

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ ЛИНЕЙНЫХ И АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ С ПОЛНОЙ ИНВАРИАНТНОСТЬЮ СТАТИЧЕСКИХ ОШИБОК ПРИ ПОСТОЯННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В.Е. Вохрышев

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

E-mail: vohr3@yandex.ru

Исследованы динамические свойства самонастраивающихся линейных и нелинейных систем стабилизации с компенсацией статических ошибок от постоянных воздействий.

Ключевые слова: самонастраивающийся алгоритм, релейная система управления, статическая ошибка.

Качество любой системы автоматического управления динамическими объектами оценивается определенной совокупностью инженерных требований к ее свойствам – величиной ошибки в переходном процессе и в установившемся режиме работы (при $t \rightarrow \infty$), запасом устойчивости и эффективностью, которая определяется соотношением полезности результатов применения системы по назначению с затратами и потерями, обусловленными ее созданием и эксплуатацией.

Ошибка определяется величиной, равной разности между требуемым $x_0(t)$ и действительными значениями регулируемой величины: $e(t) = x_0(t) - x(t)$. Знание ее мгновенного значения в течение всего времени работы объекта позволяет наиболее полно судить о свойствах системы его управления. Конкретные величины ошибок при типовых воздействиях в установившемся и переходном режимах определяются динамическими свойствами системы и могут быть определены аналитически [1] или методом цифрового моделирования по ее математическому описанию.

В работе [2] для получения полной инвариантности статических ошибок при постоянных задающих и возмущающих воздействиях рассмотрены самонастраивающиеся алгоритмы их устранения в линейных и нелинейных автоколебательных системах путем использования интегрирующих звеньев не в прямой цепи управления, а в контуре самонастройки. Инвариантность достигается автоматическим масштабированием задающего воздействия.

Представляется целесообразным исследовать динамические свойства подобных систем в условиях действующих на объект как сигнальных, так и параметрических возмущений.

Линейные системы

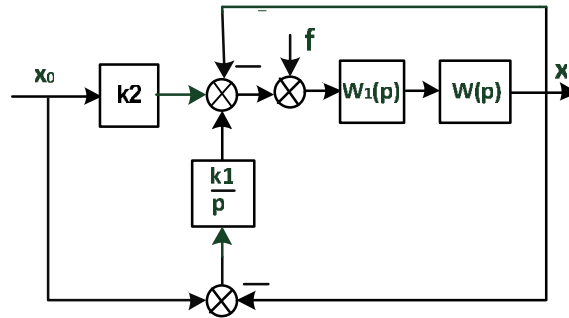
Решение задачи обеспечения полной инвариантности статической ошибки при задающих и возмущающих воздействиях в статическом режиме предложено в работе [2]. Оно осуществляется введением в замкнутую систему дополнительной (параллельно единичной) обратной связи:

Валерий Евгеньевич Вохрышев (д.т.н., доцент), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

$$U_{oc} = k_1 \cdot \int_0^t (x_0 - x(t)) dt, \quad (1)$$

где $x(t)$ – текущее значение регулируемой координаты, k_1 – постоянный коэффициент.

Дополнительная обратная связь вместе с входящим в систему исполнительным устройством в виде интегрирующего звена выполняет функцию контура самонастройки. На рис. 1 представлена структурная схема самонастраивающейся системы (СНС).



Р и с. 1. Структурная схема самонастраивающейся системы:
 $W(s)$ – передаточная функция объекта; $W_1(p)=k$ – пропорциональный регулятор;
 k_1 и k_2 – постоянные коэффициенты, $k_2 \leq 1$

Динамические свойства данной структуры определяются передаточными функциями, которые в замкнутом и разомкнутом состояниях имеют вид (2) и (3) (без потери общности коэффициент $k_2=1$):

$$W_{zc}(p) = \frac{(1 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p)}{1 + (1 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p)} = \frac{x(p)}{x_0(p)}; \quad (2)$$

$$W_{pc}(p) = \frac{(1 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p)}{1 + \frac{k_1}{p} \cdot W_1(p) \cdot W(p)} = \frac{x(p)}{x_0(p)}. \quad (3)$$

Положив $p = \frac{d}{dt}$, легко показать, используя теорему о предельном переходе, что

$x_0 = x(t)$ как в замкнутой, так и в разомкнутой системе при $x_0 = Const$.

