

Применение скользящего режима в системах автоматического поиска экстремума

Д.А. Суворов, Г.А. Французова
НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация: В работе рассмотрена возможность синтеза систем со скользящими режимами для автоматического поиска экстремума функции качества. Показано, что использование с целью реализации регулятора специального дифференцирующего фильтра приводит к возникновению во внутреннем контуре системы автоколебаний, которые можно использовать в качестве поисковых колебаний для оценки градиента. Предложена процедура расчета регулятора и дифференцирующего фильтра из условия формирования заданных автоколебаний. Результаты работы иллюстрирует пример численного моделирования в среде *MatLab*.

Ключевые слова: поиск экстремума регулятор, скользящий режим, дифференцирующий фильтр, двухконтурное управление, автоколебания.

ВВЕДЕНИЕ

Наряду с обычными задачами регулирования в ряде отраслей промышленности существует целый класс технических устройств, для которых возникает необходимость поддержания на предельном (экстремальном) уровне значения некоторого показателя качества. Характерной особенностью подобных объектов является наличие двух составляющих – динамической части и статической характеристики – последовательно связанных между собой [1–3]. Причем статическая функция качества, имеющая предельное значение, с течением времени может видоизменяться, сохраняя экстремальный характер. Стоит задача обеспечить автоматический поиск экстремума и удержание системы в данном положении. С этой целью, применяют методы теории автоматического регулирования и создают специальные системы, которые называют системами экстремального регулирования [1–4].

Наиболее эффективными системами подобного рода являются системы, в которых регулятор формируется на основе информации о градиенте экстремальной характеристики. В зависимости от конкретной ситуации для оценки градиента можно применять различные подходы: способ синхронного детектирования [3, 4], формирование специального фильтра оценки частной производной [5], устройство оценки знака градиента и другие [2, 4]. Для

организации движения к экстремуму и стабилизации системы в найденной точке могут быть использованы различные регуляторы: типовые регуляторы в случае линейной динамической части объекта, регуляторы на базе метода локализации [6] или скользящих режимов в случае произвольного объекта [7]. При этом возможны различные варианты технической реализации экстремальных систем с одним и двумя контурами регулирования [8–10]. Особенностью двухконтурного регулирования является использование двух видов обратных связей и организация разных по темпам движений в каждом из контуров [9, 10].

При обычном подходе к синтезу регулятора устройство оценки градиента и контуры управления, предназначенные для организации движения к экстремуму, являются самостоятельными блоками, не использующими внутренние переменные друг друга. Основной задачей данной работы является разработка метода синтеза двухконтурной системы экстремального регулирования с организацией управляемых автоколебаний, которые можно использовать для оценки градиента аналогично методу синхронного детектирования. В этом случае отпадает необходимость в использовании специального генератора пробных синусоидальных колебаний.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается задача синтеза системы экстремального регулирования для объекта, модель которого имеет вид:

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

Здесь $x \in R^2$ – вектор состояния динамической части объекта (ДЧ), состоящий из двух компонент; $u \in R^1$ – управляющее воздействие; $y \in R^1$ – скалярная выходная переменная динамической части объекта; $Y \in R^1$ – выходная переменная всего объекта, которая представляет собой нелинейную однозначную функцию и имеет экстремум по переменной y . Зависимость экстремальной характеристики (ЭХ) от времени t отражает возможное наличие медленного по

сравнению с темпом процессов в системе дрейфа экстремума.

Требуется синтезировать градиентную систему экстремального регулирования, способную парировать нестационарность параметров объекта управления. К процессу поиска экстремума в замкнутой системе предъявляются определенные требования, заданные в виде желаемой длительности процесса $t_n \leq t_n^*$, перерегулирования $\sigma \leq \sigma^*$ и статической ошибки $\Delta \leq \Delta^*$.

2. ВЫБОР СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ

Поскольку рассматриваемый объект управления состоит из двух относительно самостоятельных составляющих, то для поиска экстремума используем вариант двухконтурного регулирования (Рис. 1).

