

# О влиянии начальных условий на свойства одноконтурной системы экстремального регулирования, основанной на методе локализации

*Г.А. Французова, Н.Ю. Шилкова  
ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск*

**Аннотация:** В работе представлены рекомендации по выбору параметров регулятора и специальных дифференцирующих устройств одноконтурной системы экстремального регулирования, основанной на методе локализации. Путем имитационного моделирования исследовано влияние начальных состояний дифференцирующих устройств и дрейфа экстремума на поиск минимума (максимума) функции качества.

**Ключевые слова:** автоматика, экстремальные системы, метод локализации, одноконтурные системы, начальные условия, дрейф экстремума

## ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд технических объектов, для которых возникает необходимость поддержания на минимальном или максимальном уровне некоторого показателя работы. К таким объектам относятся: процессы сгорания (для двигателей внутреннего сгорания, паровых генерирующих установок и газовых печей), шлифовальные процессы, фотогальванический элемент, регулировка антенны радиотелескопа для максимизирования принимаемого сигнала, регулировка лезвия в гидротурбине и ветряные мельницы для увеличения мощности генерации [1–3]. Характерной особенностью таких объектов является наличие двух составляющих: динамической части, которую можно описать известными динамическими звеньями, и статической характеристики с явно выраженным экстремумом, значение которого может изменяться с течением времени произвольным образом («дрейфовать»).

Управляющее воздействие, с помощью которого можно обеспечить достижение экстремума функции качества и стабилизацию системы в этом положении, принято называть «экстремальным» управлением [2, 3]. Организация экстремального управления осуществляется с помощью регулятора, тип которого зависит от описания объекта. Так в случае линейной

динамической части объекта используются линейные методы расчета регулятора, и самыми популярными на практике на сегодняшний день являются регуляторы с типовыми законами управления [4–6]. Однако такие регуляторы имеют ряд недостатков, связанных, прежде всего, с необходимостью корректировки параметров, хотя для их расчета часто используются частотный и модальный методы [3, 4].

В случае нелинейной динамической части следует использовать соответствующие методы расчета регулятора. Для таких систем наиболее подходящими являются регуляторы, основанные на методе локализации [3, 7, 8] и методе скользящих режимов [9] или на методе численной оптимизации [15–17]. В настоящее время наиболее полно проработанным является способ расчета экстремального регулятора на основе метода локализации. Причем возможны варианты одноконтурной [7, 8] и двухконтурной [10, 12] реализации систем. Подобные регуляторы имеют форсирующий характер. Поэтому их реализация предполагает использование в системе специальных дифференцирующих устройств с малыми постоянными времени, что приводит к возникновению разнотемповых процессов [3]. Для адекватной оценки производных необходимо, чтобы начальные состояния этих устройств соответствовали начальным условиям объекта, что не всегда возможно обеспечить на практике. Система работает наиболее точно, когда дифференцирующие устройства имеют малые инерционности и согласованные с объектом начальные условия [13]. В данной статье рассматриваются одноконтурные системы экстремального регулирования с неточно известными начальными состояниями дифференцирующих устройств.

Цель исследования – анализ отработки в системе рассогласования начальных условий

дифференцирующих устройств и объекта, а также влияния дрейфа на поиск экстремума.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать объект, динамическая часть которого описывается уравнением

$$\dot{y} = f(t, y) + b(t, y)u, \quad (1)$$

а экстремальная характеристика аппроксимирована параболой [5]

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

Здесь  $u$  – управляющее воздействие;  $y$  – выходная переменная динамической части объекта; для функций  $f(\cdot)$  и  $b(\cdot)$  известен только диапазон их изменения;  $Y_0(t)$  и  $y_0(t)$  – вертикальный и горизонтальный дрейфы экстремума соответственно.

Необходимо с помощью регулятора организовать автоматический поиск экстремума с требуемым качеством (время процесса, точность) и стабилизацию системы в точке экстремума.

### 2. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для объекта вида (1, 2) закон управления сформируем на основе метода локализации [3, 8]

$$u = K[F(G) - \dot{y}]. \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент усиления регулятора;

$G(y) = \partial Y / \partial y$  – градиент;  $F(G)$  – функция, отражающая желаемые свойства системы, которая формируется в виде:  $\dot{y} = F(G)$ .

Для реализации закона управления (3) необходимо оценивать градиент и производную выходной переменной динамической части объекта. С этой целью в реальных системах используются дифференцирующие устройства [3]. Оценка производной выходной переменной динамической части объекта осуществляется с помощью дифференцирующего фильтра, который имеет вид

$$\mu_1 \dot{\hat{y}} = y - \hat{y}. \quad (4)$$

Для определения градиента применяется специальное устройство оценки частной производной [7, 8],

$$\mu_2 \dot{Y} = (Y - \hat{Y}) |\dot{\hat{y}}|, \quad (5)$$

$$\hat{G} = \mu_2^{-1} (Y - \hat{Y}) \text{sign}(\dot{\hat{y}}). \quad (6)$$

Здесь  $\hat{y}$  и  $\hat{Y}$  – оценки величин  $y$  и  $Y$  соответственно;  $\hat{G}$  – оценка градиента;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – малые постоянные времени, характеризующие скорость процессов,

протекающих в дифференцирующем фильтре и в устройстве оценки частной производной.

