекта $a_1(t)$ и $b(t)$ в указанном диапазоне. Видно, что нестационарные

параметры объекта успешно подавляются во внутреннем контуре и не отображаются на графиках $Y(t)$ и $y(t)$. Переходный процесс на выходе системы $Y(t)$ имеет две фазы: первый этап соответствует быстрым процессам во внутреннем контуре регулирования, вторая фаза – движение к экстремуму согласно уравнению (5) для внешнего контура.

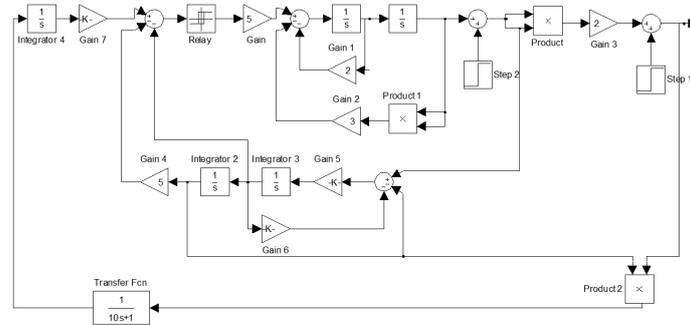


Рис. 4 – Схема моделирования замкнутой системы
Fig. 4 – The simulation scheme of the closed-loop system

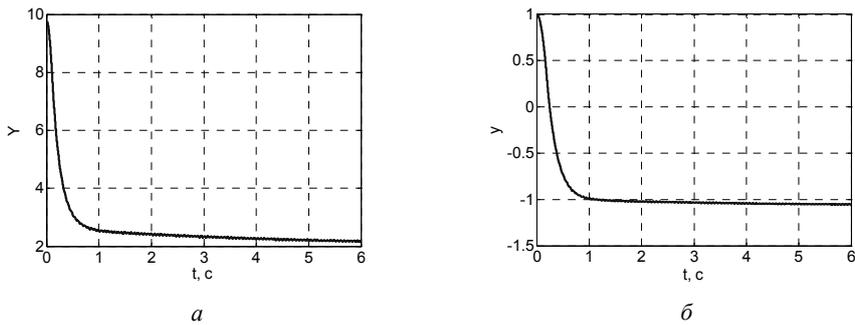


Рис. 5 – Процессы на выходе системы и ее динамической части
Fig. 5 – Processes at the system output and its dynamic part

На рис. 6 показано изменение градиента (рис. 6, а) и управляющего воздействия внутреннего контура (рис. 6, б).

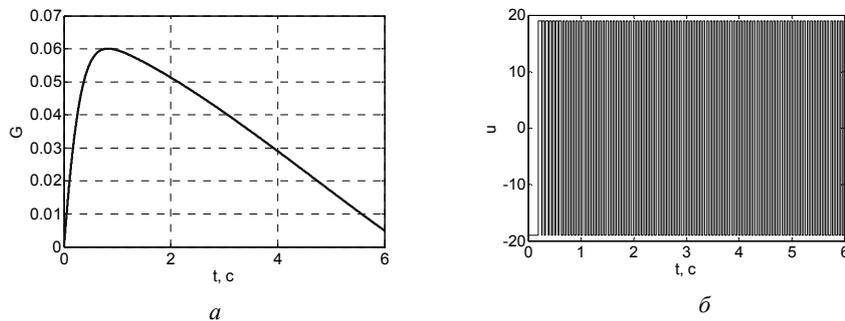


Рис. 6 – Изменение оценки градиента и управления внутреннего контура
Fig. 6 – Changes in gradient estimation and the inner-loop control

Как видно, с момента времени $t = 0,4$ с начинаются переключения управления, значение которого равно $|u_m| = 19$. Представленные графики переходных процессов показывают, что в замкнутой системе успешно осуществляется поиск экстремума в соответствии с заданными требованиями. Рассчитанные настроечные коэффициенты дифференцирующего устройства и релейного регулятора позволяют получить управляемые автоколебания с требуемыми параметрами.

Заключение

Предложенный метод синтеза двухкаскадной системы экстремального регулирования позволяет решить задачу автоматического поиска экстремума для широкого класса объектов, функционирующих в условиях действия внешних возмущений. При этом нелинейные характеристики динамической части и возмущения подавляются во внутреннем контуре регулятором, основанным на методе скользящих режимов.

