

## САМОНАСТРАИВАЮЩИЙСЯ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ В РЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМАХ С ПЕРЕМЕННЫМ ГИСТЕРЕЗИСОМ

*В.Е. Вохрышев, Д.А. Рагазин*

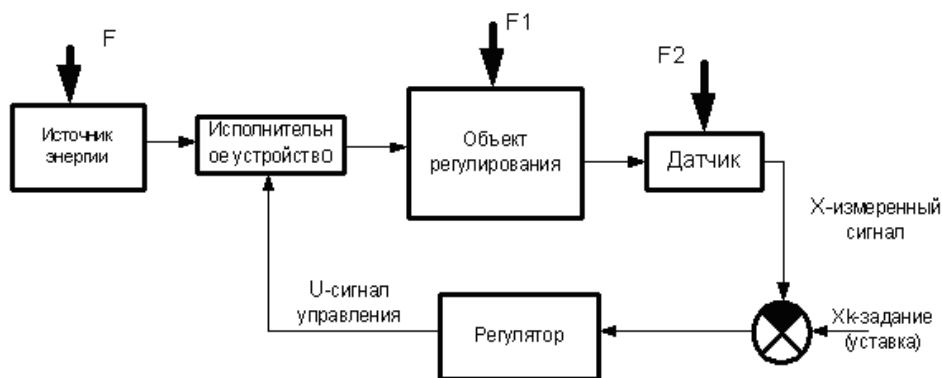
Самарский государственный технический университет  
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Предложен и исследован самонастраивающийся алгоритм в релейной системе управления с переменным гистерезисом, обеспечивающий стабилизацию амплитуды автоколебаний и их симметричность относительно уставки при несимметричных ограничениях на управляющие воздействия и постоянно действующих возмущениях.*

**Ключевые слова:** самонастраивающийся алгоритм, релейная система управления с переменным гистерезисом.

В практике конструирования и применения систем автоматического управления динамическими объектами благодаря высокому быстродействию и надежности широкое распространение получили релейные системы, работающие по принципу «включено – выключено», «открыто – закрыто». Существенным преимуществом релейных систем является также значительное упрощение исполнительного механизма за счет снижения требований к его характеристикам, возможность получения заданных динамических свойств системы при малых весах и габаритах управляющих устройств [1, 2].

Функциональная схема релейной системы представлена на рис. 1. Здесь  $F$ ,  $F1$  и  $F2$  – возмущающие воздействия.



Р и с. 1. Функциональная схема релейной системы

Под действием изменяющегося скачком управляющего воздействия  $U$ , которое может быть как симметричным, так и асимметричным относительно некоторого значения, в релейной системе возникают автоколебания определенной частоты и ам-

---

*Валерий Евгеньевич Вохрышев (д.т.н., доц.), профессор, каф. автоматики и управления в технических системах.*

*Дмитрий Александрович Рагазин, аспирант, каф. автоматики и управления в технических системах.*

плитуды, значения которых определяются как величинами управляющего и возмущающих воздействий, так и динамическими свойствами системы.

При этом релейный регулятор в автоколебательной системе может рассматриваться как модулятор, высокочастотное воздействие на входе релейного регулятора – как сигнал несущей частоты, а входные низкочастотные сигналы (задающее воздействие, постоянно действующие возмущения) – как модулирующие сигналы [3]. Поэтому при асимметричном управлении и действии как сигнальных, так и параметрических возмущений в релейной системе изменяются параметры автоколебаний, характеризующие качество управления, и возникает трудно устранимая известными средствами статическая ошибка, понимаемая как отклонение среднего значения автоколебаний регулируемой координаты от своего заданного значения в установившемся режиме работы. В связи с этим возникают задачи автоматической стабилизации параметров автоколебаний и повышения точности управления.

В настоящей статье предлагается и исследуется релейный самонастраивающийся алгоритм управления динамическими объектами, позволяющий обеспечить в условиях неопределенности параметров объекта и среды, при асимметричном управляющем воздействии и неполной информации о состоянии объекта стабилизацию амплитуды автоколебаний на заданном уровне и их симметричность относительно уставки. Под неполной информацией о состоянии объекта понимается доступ к измерению только регулируемой координаты или ее ошибки. Алгоритм построен на базе закона управления, реализованного в релейном регуляторе с переменным гистерезисом [4], уравнение которого при асимметричном управлении имеет вид

$$U(x) = \Phi(M(x)), \quad (1)$$

где  $U(x)$  – управление,  $\Phi(M(x))$  – оператор,  $M(x)$  – функция переключения управления,

$$\Phi(M(x)) = \begin{cases} B, & \text{при } M(x) > 0, \\ 0, & \text{при } M(x) \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