Наличие в системе этих малых постоянных времени приводит к возникновению в ней разнотемповых процессов [7, 8].

### 3. РАЗДЕЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ

Рассмотрим подробнее динамику системы (1–6). Так как в правой части имеются производные, то для выделения разнотемповых процессов предварительно требуется привести описание системы к стандартному виду с помощью замены переменной [13].

В результате преобразованная модель системы (1–6) принимает вид

$$\begin{cases} \dot{y} = f + bK[F - z], \\ \mu_1 \dot{z} = f + bK[F - z] - z, \\ \mu_2 \dot{\hat{G}} = (G(f + bK[F - z]) - \hat{G}z) \text{sign}(z). \end{cases} \quad (7)$$

Используя рекомендации [13, 14], последовательно будем выделять движения.

#### а. Подсистема сверхбыстрых движений

Сверхбыстрые движения (СБД) возникают из-за наличия постоянной времени дифференцирующего фильтра и описываются линейным уравнением:

$$\mu_1 \dot{z} = f + bK[F - z] - z,$$

$$\dot{\hat{G}} = \text{const}, \quad y = \text{const}.$$

Характеристическое уравнение подсистемы сверхбыстрых движений (ПСБД) следующее:

$$A_{\text{ПСБД}} = \mu_1 p + bK + 1. \quad (8)$$

Как видно из уравнения (8), эта подсистема всегда устойчива при любых значениях  $\mu_1$  и  $K$ .

#### б. Подсистема быстрых движений

Выделенная подсистема быстрых движений (ПБД) имеет вид

$$\begin{cases} \mu_2 \dot{\hat{G}} = (G - \hat{G}) \left| \frac{F + bKF}{1 + bK} \right|, \\ y = \text{const}, \\ f = \text{const}, \\ F = \text{const}, \\ b = \text{const}, \end{cases}$$

или с учетом полученных констант

$$\mu_2 \dot{\hat{G}} = (G - \hat{G}) y, \quad (9)$$

где

$$y = \left| \frac{f + bKF}{1 + bK} \right| = \text{const}.$$

По уравнению (9) видно, что ПБД будет устойчива только в том случае, когда

$$G < \hat{G}.$$

### с. Подсистема медленных движений

Подсистема медленных движений (ПМД) описывается соотношением

$$\dot{y} = \left| \frac{f + bKF}{1 + bK} \right|.$$

Так как в соответствии с методом локализации, коэффициент усиления регулятора достаточно большой, то в асимптотике при  $K \rightarrow \infty$ , получим

$$\dot{y} = F(G) = -\alpha G(y), \quad (10)$$

что соответствует предъявляемым к системе требованиям. Здесь  $\alpha$  – коэффициент, рассчитанный в соответствии с желаемым временем выхода на экстремум.

Из выражения (10) видно, что медленные движения соответствуют желаемому процессу, т.е. они априори устойчивы.

### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ

При расчете систем исследуемого типа необходимо обеспечить адекватный выбор коэффициента усиления регулятора и постоянных времени дифференцирующих устройств, причем сделать это с учетом гарантированного разделения процессов. Коэффициент регулятора  $K$  выбирается с учетом статической ошибки по обычному соотношению для метода локализации [3, 8]

$$bK \geq (20 \div 100). \quad (11)$$

Для выбора параметров дифференцирующих устройств предлагается следующая процедура, обеспечивающая разделение движений.

Поскольку ПМД и ПБД являются линейными, то следует определить для них корни характеристических уравнений и обеспечить их разнесение. При этом оценкой разделимости процессов является соотношений [3]

$$|p_\sigma| \geq D \times |p_m|, \quad (12)$$

где  $|p_\sigma|$  – корень характеристического уравнения быстрых движений,  $|p_m|$  – корень характеристического уравнения медленных движений;  $D$  – степень разделения движений (как правило, достаточно задать  $D=10$ ).

Постоянную времени ФОЧП  $\mu_2$  рекомендуется выбирать с учетом максимального значения  $f_m$  из диапазона изменения функции  $f$  по следующему соотношению [13]

$$\mu_2 = \frac{f_m}{|p_m| (1 + bK)}. \quad (13)$$

На следующем этапе можно выбрать постоянную времени дифференцирующего фильтра  $\mu_1$ , которая в соответствии с условием разделимости движений должна быть на порядок меньше постоянной времени ФОЧП, т.е.

$$\mu_1 = 0,1\mu_2. \quad (14)$$

Поскольку процесс поиска экстремума всегда осуществляется из определенного начального состояния, то для адекватной оценки производных в дифференцирующих устройствах необходимо задавать согласованные с объектом начальные значения ( $y = \hat{y}, Y = \hat{Y}$ ). Следует отметить, что рассогласование начальных состояний приводит к затягиванию быстрых и сверхбыстрых процессов, что, в конечном счете, может существенно повлиять на процесс выхода на экстремум.

### ПРИМЕР

Рассмотрим объект вида

$$\begin{cases} \dot{y} = -20y^2 + bu, \\ Y = Y_0(t) + a(y - y_0(t))^2, \end{cases}$$

где  $b = 20$ ,  $a = 0,5$ . Требуется обеспечить выход на экстремум за время  $t_n = 0,25$  с из начального состояния объекта  $y(0) = 0,7$  со статической ошибкой  $\Delta^0 \leq 5\%$ .