Возникающие в качестве «побочного» эффекта автоколебания используются в качестве поисковых для оценки градиента экстремальной характеристики аналогично методу синхронного детектирования. Однако в отличие от классической схемы этого метода при использовании автоколебаний отсутствует необходимость введения в систему специального генератора поисковых колебаний.

Следует отметить, что способ синтеза систем экстремального регулирования с организацией скользящих режимов во внутреннем контуре ориентирован на класс объектов с релейным исполнительным механизмом. В настоящей работе расчетные соотношения для регуляторов двух каскадов представлены для динамических объектов второго порядка, но в дальнейшем могут быть распространены на объекты более высоких порядков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моросанов И.С. Метод экстремального управления // Автоматика и телемеханика. – 1957. – № 18. – С. 1077–1092.
2. Blackman P.F. Extremum-seeking regulators // An exposition of adaptive control / ed. by J.H. Westcott. – New York: The Macmillan Company, 1962.
3. Растринин Л.А. Системы экстремального регулирования. – М.: Наука, 1974.
4. Ariyur K.V., Krstic M. Real-time optimization by extremum-seeking control. – New-Jersey: Wiley, 2003.
5. Галкин Л.М., Карманов В.И., Стрюков С.М. Автоматическая оптимизация рабочего режима термоэмиссионных преобразователей по давлению паров цезия // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 11. – С. 151–158.
6. Востриков А.С., Уткин В.И., Французова Г.А. Системы с производной вектора состояния в управлении // Автоматика и телемеханика. – 1982. – № 3. – С. 22–25.
7. Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007.
8. Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. – М.: Юрайт, 2017.
9. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука, 1981.
10. Французова Г.А. Двухконтурные системы экстремального регулирования с формированием заданной динамики // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 5. – С. 7–11.

11. **Frantsuzova G.A.** Application of relay controller for extremum seeking in nonlinear system // Proceedings of the IASTED International Conferences on "Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010)", 15–18 June, 2010. – Novosibirsk, 2010. – P. 111–115.
12. **Frantsuzova G.A.** Use of a relay controller for automatic extremum seeking in nonlinear systems // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2011. – Vol. 47, iss. 3. – P. 274–280.
13. **Suvorov D.A., Frantsuzova G.A.** Cascaded extremum seeking system design with sliding modes organization // 2016 11th International forum on strategic technology, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016. – Novosibirsk: NSTU, 2016. – Pt. 1. – P. 590–593.
14. **Suvorov D.A., Frantsuzova G.A.** Two-cascaded gradient extremum closed loop with seeking self-oscillations // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings, Kazakhstan, Astana, June 29–30, 2017. – Astana, 2017. – P. 696–699.

SYNTHESIS OF THE TWO-CASCADE EXTREMUM-SEEKING SYSTEM WITH SLIDING MODES

Suvorov D.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The synthesis procedure of the two-cascade extremum-seeking system for a dynamic object is discussed. This object has the following two components- a dynamic part and the static quality function of an extremum nature. In accordance to these features it is proposed to form a two-loop control where the inner contour contains a dynamic part, and the outer one contains the extremum characteristic. In order to suppress the effects of external disturbances, it is suggested to organize a sliding mode in the inner contour. It is shown that in this case controlled self-oscillations arise and they can be used as search oscillations to estimate the gradient of the quality function similar to the method of synchronous detection. It is recommended to use an integral controller based on gradient estimation in order to find an extremum of a required quality in the external circuit. It is proposed to accelerate the stabilization of the dynamic properties in the internal circuit but this acceleration leads to multirate processes. In this case, the study of the system properties is carried out using the method of motion separation. The synthesis procedure is described. It includes recommendations on selecting values of the controller's parameters and search oscillations as well as the corresponding auto-oscillations in the internal circuit. The presented results of simulation of the two-cascade system in MatLab illustrate the process of extremum seeking.