$B$  – максимальная величина управляющего воздействия («полка реле»),

$$M(x) = x_k + k \cdot (x_e - x_k) - x, \quad (3)$$

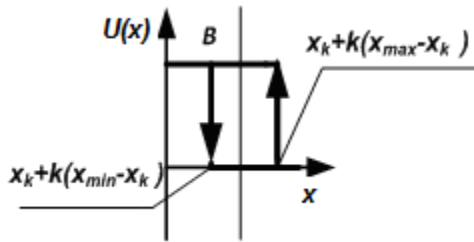
$x_e$  – ближайшие к рассматриваемому моменту времени  $t$  экстремальные значения  $x(t)$  (локальные максимумы  $x_{\max}(t)$  и минимумы  $x_{\min}(t)$ );  $k$  – постоянный коэффициент, который может устанавливаться в диапазоне  $-1 < k < 1$ ;  $x_k$  – заданное конечное состояние (уставка);  $x$  – текущее значение регулируемой величины.

В данном алгоритме процедура определения экстремальных значений обеспечивается путем сравнения текущего значения регулируемой координаты и его сдвинутого на величину  $\Delta$  значения и последующего запоминания в ячейках памяти (в зависимости от результата сравнения) текущего значения регулируемой координаты.

Особенность алгоритма (1) состоит в том, что переключения управления могут происходить или с опережением по отношению к уставке (при  $0 < k < 1$ ), или с запаздыванием (при  $-1 < k < 0$ ).

Статическая характеристика управляющего устройства (регулятора), реализующего уравнения (2) и (3) при коэффициенте  $k > 0$ , представлена на рис. 2. Из рисунка видно, что переключения управления в этом случае будут происходить с опережением («недоходом») регулируемой координаты до заданного конечного значе-

ния, образуя гистерезисную петлю, что эквивалентно опережению фазы при введении производной в закон управления.



Р и с. 2. Статическая характеристика регулятора

Понятно, что величина зоны гистерезиса будет переменной, поскольку моменты переключений, как следует из выражения (3), поставлены в линейную зависимость от амплитуды автоколебаний  $A(t) = x_e - x_k$  в системе.

Очевидно, что для технической реализации алгоритма управления (2) необходимо запоминать экстремальные значения входного сигнала, умножить их на коэффициент, меньший единицы, и сравнивать этот сигнал с его текущим значением и уставкой.

При аналитическом исследовании динамики релейных систем используются чаще всего приближенные методы, в частности, метод гармонической линеаризации, позволяющий определить частоту и амплитуду автоколебаний выходной координаты объекта в переходном и установившемся режимах его работы. В установившемся режиме параметры автоколебаний в системе с линейным объектом определяются по уравнению гармонического баланса

$$W(j\omega) = V(A),$$

где  $W(j\omega)$  – амплитудно-фазовая характеристика объекта;  $V(A) = -1/W(A)$  – инверсное значение комплексного усиления  $W(A)$  релейного регулятора.

Для исследуемого регулятора (2) коэффициент  $W(A)$ , полученный методом гармонической линеаризации [3], имеет вид

$$W(A) = \frac{2B}{\pi A} \left( \sqrt{1 - k^2} + jk \right), \quad (4)$$

а его инверсное значение

$$V(A) = \frac{\pi A}{2B} \left( -\sqrt{1 - k^2} + jk \right). \quad (5)$$

Годограф уравнения (5) на комплексной плоскости представляют собой прямую, которая проходит через начало координат соответственно во втором квадранте при  $1 > k > 0$  и в третьем квадранте при  $0 > k > -1$  и составляет с действительной осью углы соответственно  $\pi - \arcsin(k)$  и  $\frac{2}{3} \pi - \arcsin(k)$ . При изменении коэффициента  $k$  в указанном выше диапазоне годограф  $V(A)$  поворачивается по часовой стрелке во втором и третьем квадрантах комплексной плоскости на  $180^\circ$ . Это позволяет существенно расширить диапазоны генерирования как частоты, так и амплитуды автоколебаний в системе и управлять ими изменением коэффициента  $k$ .

Решение поставленной выше задачи по автоматическому обеспечению заданной точности управления на базе соотношения (1) в условиях неопределенности параметров объекта и среды предлагается в данной статье путем модификации функции переключения (3) следующим образом:

$$M(x) = c(t) + k(t) \cdot (x_3 - c(t)) - x \quad , \quad (6)$$

где  $c(t) = k_1 \cdot x_k + q(t)$ ;