На основании требований к процессу в замкнутой системе формируем желаемое уравнение

$$F(G) = -\frac{c}{2a} = 15G$$

( $c$  – корень желаемого уравнения).

Коэффициент усиления регулятора рассчитывается согласно соотношению (11) и требуемой статической ошибки,  $K = 1$ .

Корень характеристического уравнения ПМД выбирается в соответствии с желаемым уравнением, т.е.

$$|p_m| = \frac{c}{2a} = 15.$$

Выражение для постоянной времени ФОЧП (13) принимает вид

$$\mu_2 = \frac{20y^2(0)}{|p_\sigma| (1 + bK)}.$$

Согласно (12) получаем постоянную времени ФОЧП  $\mu_2 = 0,003$ . Для дифференцирующего фильтра с учетом выражения (14) получим  $\mu_1 = 0,0003$ . Ее немного уменьшим с целью улучшения отработки рассогласования начальных условий,  $\mu_1 = 0,00025$ .

Схема моделирования всей системы, разработанная в программе *MatLab Simulink*, приведена на *Рис. 1*

Рассмотрим работоспособность системы и влияние начальных условий дифференцирующих устройств. На всех последующих графиках приняты следующие обозначения: черным цветом показаны переходные процессы, соответствующие согласованным начальным условиям; красным – при увеличении начальных условий в дифференцирующих устройствах на 20%; зеленым – при уменьшении на 20%.

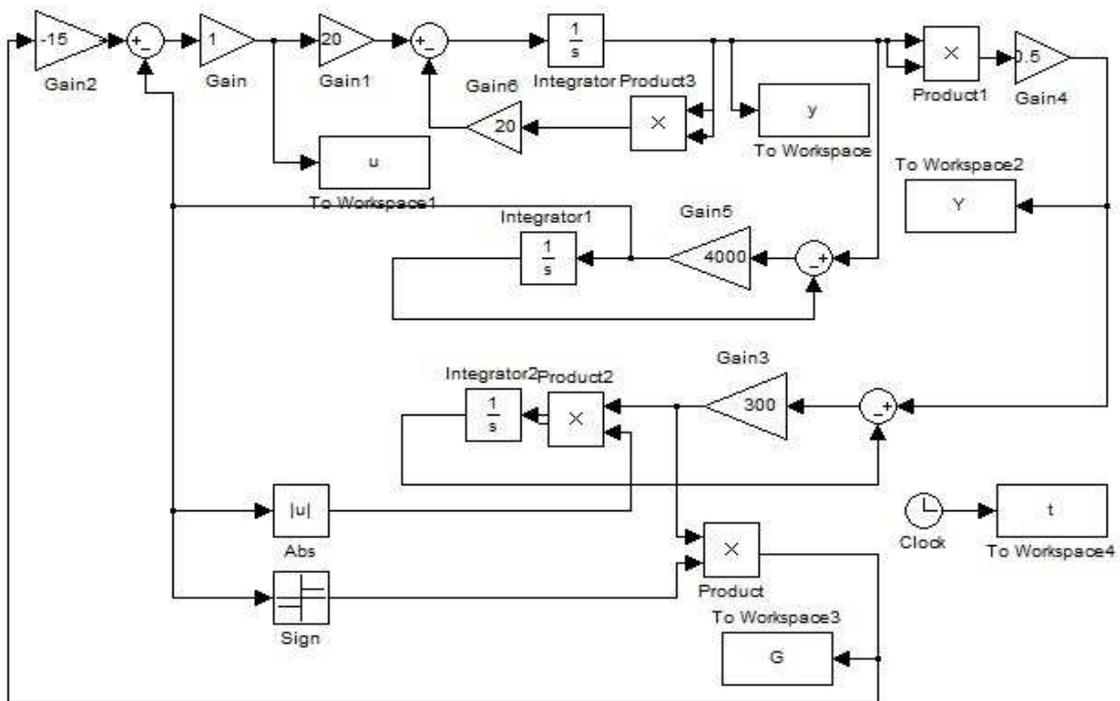


Рис. 1. Структурная схема рассматриваемой системы

**а) Процессы в системе без учета влияния дрейфа экстремума**

На Рис.2–6 показано, как изменения начальных условий в дифференцирующем фильтре влияет на поиск экстремума при условии ( $Y_0(t) = 0; y_0(t) = 0$ ).