Передаточная функция разомкнутой системы без контура самонастройки имеет вид

$$W(p) = W_1(p) \cdot W(p). \quad (4)$$

В линейной системе предельное значение коэффициента усиления, при котором система еще сохраняет устойчивость, определяется в соответствии с критерием Найквиста [1] из соотношения (5) путем составления уравнений для мнимых и действительных его частей:

$$A(j\omega) = -k_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где $A(j\omega)$ – характеристический полином частотной передаточной функции (2); $k_{\text{пр}}$ – предельное значение коэффициента усиления, равное $k_{\text{пр}} = k \cdot k_o$; k_o – коэффициент усиления объекта.

Предельное значение коэффициента усиления характеризует запас устойчивости системы к действию параметрических возмущений на объект.

Пример. Пусть передаточная функция разомкнутой системы без контура самонастройки имеет вид

$$W_{\text{pc}}(p) = \frac{k \cdot k_o}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}. \quad (6)$$

Тогда предельное значение коэффициента усиления системы как произведение коэффициентов усиления регулятора и объекта получим из решения соотношения (5) с учетом постоянных времени уравнения (6) для системы без самонастройки [1]:

$$k_{\text{пр}} = (T_1 + T_2 + T_3) \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) - 1,$$

а для сравнения – в самонастраивающейся системе

$$k_{\text{пр1}} = \left[\frac{T_1 + T_2 + T_3}{T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3} - \frac{T_1 T_2 T_3}{(T_1 T_2 + T_1 T_3 + T_2 T_3)^2} \right] \cdot \frac{1}{k_1}.$$

Для определенности положим $T_1 = 2 \text{ сек}$, $T_2 = 0.5 \text{ сек}$, $T_3 = 0.1 \text{ сек}$. Тогда $k_{\text{пр}} = 31.5$, а $k_{\text{пр1}} = 2.02 \cdot \frac{1}{k_1}$.

Коэффициент k_1 , обеспечивающий сходимость процессов самонастройки в замкнутой системе, всегда намного меньше единицы. Поэтому для того чтобы переходные процессы в самонастраивающейся системе при типовых задающих воздействиях были не хуже, чем в системе без самонастройки, необходимо, чтобы коэффициент k_1 для данного примера был не больше, чем $\frac{k_{\text{пр1}}}{k_{\text{пр}}} = \frac{2.02}{31.5} = 0.064$.

Таким образом, самонастраивающийся алгоритм помимо устранения статической ошибки в системе обеспечивает при прочих равных условиях запас устойчивости системы не меньше, чем в системе без самонастройки.

Эффект устранения статической ошибки может обеспечиваться и путем включения в прямой контур системы (4) интегрирующих звеньев, например ПИ-регулятора. Однако достичь полной инвариантности статических ошибок при возмущающих воздействиях и в этом случае оказывается невозможным [1], если возмущения действуют до места включения интегрирующего звена в системе. При этом динамические свойства СНС оказываются не хуже динамических свойств системы, содержащей в основном контуре ПИ-регулятор. Действительно, передаточная функция замкнутой системы с ПИ-регулятором имеет вид