Keywords: extremum seeking, cascade control, sliding mode, localization method, differentiating devices, multirate processes.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-2-82-92

REFERENCES

1. Morosanov I.S. Metod ekstremal'nogo upravleniya [Extreme control method]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 1957, no. 18, pp. 1077–1092. (In Russian).
2. Blackman P.F. Extremum-seeking regulators. *An exposition of adaptive control*. Ed. by J.H. Westcott. New York, The Macmillan Company, 1962.
3. Rastrigin L.A. *Sistemy ekstremal'nogo regulirovaniya* [Extremum-seeking control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1974.
4. Ariyur K.B., Krstic M. *Real-time optimization by extremum-seeking control*. New-Jersey, Wiley, 2003.
5. Galkin L.M., Karmanov V.I., Stryukov S.M. Avtomaticheskaya optimizatsiya rabocheho rezhima termoemissionnykh preobrazovatelei po davleniyu parov tseziya [Automatic optimization of the operating mode of thermionic converters for cesium vapor pressure]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 1984, no. 11, pp. 151–158. (In Russian).

6. Vostrikov A.S., Utkin V.I., Frantsuzova G.A. Sistemy s proizvodnoi vektora so-stoyaniya v upravlenii [Systems with the derivative of the state vector in control]. *Avtomatika i telemekhanika – Automation and Remote Control*, 1982, no. 3, pp. 22–25.
7. Vostrikov A.S. *Sintez sistem regulirovaniya metodom lokalizatsii* [Synthesis of control systems by localization method]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2007.
8. Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* [Theory of automatic control]. Moscow, Yurait Publ., 2017.
9. Utkin V.I. *Skol'zyashchie rezhimy v zadachakh optimizatsii i upravleniya* [Sliding modes in optimization and control tasks]. Moscow, Nauka Publ., 1981.
10. Frantsuzova G.A. Dvukhkонтурные системы экстремального регулирования с формированием заданной динамики [Two-contour systems of extreme control with formation of given dynamics]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie – Mechatronics, Automation, Control*, 2008, no. 5, pp. 7–11.
11. Frantsuzova G.A. Application of relay controller for extremum seeking in nonlinear system. *Proceedings of the IASTED International Conferences on "Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010)"*, 15–18 June, 2010, Novosibirsk, pp. 111–115.
12. Frantsuzova G.A. Use of a relay controller for automatic extremum seeking in nonlinear systems. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, vol. 47, iss. 3, pp. 274–280.
13. Suvorov D.A., Frantsuzova G.A. Cascaded extremum seeking system design with sliding modes organization. *2016 11th International forum on strategic technology*, June 1–3, 2016, Novosibirsk, Russia: proceedings of IFOST-2016, pt. 1, pp. 590–593.
14. Suvorov D.A., Frantsuzova G.A. Two-cascaded gradient extremum closed loop with seeking self-oscillations. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON): Proceedings*, Kazakhstan, Astana, June 29–30, 2017, pp. 696–699.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Суворов Дмитрий Алексеевич – родился в 1991 году, аспирант кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: синтез регуляторов для объектов с нестационарными параметрами. Опубликовано 8 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: oknorb1@yandex.ru).

Suvorov Dmitry Alekseevich (b. 1991) – postgraduated the automatics department, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on designing controllers for non-stationary plants. He is the author of 8 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: oknorb1@yandex.ru).



Французова Галина Александровна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматике Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: методы анализа и синтеза нелинейных систем управления с нестационарными параметрами. Опубликовано свыше 200 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru).

Frantsuzova Galina Aleksandrovna – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the automatics department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on analysis and design methods for nonlinear control systems with non-stationary parameters. She is the author of more than 200 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru).



Востриков Анатолий Сергеевич – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: методы анализа и синтеза нелинейных систем управления с нестационарными параметрами. Опубликовано свыше 300 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vostrikov@sintez.nstu.ru).

Vostrikov Anatoliy Sergeevich – Doctor of Sciences (Eng.), professor at the automatics department, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on analysis and design methods for nonlinear control systems with non-stationary parameters. He is the author of more than 300 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vostrikov@sintez.nstu.ru)

*Статья поступила 12 марта 2018 г.
Received March 12, 2018*

To Reference:

Suvorov D.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. Sintez dvukhkaskadnoi sistemy avtomaticheskogo poiska ekstremuma so skol'zyashchimi rezhimami [Synthesis of the two-cascade extremum-seeking system with sliding modes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 2 (39), pp. 82–92. doi: 10.17212/1727-2769-2018-2-82-92.