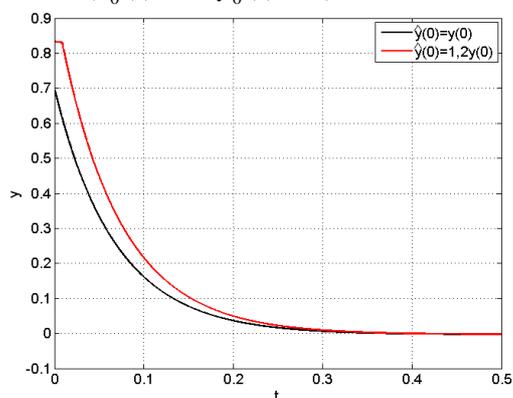


Рис. 2. Влияние н.у. на  $y(t)$

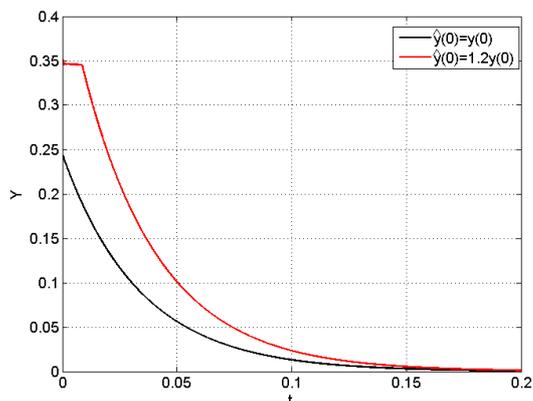


Рис. 3. Влияние н.у. на  $Y(t)$

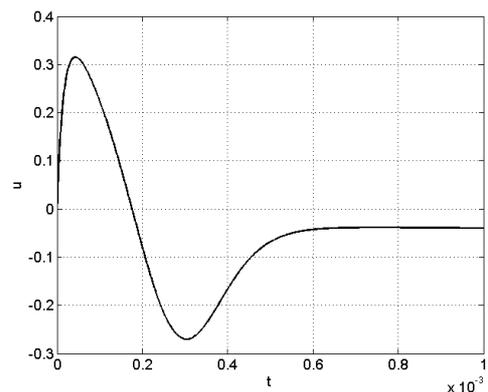


Рис. 4.  $u(t)$  при согласованных н.у.

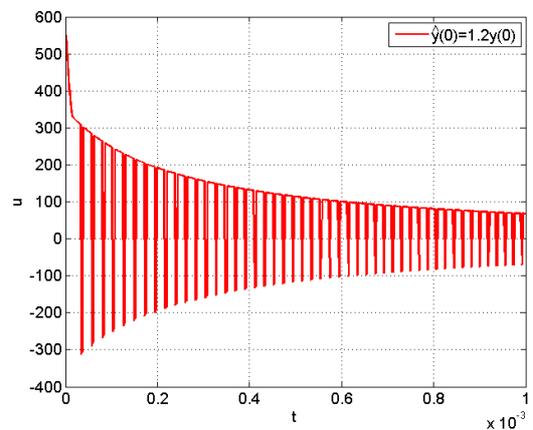


Рис. 5. Влияние н.у. на  $u(t)$

Как видно, процесс устанавливается в точке экстремума за время  $t \approx 0,15$  с. На начальном участке обрабатывается рассогласование начальных условий и при  $t \approx 0,013$  с процесс соответствует идеальному (Рис. 3). Причем при

несогласованных начальных условиях на этапе рассогласования изменяется градиент (Рис.6). Также при рассогласовании начальных условий наблюдается бросок по управлению (Рис. 5).

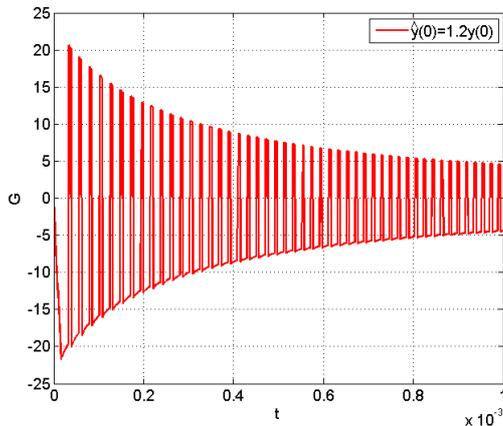


Рис. 6. Влияние н.у. на  $G(t)$

На Рис. 7–10 показаны изменения начальных условий в устройстве оценки частной производной и их влияние на поиск экстремума при  $(Y_0(t) = 0; y_0(t) = 0)$ .

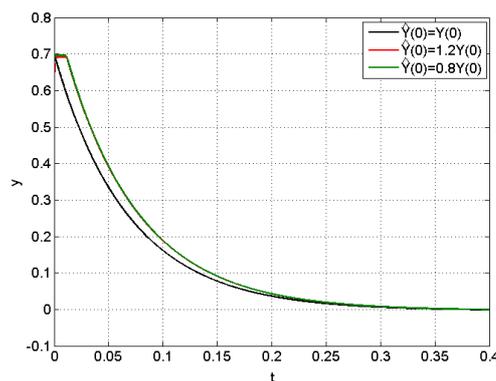


Рис. 7. Влияние н.у. на  $y(t)$

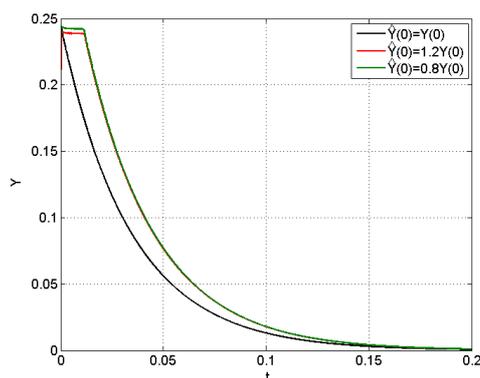


Рис. 8. Влияние н.у. на  $Y(t)$

Как видно, система обрабатывает рассогласование начальных условий на начальном участке переходного процесса. При  $t \approx 0,017$  с переходные процессы при несогласованных начальных условиях соответствуют идеальному и при  $t \approx 0,15$  с устанавливаются в точке экстремума Рис. 8. По управлению наблюдается большой бросок в начальный момент времени

при рассогласованных начальных условиях (Рис. 9), причем при уменьшении начальных условий бросок почти в 3 раза больше.

