

УДК 621.6-52

РОБАСТНЫЕ САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ С СИГНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИЕЙ

© 2014 А.С. Бакланов, В.Е. Вохрышев

Самарский государственный технический университет

Поступила в редакцию 07.11.2014

Исследованы статические и динамические свойства самонастраивающихся с сигнальной (пассивной) адаптацией робастных структур линейных и нелинейных автоколебательных систем стабилизации с полной инвариантностью статических ошибок при постоянных воздействиях без использования интегрирующих элементов в основном контуре системы. Показано, что системы обладают низкой чувствительностью к вариациям параметров объекта и управления, обладают большей “живучестью”. Проведены методом компьютерного моделирования сравнительные исследования качественных характеристик переходных процессов в самонастраивающихся системах с предложенными алгоритмами в условиях параметрических и сигнальных возмущений.

Ключевые слова: робастная система, самонастраивающийся алгоритм, сигнальная адаптация, чувствительность динамических систем, релейная система управления, статическая ошибка.

Качество любой системы автоматического управления оценивается величиной ошибки в переходном процессе и в установившемся режиме работы (при $t \rightarrow \infty$), запасом устойчивости, чувствительностью к вариациям параметров объекта и внешним воздействиям и эффективностью, которая 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, которые обладают допустимыми изменениями качества при изменении динамики системы и параметров среды в ограниченном диапазоне [1].

В настоящей статье предлагаются способы построения робастных систем в классе самонастраивающихся с сигнальной (пассивной) адаптацией, в которых эффект самонастройки достигается с помощью компенсирующих сигналов, без изменения параметров управляющего устройства.

Линейные системы. Точность системы определяется величиной, равной разности между требуемым $x_0(t)$ и действительными значениями регулируемой величины $x(t)$: $e(t) = x_0(t) - x(t)$. 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

ми системы и могут быть определены аналитически или методом компьютерного моделирования по ее математическому описанию [2]. Однако возможность их уменьшения с использованием известных методов оказывается ограниченной (условиями устойчивости и местом приложения возмущающих воздействий в астатических системах). Ниже предлагается и исследуется новый закон управления [3], обеспечивающий улучшение динамических свойств систем стабилизации и полную инвариантность статической ошибки при задающих и возмущающих воздействиях в статическом режиме без интегрирующих элементов в основном контуре системы.

Решение осуществляется введением в замкнутую систему дополнительной (параллельно единичной) положительной обратной связи:

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

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

На рис.1 представлена структурная схема самонастраивающейся системы (СНС).

Дополнительная обратная связь вместе с входящим в него исполнительным устройством в виде интегрирующего звена выполняет функцию контура сигнальной (пассивной) адаптации. Закон управления объектом определяется соотношением

$$u(t) = \left[k_2 x_0 - x(t) + k_1 \cdot \int_0^t (x_0 - x(t)) dt \right] k.$$

Коэффициент $k_2 \leq 1$ в прямой цепи системы позволяет при больших отклонениях регули-

Бакланов Александр Сергеевич, аспирант.

E-mail: sasha89bas@yandex.ru

Вохрышев Валерий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: vohr3@yandex.ru

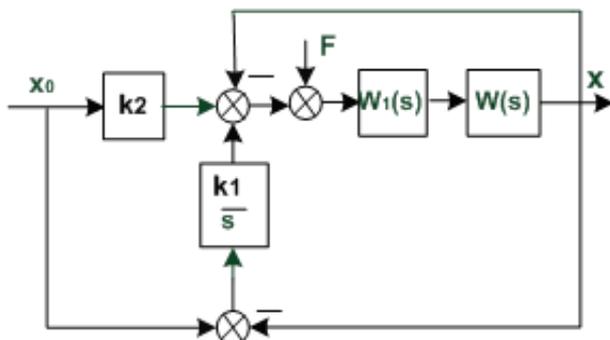


Рис. 1. Структурная схема самонастраивающейся системы:

$W(s)$ – передаточная функция объекта, $W_1(p) = k$ – пропорциональный регулятор, k_1 и k_2 – постоянные коэффициенты, $k_2 \leq 1$.

x – регулируемая координата; x_0 – уставка

руемой координаты (например, при пуске, когда $x_0 \gg x$) обеспечить плавный перевод объекта в заданное состояние без перерегулирования. Интегрирующее звено, включенное в контур самонастройки, выполняет автоматическое масштабирование задающего воздействия (уставки) x_0 в функции ошибки и позволяет при соответствующем выборе коэффициентов k, k_1 и k_2 , обеспечивающих сходимость процессов в системе во всем ограниченном диапазоне изменения параметров объекта и среды, устранять статические ошибки при действии как задающих, так и возмущающих параметрических и сигнальных воздействий без интегрирующих звеньев в прямой цепи управления. Динамические свойства данной структуры при $F(s) = 0$ определяются передаточными функциями в замкнутом и разомкнутом в основном контуре состояниях, которые имеют вид (4) и (5):

$$W_{zc}(s) = \frac{(k_2 + \frac{k_1}{s}) \cdot W_1(s) \cdot W(s)}{1 + (1 + \frac{k_1}{s}) \cdot W_1(s) \cdot W(s)}; \quad (4)$$

$$W_{pc}(s) = \frac{(k_2 + \frac{k_1}{s}) \cdot W_1(s) \cdot W(s)}{1 + \frac{k_1}{s} \cdot W_1(s) \cdot W(s)}. \quad (5)$$