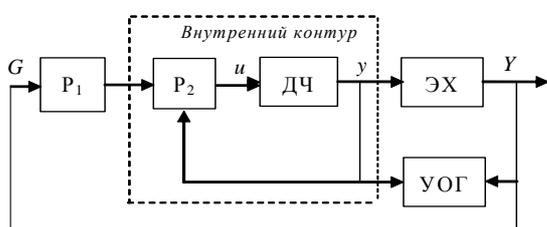


Рис. 1. Схема двухконтурной системы управления

Согласно идее метода синтеза двухконтурной системы экстремального регулирования [9–11], управление процессами в динамической части и экстремальной характеристике производится отдельными регуляторами во внутреннем (P_2) и внешнем контуре (P_1) соответственно. Следует отметить особенность синтеза: процессы во внутреннем контуре должны заканчиваться значительно быстрее процессов во внешнем контуре, где осуществляется поиск экстремума с заданными показателями качества.

3. ВНУТРЕННИЙ КОНТУР

Поскольку динамическая часть нелинейная, то во внутреннем контуре используем регулятор на основе метода скользящих режимов [7, 12, 13] в виде

$$u = u_m \operatorname{sign} S(x) = \begin{cases} +u_m, & S(x) > 0, \\ -u_m, & S(x) < 0, \end{cases} \quad (2)$$

где u_m - размах реле, $S(x)$ – функция, которая отражает требования к динамике процесса во внутреннем контуре регулирования и формируется в виде поверхности [12–13]

$$S(x) = -a_1 x_1 + a_1 v - x_2 = 0 \quad (3)$$

Как известно [7], при выполнении условий возникновения скользящего режима динамика внутреннего контура системы будет соответствовать уравнению поверхности (3).

Реальная техническая реализация метода скользящих режимов в рассматриваемой системе требует наличия возможности оценки производной выходной переменной объекта, т.е. оценки $\dot{y} = x_2$. С этой целью применяется специальное устройство - дифференцирующий фильтр, при помощи которого также фильтруются измерительные помехи, возникающие вследствие применения реальных датчиков. В данном случае в качестве дифференцирующего фильтра (ДФ) можно использовать линейную динамическую подсистему второго порядка с передаточной функцией

$$W_f(\mu p) = \frac{1}{\mu^2 p^2 + 2d_1 \mu p + 1} = \frac{1}{D(\mu p)} \quad (4)$$

где μ - малая постоянная времени фильтра, а d_1 – коэффициент демпфирования.

Наличие ДФ приводит к возникновению во внутреннем контуре системы разнотемповых процессов, исследование которых осуществляется с использованием метода разделения движений [14]. При этом важную роль играют быстрые процессы, развивающиеся во внутренней подсистеме, представленной на рис. 2.

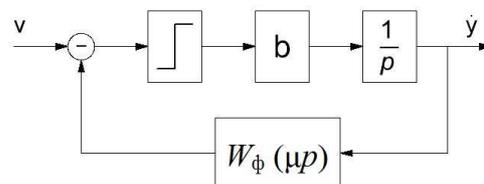


Рис. 2. Схема подсистемы быстрых движений

Не трудно убедиться, что в силу наличия элемента “идеальное реле” и дифференцирующего фильтра второго порядка в этом контуре возникают автоколебания [5], которые являются для него устойчивым режимом работы.

Суть работы заключается в использовании этих автоколебаний в качестве поисковых для оценки градиента выходной характеристики $G = \frac{\partial Y}{\partial y}$ аналогично методу синхронного детектирования. В соответствии с этим методом возникающие автоколебания можно применять в качестве поисковых при оценке G , если их параметры удовлетворяют следующим рекомендациям.

– Амплитуда автоколебаний на выходе ДЧ должна быть на порядок меньше амплитуды основного сигнала.

– Частота колебаний – достаточно высокой. Однако слишком высокие значения частоты приведут к значительному усилению помех

измерения, поэтому достаточно обеспечить значение частоты поисковых колебаний на порядок выше собственной частоты динамической части объекта.

Задача заключается в формировании автоколебаний с требуемыми параметрами путем соответствующего выбора настроечных коэффициентов дифференцирующего фильтра и реле регулятора.