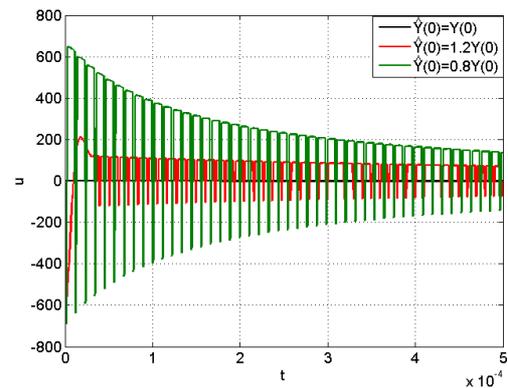


Рис. 9. Влияние н.у. на  $u(t)$

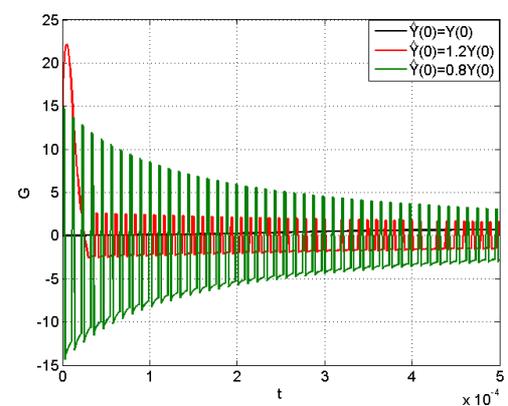


Рис. 10. Влияние н.у. на  $G(t)$

При несогласованных начальных условиях на этапе рассогласования изменяется градиент так же, как и при изменении начальных условий в дифференцирующем фильтре (Рис. 10).

### б) Влияние вертикального дрейфа экстремума

На Рис. (11–12) показано, как изменение начальных условий в дифференцирующих устройствах влияет на поиск экстремума при наличии относительно медленного вертикального дрейфа, модель которого задана линейным соотношением вида:

$$(Y_0(t) = 0,02t; y_0(t) = 0) .$$

Как видно по представленным графикам (Рис. 12), за время  $t \approx 0,15$  с система выходит на экстремум и отслеживает дрейф в полном соответствии с его изменением. Обработка рассогласования начальных условий происходит на начальном этапе, при этом время выхода на экстремум не меняется.

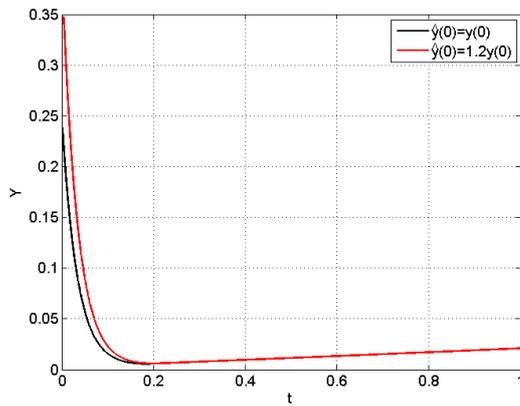


Рис. 11. Влияние н.у. сверхбыстрых процессов на  $Y(t)$

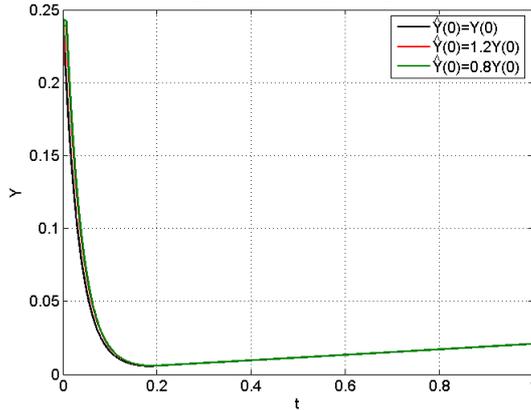


Рис. 12. Влияние н.у. быстрых процессов на  $Y(t)$

**в) Влияние горизонтального дрейфа, действующего по направлению движения системы**

На Рис. 13–17 показано влияние относительно медленного горизонтального дрейфа с моделью вида  $(Y_0(t) = 0; y_0(t) = 0,02t)$  на поиск экстремума.

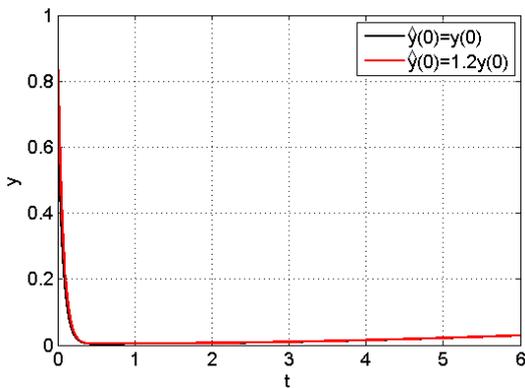


Рис. 13. Влияние н.у. сверхбыстрых процессов на  $y(t)$

При этом от процесса к процессу изменялись и начальные условия в дифференцирующих устройствах.