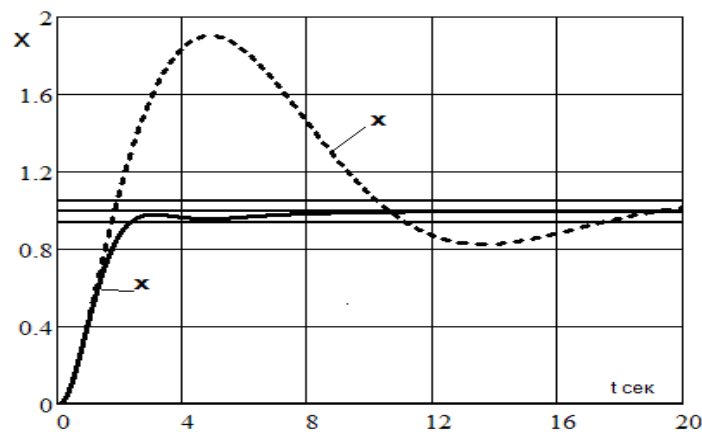
$$W_{\text{зс}}(p) = \frac{(k_3 + \frac{k_4}{p}) \cdot W(p)}{1 + (k_3 + \frac{k_4}{p}) \cdot W(p)}. \quad (7)$$

Если приравнять уравнения (2) и (7), то при $k_3 = k$ и $k_4 = k_1 k$ они совпадают.

Самонастраивающаяся система проще в эксплуатации по сравнению с системой, содержащей ПИ-регулятор, поскольку коэффициенты k_1 и k в СНС расположены в разных, невзаимосвязанных контурах и могут настраиваться отдельно с обеспечением равноценных качественных показателей переходных процессов.

Следовательно, управление, представленное в системе на рис. 1, оказывается предпочтительнее во всех смыслах – отсутствия статических ошибок, запаса устойчивости, затрат на реализацию и обслуживание. Следует также обратить внимание и на то, что структура СНС будет решать задачу стабилизации регулируемой координаты с устранением статической ошибки в условиях обрыва отрицательной обратной связи в основном контуре, то есть она обладает большей «живучестью».

На рис. 2 показаны переходные процессы в самонастраивающейся системе с включенной (сплошная линия) и отключенной (пунктирная линия) обратной связью.



Р и с. 2. Переходные процессы в самонастраивающейся системе

Нелинейные автоколебательные системы

Качество работы релейных автоколебательных систем обычно оценивается величиной амплитуды автоколебаний в установившемся режиме работы, а в переходном – временем затухания колебательных процессов, перерегулированием и числом колебаний, превышающих амплитуду автоколебаний в установившемся режиме работы.

Ранее (в работе [2]) автором предложен и исследован алгоритм устранения статической ошибки в релейных автоколебательных системах, понимаемой как разность между заданным значением регулируемой координаты (уставки) и средним значением автоколебаний в установившемся режиме работы в условиях асимметрии управления и действия внешних возмущений. Среднее значение автоколебаний x_{cp} в предлагаемом алгоритме определяется как полуразность экстремальных значений регулируемой координаты (на каждом полупериоде автоколебаний). Задача решается с помощью самонастраивающегося алгоритма структуры (см. рис. 1), обеспечивающего автоматическое смещение уставки по результатам сравнения x_{cp} с задающим воздействием.

В настоящей статье рассматривается динамика системы управления линейным

объектом (4), в которой пропорциональный регулятор $W_1(p)$ заменен релейным регулятором, закон управления которого имеет вид

$$U = \begin{cases} B, & \text{при } M(x) > 0, \\ 0, & \text{при } M(x) \leq 0. \end{cases}, \quad (8)$$

где $M(x)$ – функция переключения:

$$M(x) = x_0 + a(t) - x;$$

$$a(t) = k_1 \cdot \int_0^t (x_0 - x_{cp}) dt,$$

x_{cp} – среднее значение амплитуды автоколебаний

$$x_{cp} = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2},$$

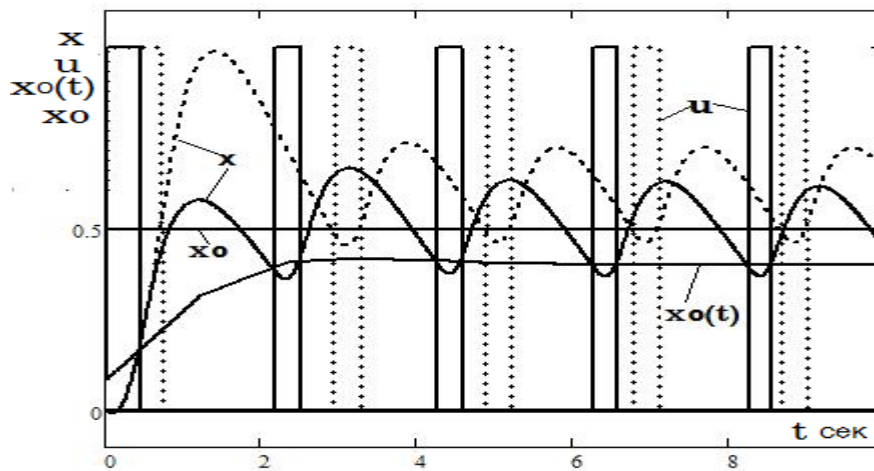
где $x_{\max}$ и $x_{\min}$ – экстремальные значения регулируемой координаты;

B – величина управляющего воздействия.

Гармоническая линеаризация нелинейности (8) при симметричных автоколебаниях приводит к выражению

$$W(A) = \frac{2 \cdot B}{\pi \cdot A},$$

где A – амплитуда автоколебаний.



Р и с. 3. Процессы в замкнутых релейных системах

(объект (6): сплошные линии – самонастраивающаяся система, пунктирные – релейная система с управлением (8), но с функцией переключения $M(x) = x_0 - x$; $k_2 = 0.1$)

Значения амплитуды и частоты автоколебаний для заданного объекта определяются из уравнения гармонического баланса

$$W(j\omega) = -1/W(A)$$

путем составления уравнений для мнимых и действительных его частей.

Понятно, что амплитуда автоколебаний в самонастраивающейся системе при прочих равных условиях в установившемся режиме работы будет не больше, чем в

системе без самонастройки. Однако качественные показатели и их особенности в переходном режиме в подобных системах проще выявить методом цифрового моделирования с использованием модели одного и того же объекта (см. рис. 3).

Из рис. 3 видно, что переключения управления в самонастраивающейся системе происходят в переходном процессе с опережением по отношению к уставке, поэтому в системе нет перерегулирования, отсутствует статическая ошибка, а время затухания переходных процессов не превышает длительности переходного процесса в релейной системе без самонастройки.

Выводы

1. Исследованы динамические свойства самонастраивающихся линейных и автоколебательных нелинейных систем, алгоритмы управления которых обеспечивают полную инвариантность статических ошибок при постоянных задающих и возмущающих воздействиях без использования интегрирующих элементов в основном контуре.

2. Линейная система с исследованным алгоритмом проще в настройке, обладает большей «живучестью», и ее управление не превосходит по сложности реализации стандартный ПИ-регулятор.

3. Показано, что качественные характеристики переходных процессов в самонастраивающихся системах с исследованными алгоритмами в условиях параметрических и сигнальных возмущений оказываются не хуже, чем в системах, использующих стандартные управляющие устройства, а по некоторым показателям существенно их превосходят.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
2. Вохрышев В.Е. Самонастраивающиеся алгоритмы устранения статических ошибок в автоматических линейных и нелинейных автоколебательных системах стабилизации динамических объектов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 4 (36). – С. 19-24.

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2013 г.

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF STABILIZING SELF-ADAPTING LINEAR AND AUTO-OSCILLATION NON-LINEAR SYSTEMS WITH AUTOMATIC COMPENSATION OF STATIC MISTAKES

V.E. Vokryshev

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

Self-adapting direction algorithms, providing for the elimination of static mistakes in linear systems and symmetry of automatic oscillations in accord with demanded points in non-linear auto-oscillation systems having unsymmetrical directing limits and with constant additional revolts are worked out. Dynamic characteristics of the processes are also researched.

Keywords: Self-adapting algorithm, relay direction system, static mistake.

Valeriy E. Vokryshev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.