Предварительно, используя метод гармонического баланса, оценим параметры автоколебаний на выходе дифференцирующего фильтра [12–13]:

$$\varpi_a = \frac{1}{\mu}; \quad A_f = \frac{2u_m b \mu}{\pi d_1}. \quad (5)$$

Затем определим добавочные колебания в выходном сигнале подсистемы быстрых движений \dot{y} (Рис. 2). Частота автоколебаний остается неизменной (т.е. ϖ_a), а амплитуда при прохождении через дифференцирующий фильтр меняется. Для определения численного значения используем АЧХ дифференцирующего фильтра (3), которая имеет вид:

$$A_{df}(\varpi) = \frac{A_f}{A_{fps}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \mu^2 \varpi^2) + 4d_1^2 \mu^2 \varpi^2}}.$$

Подставив в это выражение значение частоты установившихся автоколебаний (5), получим численное значение коэффициента передачи

$$A_{df}(\varpi_a) = \frac{1}{2d_1},$$

с помощью которого вычислим амплитуду поисковых автоколебаний на выходе подсистемы быстрых движений,

$$A_{fps} = 2d_1 A_f. \quad (6)$$

Для рассматриваемого объекта с динамической частью второго порядка (1) сигнал на выходе внутреннего контура регулирования u (рис. 1) связан с выходным сигналом контура быстрых движений \dot{y} интегральным соотношением. Это позволяет с учетом АЧХ интегратора и соотношений (5), (6), определить амплитуду колебаний на выходе внутреннего контура,

$$A_{inner} = 2d_1 A_f \mu. \quad (7)$$

Если теперь задать требуемую частоту (5) и амплитуду (7) поисковых автоколебаний, то получим расчетные соотношения для параметров регулятора внутреннего контура и дифференцирующего фильтра в виде.

$$\mu = \frac{1}{\varpi_a}; \quad u_m = \frac{A_{inner} \pi}{4b\mu^2}. \quad (8)$$

Таким образом, использование реле и дифференцирующего фильтра во внутреннем контуре регулирования позволяет автоматически сформировать поисковые колебания аналогично методу синхронного детектирования.

4. ВНЕШНИЙ КОНТУР

При условии, что процесс поиска экстремума длится значительно дольше стабилизации динамической части объекта, при расчете замкнутой системы вместо внутреннего контура будем рассматривать его равновесный режим. Таким образом, внешний контур рассматривается независимо [11]. Полагаем, что оценку градиента можно точно получить в соответствии с выражением $G = \frac{\partial Y}{\partial y} = 2\beta(t)u$.

Будем использовать для внешнего контура интегральный закон управления

$$\dot{v} = -\frac{\alpha}{p} G.$$

Равновесный режим определяется уравнением $\dot{v} = 0$, что с учетом выражения для градиента соответствует значению $G = 0$. Следовательно, положение равновесия внешнего контура и есть искомое положение экстремума.

Функциональная схема системы представлена на Рис. 3.

В качестве метода оценки экстремума, как упоминалось выше, применяется метод синхронного детектирования. Однако, в отличие от классического подхода, в качестве поисковых колебаний используются возникающие в контуре быстрых движений автоколебания.

Таким образом, устройство оценки градиента методом синхронного детектирования реализуется без использования генератора синусоидальных колебаний. Принцип определения знака градиента полностью идентичен классическому варианту.

Схема позволяет выполнять задачи экстремального регулирования и способна (благодаря применению скользящих режимов при расчете внутреннего контура) отрабатывать нестационарность параметров объекта управления.

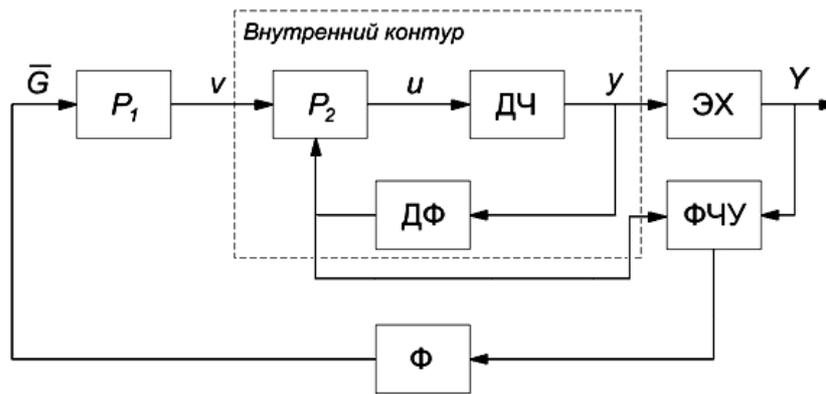


Рис. 3. Схема замкнутой системы

5. ПРИМЕР

Рассмотрим объект, который описывается системой уравнений вида

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_1x_1 - a_2x_2 + bu, \\ y = x_1, \\ Y(y) = cy^2. \end{cases}$$