При действии горизонтального дрейфа система выходит на экстремум за  $t \approx 0,15$  с и отслеживает дрейф. Отработка рассогласования начальных условий объекта и дифференцирующего фильтра происходит за  $t \approx 0,018$  с (Рис.14), а отработка рассогласования началь-

ных условий объекта и ФОЧП за  $t \approx 0,025$  с (Рис.16).

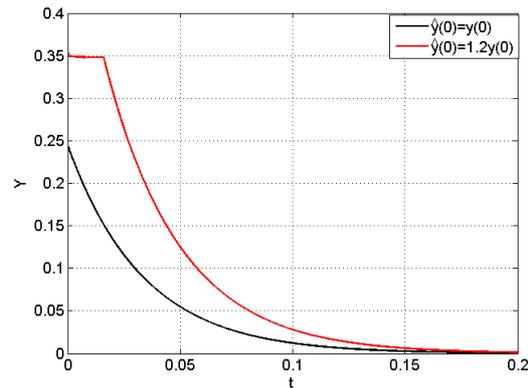


Рис. 14 Влияние н.у. сверхбыстрых процессов на  $Y(t)$

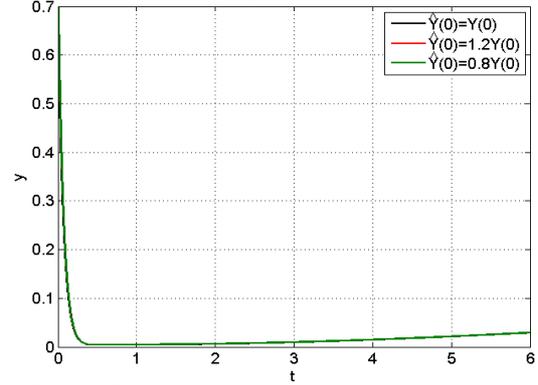


Рис. 15. Влияние н.у. быстрых процессов на  $y(t)$

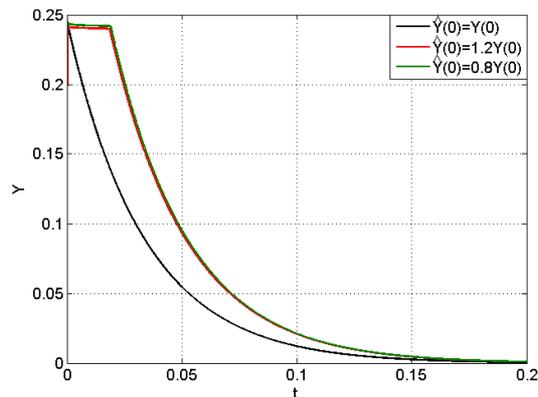


Рис. 16. Влияние н.у. быстрых процессов на  $Y(t)$

**г) Влияние горизонтального дрейфа, действующего против направления движения системы**

На Рис. 17–18 показаны изменения начальных условий в дифференцирующих устройствах и их влияние на поиск экстремума при линейном, относительно медленном, горизонтальном дрейфе вида  $(Y_0(t) = 0; y_0(t) = 0,02t)$ .

Как видно по графикам, при этом типе горизонтального дрейфа стабилизация системы в точке экстремума происходит за то же время, что и при действии горизонтального дрейфа, действующего по направлению движения системы. Отработка рассогласования начальных условий в дифференцирующих устройствах

происходит в начальный момент и не влияет существенно на переходный процесс системы. Переходные процессы  $Y(t)$  идентичны переходным процессам  $Y(t)$  при влиянии горизонтального дрейфа, действующего по направлению движения системы.

