

## Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 62-50

### РОБАСТНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ И ПАССИВНОЙ АДАПТАЦИЕЙ

***В.Е. Вохрышев***

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

E-mail: vohr3@yandex.ru

*Рассмотрены динамические характеристики объектов с запаздыванием. Предложены робастные структуры и алгоритмы их управления с пассивной (сигнальной) адаптацией. Исследованы статические и динамические свойства робастных самонастраивающихся систем с большим запаздыванием с предложенными алгоритмами, обеспечивающие устранение статических ошибок при действии постоянных задающих и возмущающих воздействий без использования интегрирующих элементов в основном контуре системы. Показано, что системы обладают низкой чувствительностью к вариациям параметров объекта и возмущающим воздействиям.*

**Ключевые слова:** робастная система, самонастраивающийся алгоритм, чувствительность систем с запаздыванием.

Большой класс объектов автоматизации образуют технологические процессы и динамические объекты в нефтяной, кабельной, нефтехимической промышленности, тепло- и электроэнергетике, особенность которых заключается в их значительной инерционности и наличии в структуре и каналах передачи информации звеньев запаздывания, оказывающих в системах автоматического управления существенное отрицательное влияние на устойчивость и качество регулирования. Изменяющаяся динамика подобных объектов усугубляет проблему создания надежных и эффективных систем автоматического управления.

Известны работы по синтезу регуляторов, направленные на уменьшение влияния запаздывания на устойчивость и качество управления путем:

- 1) компенсации запаздывания (включением в обратную связь системы определителей Смита и моделей управляемых объектов) [1, 2, 3];
- 2) применения специальных методов настройки управления [4];
- 3) синтеза систем автоматического регулирования в классе самонастраивающихся с активной адаптацией [5, 6].

Первые два способа, как показывает практика их исследования и примене-

ния, оказываются малоэффективными для управления объектами с изменяющейся динамикой и требуют модернизации стандартных регуляторов. Самонастраивающиеся системы оказываются достаточно сложными в технической реализации и настройке, не исключают наличия статических ошибок при действии сигнальных возмущений и недостаточно надежны в эксплуатации.

В связи с этим проблема синтеза простых и практически эффективных законов, алгоритмов и систем автоматического управления объектами с запаздыванием сохраняет свою актуальность.

Эффективность при этом определяется соотношением полезности результатов применения системы по назначению с затратами и потерями, обусловленными ее созданием и эксплуатацией.

Многие современные подходы к синтезу эффективного управления делают акцент на робастность систем – робастность устойчивости, робастность качества – в условиях изменения динамики объекта в ограниченном диапазоне.

В настоящей статье предлагаются и исследуются робастные структуры и алгоритмы самонастраивающихся систем с пассивной (сигнальной) адаптацией, предназначенные для управления объектами с большим запаздыванием и гарантирующие определенную совокупность инженерных требований к их качественным свойствам в переходном и установившемся режимах работы в условиях существенной неопределенности параметров объекта и среды.

Под «большим» в данном случае понимается время запаздывания, значительно превышающее максимальную постоянную времени объекта.

Передаточные функции объектов с запаздыванием обычно имеют вид

$$W_o(p) = W_1(p) e^{-p\tau}, \quad (1)$$

где  $W_1(p)$  – передаточная функция объекта без запаздывания;  $\tau$  – время запаздывания.

Математическое описание (1) получают во многих случаях по экспериментально полученной переходной характеристике объекта, выделяя в ней участок со временем запаздывания  $\tau$ , а передаточную функцию  $W_1(p)$  представляют в виде апериодического звена первого (реже второго) порядка

$$W_o(p) = \frac{k_o}{Tp + 1} e^{-p\tau}, \quad (2)$$

где  $k_o$  – коэффициент передачи объекта;

$T$  – его постоянная времени.

Уравнение (2), следовательно, лишь с той или иной степенью приближения отражает истинную динамику объекта.

Существуют объекты, в которых звено запаздывания выделяется как отдельный элемент (звено транспортного («чистого») запаздывания) [3]. Передаточная функция (2) в этом случае может иметь вид

$$W_o(p) = \frac{k_o}{Tp + 1} k_3 e^{-p\tau}, \quad (3)$$

где  $k_3$  – коэффициент передачи звена запаздывания.

### Частотные характеристики и устойчивость систем с запаздыванием

Частотные характеристики системы с запаздыванием определяются выражением

$$W_p(j\omega) = W_2(j\omega)e^{-j\omega\tau}, \quad (4)$$

где  $W_p(j\omega)$  – амплитудно-частотная характеристика разомкнутой системы.