Значения параметров следующие: $a_2 = 5$; $b = 8$; $c = 2$; коэффициент a_1 нестационарный, он изменяется в соответствии с выражением

$$a_1 = \begin{cases} 2; & t < 0.3 \text{ сек}, \\ 6; & 0.3 \text{ сек} < t < 0.5 \text{ сек}; \\ 3; & t > 0.5 \text{ сек} \end{cases}$$

К качеству процесса поиска экстремума предъявляются требования: время процесса не более 1 сек., перерегулирование отсутствует. С учетом этих требований сформирована поверхность переключений (3) для регулятора внутреннего контура (2)

$$S(x) = -5x_1 + 5v - x_2 = 0.$$

Принимая во внимание разделение процессов в контурах по скорости протекания, рассчитан коэффициент И-регулятора внешнего контура, $\alpha = 0.125$. Желаемые параметры автоколебаний: $A_f = 0.2$; $\omega_a = 125$ рад/сек. В соответствии с (7) желаемая амплитуда колебаний во внутреннем контуре будет $A_{inner} = 0.016$. Подставив желаемые значения параметров автоколебаний в уравнения (8), получим окончательно численные значения настроечных параметров дифференцирующего фильтра и реле: $\mu = 0.008$, $u_m = 24.5$.

Схема моделирования в пакете MATLAB Simulink представлена на Рис. 4.

Результаты моделирования процессов на выходе внутреннего контура (в установившемся режиме) представлены на рис. 5. На графике отчетливо видны наложенные автоколебания, параметры которых совпадают с расчетными.

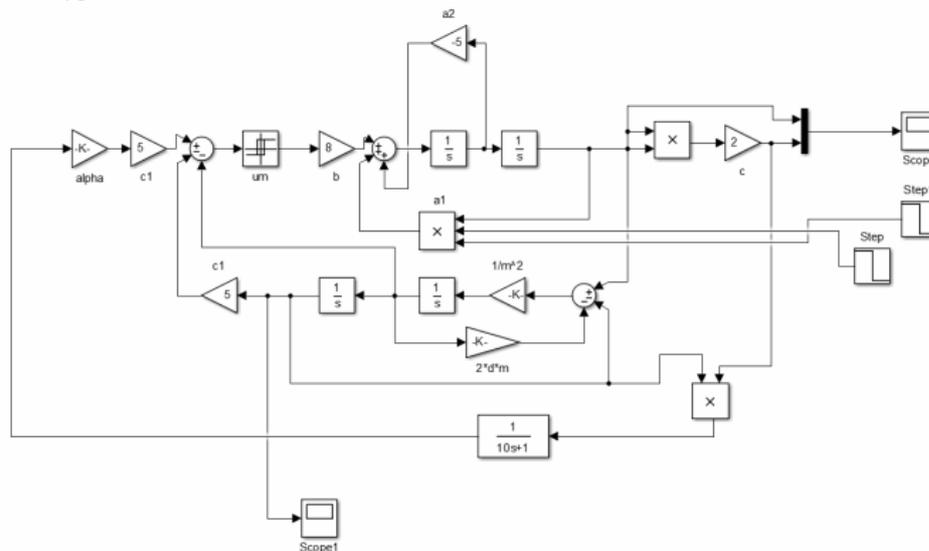


Рис. 4. Схема моделирования замкнутой системы

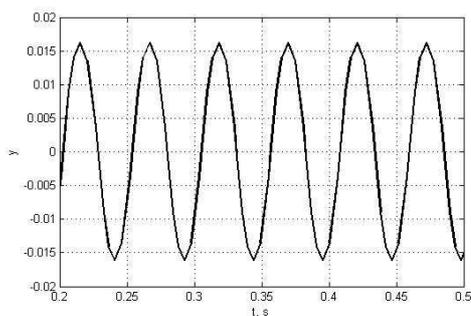


Рис. 5. Установившиеся процессы на выходе внутреннего контура

На рис. 6 показаны графики переходных процессов $y(t)$ и $Y(t)$ - на выходе всей системы.