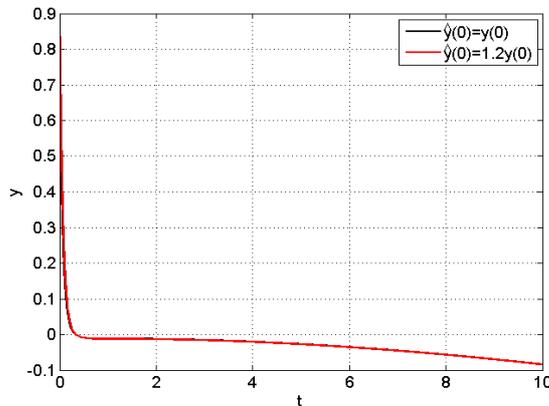


Рис. 17. Влияние н.у. сверхбыстрых процессов на  $y(t)$

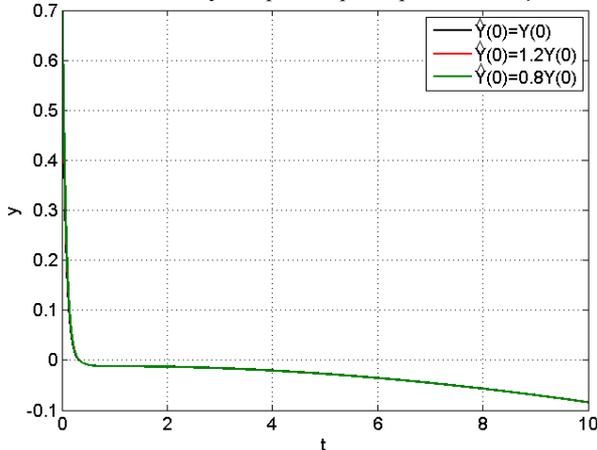


Рис. 18. Влияние н.у. быстрых процессов на  $y(t)$

#### д) Поиск максимума экстремальной характеристики

На Рис. 19–20 показаны изменения начальных условий в дифференцирующих устройствах и их влияние на поиск максимального значения экстремальной функции при отсутствии дрейфа ( $Y_0(t) = 0; y_0(t) = 0$ ).

Переходные процессы, как видно на Рис. 19–20, аналогичны поиску минимума, но симметрично отражены относительно оси  $t$ . Время отработки рассогласования начальных условий в ФОЧП  $t \approx 0,027$  с, что приводит к увеличению времени установления системы в точку экстремума ( $t \approx 0,17$  с), но не превышает заданного требования к длительности процессов.

Время отработки рассогласования начальных условий в дифференцирующем фильтре  $t \approx 0,025$  с. После отработки рассогласования процесс соответствует идеальному и устанавливается в точку экстремума примерно в то же время, что и при согласованных начальных условиях ( $t \approx 0,15$  с).

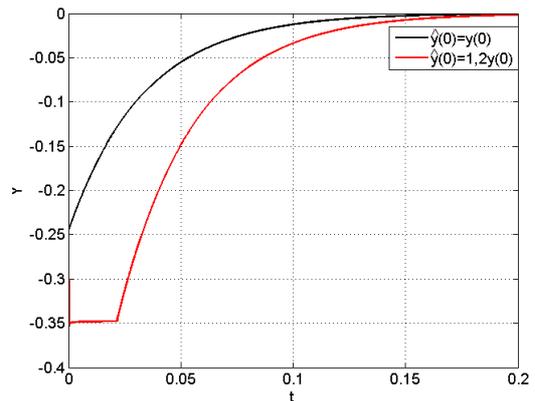


Рис. 19. Влияние н.у. сверхбыстрых процессов на  $Y(t)$

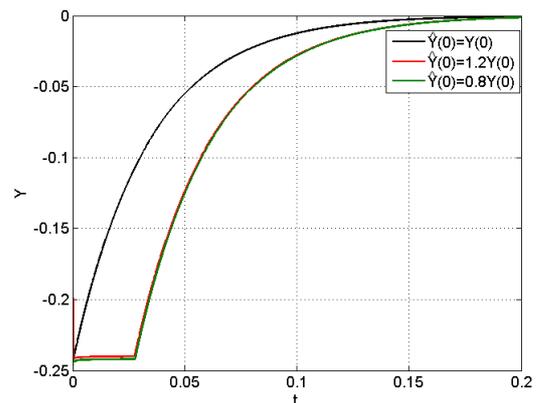


Рис. 20. Влияние н.у. быстрых процессов на  $Y(t)$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показывают, что одноконтурная система экстремального регулирования, основанная на методе локализации и рассчитанная по предложенным соотношениям, обрабатывает рассогласование начальных условий объекта и дифференцирующих устройств на начальном участке в темпе с процессами, протекающими в системе, и обеспечивает движение к экстремуму за заданное время.

Система отслеживает медленные горизонтальный и вертикальный дрейфы, осуществляет поиск минимума и максимума, не превышая заданного времени переходного процесса.

При расчете такого рода систем рекомендуется ориентироваться на разделение движений и осуществлять ее расчет с учетом приведенных соотношений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ariyur K.B., Krstic M. Real-time optimization by extremum-seeking control. – New-Jersey: Wiley Interscience Publication. 2003. – 203 с.
- [2] Олейников В.А., Зотов Н.С., Пришвин А.М. Основы оптимального и экстремального управления. – Москва: Высшая школа. – 1969. – 296 с.
- [3] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. – М.: Высшая школа. 2-е изд. – 2006. – 365 с.