Если

$$W_p(j\omega) = \frac{k_o \cdot k_1}{T \cdot j\omega + 1} e^{-j\omega\tau} = \frac{k}{T \cdot j\omega + 1} e^{-j\omega\tau}, \quad (5)$$

где  $k_1$  – коэффициент усиления пропорционального регулятора,  $k = k_o \cdot k_1$ , то тогда согласно критерию устойчивости Найквиста для устойчивых в замкнутом состоянии систем годограф (5) не должен охватывать точку  $-1, j0$ . Значения  $\tau = \tau_0$  и  $\omega = \omega_\pi$ , при которых  $W_p(j\omega)$  проходит через точку  $-1, j0$ , называются предельными [7] и определяются из уравнения

$$W_1(j\omega_\pi)e^{-j\tau_0\omega_\pi} = -1, \quad (6)$$

которое эквивалентно двум уравнениям:

$$|W_1(j\omega_\pi)| = -1; \quad (7)$$

$$\arg W_p(j\omega_\pi) = \arg W_1(j\omega_\pi) - \omega_\pi \tau_0 = -\pi(2m+1), \quad m = 1, 2, \dots$$

Отсюда предельное (минимальное) время запаздывания можно определить из условия

$$\tau_0 = \frac{\pi - \theta}{\omega_\pi},$$

где  $\theta = -\arg W_1(j\omega_\pi) = \text{arctg}(\omega_\pi T)$ .

Уравнение (7) для случая системы (5) имеет вид

$$k^2 = 1 + \omega_\pi^2 T^2,$$

откуда  $\omega_\pi$  и  $\tau_0$  соответственно равны

$$\omega_\pi^2 = \frac{k^2 - 1}{T^2};$$
$$\tau_0 = \frac{\pi - \text{arctg}(\omega_\pi T)}{\omega_\pi}.$$

Если годограф  $W_1(j\omega)$  лежит в окружности единичного радиуса ( $k < 1$ ), то система устойчива при любом значении запаздывания. Таким образом, изменением или заданием коэффициента усиления системы можно обеспечить устойчивость системы при изменении параметров объекта.

Понятно, что в замкнутой системе (5) всегда будет присутствовать статическая ошибка, величина которой при постоянном входном воздействии и отсутствии сигнальных возмущений не превышает значения

$$\varepsilon(t) = \frac{x_0}{1+k},$$

где  $x_0$  – задающее воздействие (уставка).

На рис. 1, 2 приведены предлагаемые структуры самонастраивающихся систем управления объектами (2) и (3) соответственно.

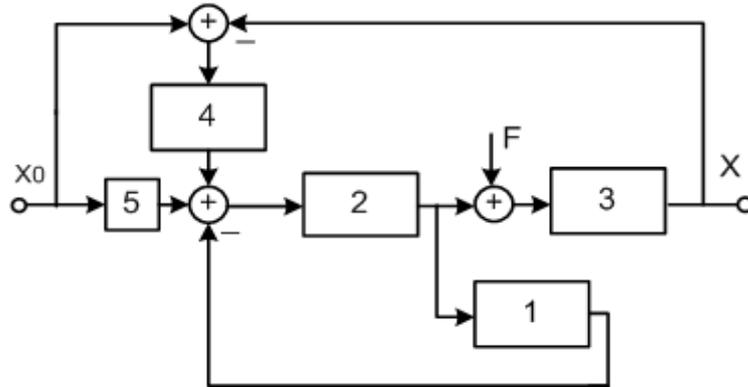


Рис. 1. Структура самонастраивающейся системы управления объектом (2):

1 – модель линейной части объекта управления (2) без запаздывания  $W_{1м}(p) = \frac{k_o}{Tp + 1}$ ;

2 – управляющее устройство  $W(p)=k_1$ ; 3 – объект  $W_1(p) = \frac{k_o}{Tp + 1} e^{-p\tau}$ ; 4 – исполни-

тельный элемент  $W_2(p) = \frac{k_4}{p}$ ; 5 – масштабирующий множитель  $k_2 \leq 1$ ; X – регулиру-

емая координата;  $X_0$  – задающее воздействие; F – возмущение

Здесь в прямом контуре управления используется стандартный пропорциональный регулятор (П-регулятор) с передаточной функцией  $W(p) = k_1$ , а статическая ошибка, неизбежно возникающая в системе при действии задающего и возмущающих сигнальных воздействий, устраняется путем автоматического масштабирования величины  $x_0$  специальным исполнительным устройством [8].