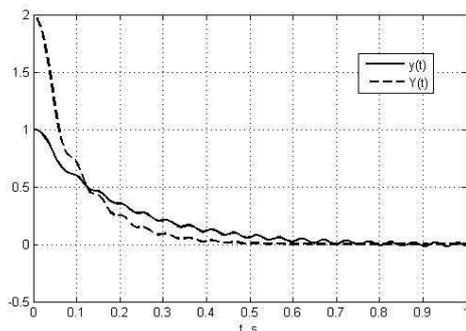


Рис. 6. Графики процессов $y(t)$, $Y(t)$

Представленные графики переходных процессов показывают, что в замкнутой системе успешно осуществляется процедура поиска экстремума в соответствии с заданными требованиями к динамике переходных процессов. Рассчитанные настроечные коэффициенты дифференцирующего фильтра и регулятора в виде "реле" позволяют получить управляемые автоколебания с желаемыми параметрами. Кроме того, организация скользящих режимов позволяет парировать нестационарность параметра a_1 динамической части объекта управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезированная двухконтурная градиентная система экстремального регулирования позволяет решить задачу автоматического поиска экстремума. Причем применение в контуре стабилизации динамической части регулятора на базе метода скользящих режимов позволяет парировать нелинейности и нестационарность параметров объекта управления.

Использование во внутреннем контуре системы в качестве регулятора нелинейного элемента типа "идеальное реле" и дифференцирующего фильтра приводит к возникновению управляемых автоколебаний, которые предложено использовать в качестве поисковых для оценки градиента экстремальной характеристики методом синхронного

детектирования. В отличие от классической схемы этого метода, при использовании поисковых автоколебаний отсутствует необходимость введения в систему генератора синусоидальных колебаний. Параметры поисковых автоколебаний следует выбирать в соответствии с рекомендациями метода синхронного детектирования. Приведены расчетные соотношения для получения значений параметров поисковых автоколебаний в различных точках замкнутой системы. Нужные значения данных параметров задаются с помощью настроечных параметров дифференцирующего фильтра и элемента "идеальное реле".

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Моросанов И.С. Метод экстремального управления // Автоматика и телемеханика. 1957. № 18. С. 1077–1092.
- [2] Казакевич В.В. Системы экстремального регулирования и некоторые способы улучшения их качества и устойчивости. // Автоматическое управление и вычислительная техника. М.: Машгиз. 1958.
- [3] Blackman P.F. Extremum-seeking regulators // An exposition of adaptive control / Ed. J.H. Westcott. – NY: The Macmillan Company. 1962.
- [4] Krstic M., Wang H.N. Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems // Automatica. 2000. Vol. 36. P. 595–601.
- [5] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. – М.: Высшая школа. - 2004. - 360 с.
- [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] Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы. 1981.
- [8] Французова Г.А. Синтез двухконтурной астатической системы экстремального регулирования на основе принципа локализации // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2004. – Т. VII. – № 1 (17). – С. 145–150.
- [9] Французова Г.А. Свойства различных типов систем автоматического поиска экстремума, основанных на методе локализации / Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 5. – С. 438–446.
- [10] Французова Г.А. Двухконтурные системы экстремального регулирования с формированием заданной динамики // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 5. – С. 7–11.
- [11] Французова Г.А. Двухконтурные системы экстремального регулирования с предварительной стабилизацией динамической части // Автометрия. - 2006. - № 2. - С. 29–37.
- [12] Французова Г.А., Нестерова О.Ю. Исследование свойств системы экстремального регулирования со скользящими режимами // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2009. – № 4. – С. 11–16.