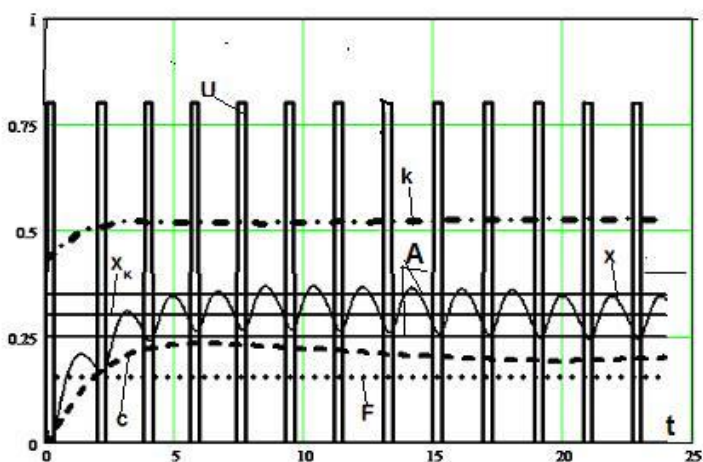
$k(t), k_1$  – ограниченные коэффициенты  $1 > k(t) > -1$ , а  $0 < k_1 < 1$ ;

$$q(t) = k_2 \cdot \int_0^t (x_k - \frac{x_{max} + x_{min}}{2}) dt ;$$

$c(t)$  – смещение сигнала задания  $x_k$  (уставки), обеспечивающее смещение и выходного сигнала объекта (регулируемой координаты  $x$ ) относительно  $x_k$  до тех пор, пока среднее значение регулируемой координаты, определяемое как  $\frac{x_{1max} + x_{1min}}{2}$ , не станет равным  $x_k$ . Для стабилизации амплитуды автоколебаний в функции переключения автоматически изменяется также переменный коэффициент  $k(t)$ , например по П-, ПИ- или И-законам:

$$k(t) = k_0 + k_u \cdot \int_0^t (z - |x_3 - x_k|) dt + k_n \cdot (z - |x_3 - x_k|) ,$$

где  $z$  – заданное значение амплитуды автоколебаний;  $k_0$  – начальное значение коэффициента  $k(t)$ , задаваемое произвольно в диапазоне ограничений, приведенных выше;  $k_u$  и  $k_n$  – постоянные коэффициенты, обеспечивающие сходимость процессов самонастройки во всем (ограниченном заданной областью) диапазоне изменения параметров объекта;  $|x_3 - x_k|$  – текущее значение амплитуды автоколебаний.



Р и с. 3. Процессы в релейной самонастраивающейся системе:

U – управление, k – коэффициент в функции переключения как функция времени; A – границы заданной амплитуды автоколебаний; x – текущее значение регулируемой координаты;  $x_k$  – уставка; c – процесс изменения уставки; F – постоянно действующее возмущающее воздействие

Алгоритм (1) с функцией переключения (6) был исследован методом цифрового моделирования в системах управления различными динамическими объектами в условиях действия как сигнальных, так и параметрических возмущений.

Рис. 3, полученный методом цифрового моделирования релейной системы с управлением (3) и линейным объектом

$$p^3x + 5.5p^2x + 9.5px + 5x = 7.5u + F,$$

где  $p = \frac{d}{dt}$ , иллюстрирует процессы автоматического изменения коэффициента  $k(t)$  и уставки  $s(t)$  в функции переключения (6), приводящие к стабилизации амплитуды автоколебаний на заданном уровне и их симметричности относительно уставки. Начальные условия – нулевые.

**Выводы.** Предложен и исследован самонастраивающийся алгоритм управления в релейных системах, обеспечивающий при неполной информации о состоянии объекта в условиях неопределенности параметров объекта и среды стабилизацию амплитуды автоколебаний и отличающийся от известных одновременным автоматическим изменением заданной конечной величины (уставки) и частоты автоколебаний регулируемой координаты.

Показано методом цифрового моделирования, что алгоритм обеспечивает при действии асимметричного управляющего воздействия в системе симметричные относительно уставки автоколебания с заданной амплитудой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цыпкин Я.З. Релейные автоматические системы. – М.: Наука, 1974. – 575 с.
2. Фалдин Н.В. Релейные системы автоматического управления // Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – С. 573-636.
3. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – Л.: Энергия, 1969. – 375 с.
4. Пат. № 2359305. Российская Федерация. Регулятор с релейной характеристикой / В.Е. Вохрышев. – Оpubл. 2009. Бюл. №17.

*Статья поступила в редакцию 3 октября 2011 г.*

## SELF-ADAPTING CONTROL ALGORITHM IN RELAY SYSTEMS WITH VARIABLE HYSTERESIS

*V.E. Vokhryshev, D.A. Ragazin*

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100

*In the article authors suggest adaptive algorithm in relay system with variable hysteresis, which provides oscillation amplitude stabilization and symmetry relative to given set point in the conditions of asymmetrical restriction on a control and permanent perturbations.*

**Key words:** *adaptive algorithm, relay system with variable hysteresis.*

---

*Valeriy E. Vokhryshev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Dmitry A. Ragazin, Postgraduate Student.*