В каждой из приведенных структур образовано два контура управления: первый – исполнительным элементом 4, второй – П-регулятором и объектом с передаточной функцией  $W_1(p)$  (рис. 2) или его моделью (см. рис. 1). Исполнительное устройство (4), выполненное в виде интегрирующего звена с передаточной функцией  $W_2(p) = \frac{k_4}{p}$  и включенное в контур самонастройки, осуществляет

автоматическое изменение задающего воздействия  $x_0$  в функции ошибки. Это позволяет при соответствующем выборе коэффициентов  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_4$ , обеспечивающих сходимость процессов в системе во всем ограниченном диапазоне изменения параметров объекта и среды, устранять статические ошибки в системах стабилизации при действии как задающих, так и возмущающих параметрических и сигнальных воздействий (изменяющихся в определенном диапазоне) без интегрирующих звеньев в прямой цепи управления.

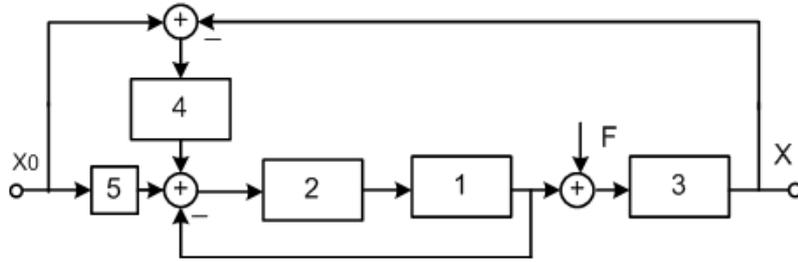


Рис. 2. Структура самонастраивающейся системы управления объектом (3):

1 – линейная часть объекта управления (2) без запаздывания ( $W_1(p) = \frac{k_o}{Tp+1}$ ); 2 – управляющее устройство  $W(p)=k_1$ ; 3 – звено запаздывания ( $k_3e^{-p\tau}$ ); 4 – исполнительный элемент  $W_2(p) = \frac{k_4}{p}$ ; 5 – масштабирующий множитель  $k_2 \leq 1$ ; X – регулируемая координата;  $X_0$  – задающее воздействие; F – возмущение

Передаточные функции структур рис. 1 и 2 при  $W_{1m}(p) = W_1(p)$  совпадают и имеют вид при  $F=0$

$$W_{zc}(p) = \frac{(k_2 + \frac{k_4}{p})k_1W_o(p)}{1 + k_1W_1(p)(1 + \frac{k_4e^{-p\epsilon}}{p})}. \quad (8)$$

Можно в операторной форме записать дифференциальное уравнение замкнутой системы и показать, используя теорему о предельном переходе, что  $x(t) = x_0$  в установившемся режиме при  $x_0 = Const$  и  $f = Const$ :

$$x(t)|_{t \rightarrow \infty} = \left[ \frac{(k_2 + \frac{k_4}{p})k_1W_o(p)x_0}{1 + k_1W_1(p)(1 + \frac{k_4e^{-p\epsilon}}{p})} \right]_{p \rightarrow 0} - \left[ \frac{W_o(p)f}{1 + k_1W_1(p)(1 + \frac{k_4e^{-p\epsilon}}{p})} \right]_{p \rightarrow 0} = x_0.$$

При изменении параметров в качестве меры робастности используют дифференциальную чувствительность системы, под которой понимается отношение изменения ее передаточной функции к изменениям передаточной функции (или параметров) объекта управления при условии их малости [3]. Чувствительность замкнутой системы (4) к изменению передаточной функции  $W_o(p)$  будет равна

$$S_{W_o}^{W_{zc}} = \frac{\partial W_{zc}}{\partial W_o} \cdot \frac{W_o}{W_{zc}} = \frac{1 + k_1W_1(p)}{1 + k_1W_1(p)(1 + \frac{k_4e^{-p\epsilon}}{p})} \approx \frac{1}{1 + \frac{k_4e^{-p\tau}}{p}}.$$

Отсюда видно, что чувствительность замкнутой системы будет изменяться при изменении параметров объекта и зависит главным образом от величины запаздывания и коэффициента исполнительного устройства.

На рис. 3 приведены некоторые результаты исследований методом компьютерного моделирования системы рис. 2. Здесь представлены переходные процес-

сы в замкнутой системе (4) с объектом (3) при оптимальных настройках регуляторов в основном контуре и контуре самонастройки (рис. 3а) ( $k_o=1,6$ ,  $T=0,5$  сек,  $\tau=2$  сек,  $k_1=1,5$ ,  $k_2=0,1$ ,  $k_4=0,15$ ) и в той же системе и тех же настройках управления, но с увеличенными параметрами  $k_o$  и  $\tau$  объекта (3) в два раза (рис. 3б).