- [4] ПИД-регуляторы на практических примерах: <http://pidcontrollers.narod.ru/index/0-2>
- [5] Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем. - СПб: БХВ – Петербург. – 2004. – 640 с.
- [6] Zhmud V., Yadrishnikov O. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function // Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2013), 28 June – 1 July 2013. – Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. – V. II. – P. 265–270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [7] Frantsuzova G.A. Features of different types of automatic extremum seeking systems based on localization method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2012. – V. 48, № 5. – P. 438–446.
- [8] Французова Г.А. Синтез систем экстремального регулирования, инвариантных к возмущениям // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2011. – № 2. – С. 47–58.
- [9] Уткин В.И. Скользящие режимы и их применения в системах с переменной структурой. – М.: Наука. – 1974. – 272 с.
- [10] Французова Г.А. Двухконтурные системы экстремального регулирования с предварительной стабилизацией динамической части // Автоматика. – 2006. – № 2. – С. 29–37.
- [11] Французова Г.А. Двухконтурные системы экстремального регулирования с формированием заданной динамики // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 5. – С. 7–11.
- [12] 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.
- [13] Французова Г.А. Условия разделимости движений для автоматических систем поиска экстремума с вектором скорости в управлении // Научный вестник НГТУ. – 2003. – № 1 (14). – С. 3–16.
- [14] Французова Г.А. Об условиях разрешимости задачи синтеза автоматической системы экстремального управления // Научный вестник НГТУ. – 2001. – № 2. – С. 3–9.
- [15] В.А. Жмудь, А.Н. Загорин, А.В. Полищук, О.Д. Ядрышников. Анализ метода проектирования робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации. Автоматика и программная инженерия. 2012. № 1 (1) С. 7–16.
- [16] A.A.Voevoda, V.A.Zhmud, R.Yu. Ishimtsev, V.M.Semibalamut. The modeling tests of the new PID-regulators structures. // Proceedings of the 18th IASTED International Conference “Applied Simulation and Modeling” (ASM 2009). Sept. 7-9, 2009. Palma de Mallorka, Spain. P.165–168.
- [17] Жмудь В.А., Ядрышников О.Д. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.

## About the Influence of the Initial Conditions on the Properties of a Single-Extreme Control System Based on the Method of Localization

G.A. FRANTSUZOVA, N.Y. SHILKOVA

*Abstract:* This paper provides guidance on the choice of controller parameters and special derivating devices for single-extreme control system based on the method of localization. By simulation, the effect of initial states and derivating devices extremum drift influence on the search for the minimum (maximum) of the quality function has been investigated.

*Key words:* automation, extreme system localization method, single-circuit system, initial conditions, drift of extremum

### REFERENCES

- [1] Ariyur K.B., Krstic M. Real-time optimization by extremum-seeking control. – New-Jersey: Wiley Interscience Publication. 2003. – 203 s.
- [2] Olejnikov V.A., Zotov N.S., Prishvin A.M. Osnovy optimal'nogo i jekstremal'nogo upravlenija. - Moskva: Vysshaja shkola. – 1969. – 296 s.
- [3] Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija. – М.: Vysshaja shkola. 2-e izd. – 2006. – 365 s.
- [4] PID-regulatory na prakticheskikh primerah: <http://pidcontrollers.narod.ru/index/0-2>
- [5] Nikulin E.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravlenija. Chastotnye metody analiza i sinteza sistem. - SPb: BHV – Peterburg. – 2004. – 640 s.
- [6] Zhmud V., Yadrishnikov O. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function // Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2013), 28 June – 1 July 2013. – Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. – V. II. – P. 265–270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [7] Frantsuzova G.A. Features of different types of automatic extremum seeking systems based on localization method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2012. – V. 48, № 5. – P. 438–446.
- [8] Francuzova G.A. Sintez sistem jekstremal'nogo regulirovanija, invariantnyh k vozmushhenijam // Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2011. – № 2. – S. 47–58.
- [9] Utkin V.I. Skol'zjashhie rezhimy i ih primenenija v sistemah s peremennoj strukturoj. – М.: Nauka. – 1974. – 272 s.
- [10] Francuzova G.A. Dvuhkonturnye sistemy jekstremal'nogo regulirovanija s predvaritel'noj stabilizaciej dinamičeskoj chasti // Avtometrija. – 2006. – № 2. – S. 29–37.
- [11] Francuzova G.A. Dvuhkonturnye sistemy jekstremal'nogo regulirovanija s formirovaniem zadannoj dinamiki // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. – 2008. – № 5. – S. 7–11.
- [12] Francuzova G.A. Sintez dvuhkonturnoj astatičeskoj sistemy jekstremal'nogo regulirovanija na osnove principa lokalizacii // Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki. 2004, T.VII. № 1 (17). S. 145–150.

- [13] Francuzova G.A. Usloviya razdelimosti dvizhenij dlja avtomaticheskikh sistem poiska jekstremuma s vektorom skorosti v upravlenii // Nauchnyj vestnik NGTU. – 2003. – № 1 (14). – S. 3–16.
- [14] Francuzova G.A. Ob uslovijah razreshimosti zadachi sinteza avtomaticheskoi sistemy jekstremalnogo upravlenija // Nauchnyj vestnik NGTU. – 2001. – № 2. – S. 3–9.
- [15] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin, A.V. Polishhuk, O.D. Jadyrshnikov. Analiz metoda proektirovanija robstnogo reguljatora metodom dvojnoj iterativnoj parallel'noj chislennoj optimizacii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2012. № 1 (1) S. 7–16.
- [16] A.A.Voevoda, V.A.Zhmud, R.Yu. Ishimtsev, V.M.Semibalamut. The modeling tests of the new PID-regulators structures. // Proceedings of the 18th IASTED International Conference “Applied Simulation and Modeling” (ASM 2009). Sept. 7-9, 2009. Palma de Mallorca, Spain. P.165–168.
- [17] Zhmud V.A., Jadyrshnikov O.D. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). S. 24–29.



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



**Наталья Юрьевна Шилкова** – студентка факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теория автоматического управления, синтез регуляторов.  
**E-mail:** [ya\\_komar@mail.ru](mailto:ya_komar@mail.ru)