- [13] Frantsuzova G.A. Application of relay controller for extremum seeking in nonlinear system // Proceeding of the IASTED International Conferences on «Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010)». 15-18 June, 2010. - Novosibirsk. 2010. P.111–115.
- [14] Герашенко Е.И., Герашенко С.М. Метод разделения движений и оптимизация нелинейных систем. – М.: Наука. 1975.

Application of Sliding Mode in the Extremum-Seeking Automatic Systems

G.A. FRANTSUZOVA, D.A. SUVOROV

Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russia

Abstract: The possibilities of systems with sliding modes for automatic extremum-seeking of the quality function are discussed in this paper. It is shown that the use of a special differentiating filter leads to self-oscillations in the inner circuit of the system. These auto-oscillations can be used as search oscillations to estimate the gradient. The procedure for calculating the regulator and differentiating filter from the condition of the desired self-oscillations formation was proposed. An example of numerical simulation in MatLab illustrates these results.

Keywords: extremum-seeking, controller, sliding mode, differentiating filter, two-loop control, auto-oscillations.

REFERENCES

- [1] Morosanov I.S. Metod jekstremal'nogo upravlenija // Avtomatika i telemekhanika. 1957. № 18. S. 1077 – 1092.
- [2] Kazakevich V.V. Sistemy jekstremal'nogo regulirovanija i nekotorye sposoby uluchshenija ih kachestva i ustojchivosti. // Avtomaticheskoe upravlenie i vychislitel'naja tehnika. M.: Mashgiz. 1958.
- [3] Blackman P.F. Extremum-seeking regulators // An exposition of adaptive control / Ed. J.H. Westcott. – NY: The Macmillan Company. 1962.
- [4] Krstic M., Wang H.H. Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems // Automatica. 2000. Vol. 36. P. 595–601
- [5] Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija. – M.: Vysshaja shkola. - 2004. - 360 s.
- [6] Vostrikov A.S., Utkin V.I., Francuzova G.A. Sistemy s proizvodnoj vektora sostojanija v upravlenii // Avtomatika i telemekhanika. – 1982. – № 3. – S. 22–25.

- [7] Utkin V.I. Skol'zjashhie rezhimy v zadachah optimizacii i upravlenija. – M.: Nauka, Glavnaja redakcija fiziko-matematicheskoy literatury. 1981.
- [8] Francuzova G.A. Sintez dvuhkonturnoj astaticheskoy sistemy jekstremal'nogo regulirovanija na osnove principa lokalizacii // Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki. – 2004. – T.VII. – № 1 (17). – S. 145–150.
- [9] Francuzova G.A. Svoystva razlichnyh tipov sistem avtomaticheskogo poiska jekstremuma, osnovannyh na metode lokalizacii / Avtometrija. – 2012. – T. 48, № 5. – S. 438–446.
- [10] Francuzova G.A. Dvuhkonturnye sistemy jekstremal'nogo regulirovanija s formirovaniem zadannoj dinamiki // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2008. – № 5. – S. 7–11.
- [11] Francuzova G.A. Dvuhkonturnye sistemy jekstremal'nogo regulirovanija s predvaritel'noj stabilizaciej dinamičeskoy chasti // Avtometrija. - 2006. - № 2. - S. 29–37.
- [12] Francuzova G.A., Nesterova O.Ju. Issledovanie svojstv sistemy jekstremal'nogo regulirovanija so skol'zjashhimi rezhimami // Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2009. – № 4. – S. 11–16.
- [13] Frantsuzova G.A. Application of relay controller for extremum seeking in nonlinear system // Proceeding of the IASTED International Conferences on «Automation, Control, and Information Technology (ACIT 2010)». 15-18 June, 2010. - Novosibirsk. 2010. P.111–115
- [14] Gerashhenko E.I., Gerashhenko S.M. Metod razdelenija dvizhenij i optimizacija nelinejnyh sistem. – M.: Nauka. 1975.



Галина Александровна Французова – д.т.н., профессор кафедры автоматике. Область научных интересов: методы анализа и синтеза нелинейных систем управления с нестационарными параметрами.
E-mail: Frants@ac.cs.nstu.ru



Дмитрий Алексеевич Суворов – аспирант кафедры автоматике. Область научных интересов: задача синтеза регуляторов для объектов с нестационарными параметрами и статической функцией качества.
E-mail: oknorbl@yandex.ru