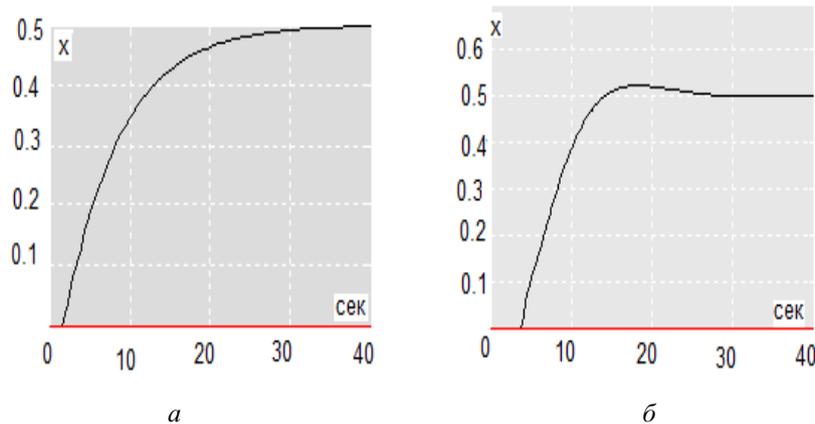


Рис. 3. Переходные процессы в системе (4) с запаздыванием

Из сравнения рисунков видно, что система не теряет устойчивости, в системе отсутствует статическая ошибка и перерегулирование не превышает 5 %. Как показывают исследования, при дальнейшем увеличении параметров объекта качество управления ухудшается и для обеспечения устойчивости приходится уменьшать коэффициент усиления в основном контуре.

### Выводы

1. Предложены и исследованы робастные самонастраивающиеся системы автоматического управления динамическими объектами с запаздыванием и пассивной (сигнальной) адаптацией, гарантирующие определенную совокупность инженерных требований к их качественным свойствам в переходном и установившемся режимах работы в ограниченном диапазоне изменения параметров объекта и среды.

2. Аналитическими исследованиями и исследованиями методом компьютерного моделирования показано, что системы обладают низкой чувствительностью к вариациям параметров объекта и возмущающим сигнальным воздействиям.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смит О. Дж. Автоматическое регулирование. – М.: Физматгиз, 1962. – 255 с.
2. Плутес В.С. К вопросу построения оптимальных САР объектов с чистым запаздыванием / Доклады научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1968-1969 гг. Секция автоматики, вычислительной и измерительной техники. Подсекция автоматического управления. – М.: МЭИ, 1970. – С. 62-73.
3. Миркин Е.Л., Шарипалиев Ж.Ш. Синтез адаптивных систем управления с вспомогательной моделью с запаздыванием в управлении // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 11. – С. 159-171.
4. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / Пер. с англ. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
5. Еремин Е.Л., Еремин И.Е. Адаптивная система для объекта с запаздыванием по управлению в схеме с динамическим корректором и эталонным упредителем // Информатика и системы

- управления. – 2013. – № 4 (38). – С. 111-120.
6. А.с. № 1177801 СССР. Устройство для регулирования диаметра изоляции кабеля / В.Е. Вохрышев. – Опубл. 1985. – Бюл. № 33.
  7. *Бесекерский В.А., Понов Е.П.* Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
  8. Пат. № 250584. Российская Федерация. Самонастраивающееся устройство для устранения статической ошибки в автоматических системах стабилизации динамических объектов / В.Е. Вохрышев. – Опубл. 2014. Бюл. № 3.

*Статья поступила в редакцию 27 января 2014 г.*

## **ROBUST SYSTEMS OF AUTOMATIC DIRECTION BY DYNAMIC OBJECTS WITH TIME RELAY AND PASSIVE ADAPTATION**

***V.E. Vokryshev***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*Static and dynamic characteristics of the objects with delays in time are analyzed in the paper. Self-directing robust systems and algorithms of their direction with passive (signal) adaptation are provided. The static and dynamic characteristics of robust self-adapting systems with long time delay are studied. The system of algorithms, providing for the elimination of static mistakes involving constant beginning and revolting influences without use of integrated components in a basic contour of the system is suggested. It's shown with the help of analytical procedures and by the method of computer modeling that the systems have a property of low sensibility to variations of the object's parameters and revolting signal influences. At that the system remains stable and guarantees the necessary complex of system's quality demands.*

***Keywords:*** *Robust system with time relay, self-orienting algorithm.*