Записав эти соотношения в операторной форме в виде дифференциальных уравнений, можно показать, используя теорему о предельном переходе, что $x_0 = x(t)$ как в замкнутой, так и в разомкнутой (в основном контуре) системах при $x_0 = Const$ и $f = Const$.

$$x(t)_{t \rightarrow \infty} = \left[\frac{(k_2 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p) \cdot x_0}{1 + (1 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p)} \right]_{p \rightarrow 0} - \left[\frac{W_1(p) \cdot W(p) \cdot f}{1 + (1 + \frac{k_1}{p}) \cdot W_1(p) \cdot W(p)} \right]_{p \rightarrow 0} = x_0; \quad (6)$$

$$x(t)_{t \rightarrow \infty} = \left[\frac{(\frac{k_1}{p} + k_2) \cdot W_1(p) \cdot W(p) \cdot x_0}{1 + \frac{k_1}{p} \cdot W_1(p) \cdot W(p)} \right]_{p \rightarrow 0} - \left[\frac{W_1(p) \cdot W(p) \cdot f}{1 + \frac{k_1}{p} \cdot W_1(p) \cdot W(p)} \right]_{p \rightarrow 0} = x_0; \quad (7)$$

Передаточная функция разомкнутой системы без контура самонастройки имеет вид:

$$W_{pc}(s) = W_1(s) \cdot W(s). \quad (8)$$

В линейной системе предельное значение коэффициента усиления, при котором система еще сохраняет устойчивость, определяется в соответствии с критерием Найквиста [1,2] из соотношения (9) путем составления уравнений для мнимых и действительных его частей

$$A(j\omega) = -k_{np}, \quad (9)$$

где $A(j\omega)$ – характеристический полином частотной передаточной функции (8), k_{np} – предельное значение коэффициента усиления, равное $k_{np} = k \cdot k_o$, k_o – коэффициент усиления объекта. Предельное значение коэффициента усиления характеризует запас устойчивости системы к действию параметрических возмущений на объект.

Если передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$W_{pc}(s) = \frac{k \cdot k_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}, \quad (10)$$

то предельное значение коэффициента усиления системы, как произведение коэффициентов усиления регулятора и объекта, получим из решения соотношения (9)

$$k_{np} = (T_1 + T_2 + T_3) \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \right) - 1.$$

Для определенности положим $T_1 = 1 \text{ сек}$, $T_2 = 0.5 \text{ сек}$, $T_3 = 0.1 \text{ сек}$. Тогда $k_{np} = 19.8$.

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

$$W_{zc}(s) = \frac{(k_3 + \frac{k_4}{s}) \cdot W(s)}{1 + (k_3 + \frac{k_4}{s}) \cdot W(s)}. \quad (11)$$

Если приравнять уравнения (4) и (11), то при $k_2 = 1$

$$k_3 = k \text{ и, } k_4 = k_1 k \quad (12)$$

они совпадают.

При изменении параметров системы в качестве меры робастности используют дифференциальную чувствительность системы, под которой

понимается отношение изменения ее передаточной функции к изменениям передаточной функции (или параметров управления) при условии их малости. Чувствительность замкнутой системы (4) к изменению коэффициента усиления регулятора в основном контуре определяется соотношением [2]:

$$S_{W_1}^{W_{3c}} = \frac{\partial W_{3c}}{\partial W_1} \cdot \frac{W_1}{W_{3c}} = \frac{1}{1 + (1 + \frac{k_1}{s})W_1W} \quad (13)$$

Чувствительность же системы (11) к изменению коэффициента усиления регулятора k_3 будет иной (в k_3 раз больше чувствительности системы (4)):

$$S_{k_3}^{W_{3c}} = \frac{\partial W_{3c} k_3}{\partial k_3 W_{3c}} = \frac{k_3}{1 + (k_3 + \frac{k_4}{s})W} \quad (14)$$

Чувствительность системы (11) к изменению передаточной функции объекта $W(s)$ будет равна

$$S_W^{W_{3c}} = \frac{\partial W_{3c}}{\partial W} \cdot \frac{W_1}{W_{3c}} = \frac{1}{1 + (k_3 + \frac{k_4}{s})W} \quad (15)$$

Понятно, что чувствительности систем (4) и (11) к изменению передаточной функции $W(s)$ при выполнении условия (12) будут совпадать.

Из соотношений (13) - (15) следует, что чувствительность систем (4) и (11) будет изменяться при изменении параметров объекта. Однако за счет изменения коэффициентов усиления k_1 и k_2 она может быть ограничена условиями устойчивости. При этом чувствительность системы (4) будет не больше чувствительности системы (11) к изменению параметров объекта.

Самонастраивающаяся система (4) проще в эксплуатации, поскольку коэффициенты k_1 и k_2 расположены в разных, невзаимосвязанных контурах и могут настраиваться отдельно с обеспечением желаемых показателей переходных процессов. Следует также отметить, что структура СНС будет решать задачу стабилизации регулируемой координаты с устранением статической ошибки, как это следует из соотношения (7), в условиях обрыва отрицательной обратной связи в основном контуре, то есть она обладает большей "живучестью" по сравнению со стандартными схемами (с ПИ-регулятором в основном контуре). Можно также показать, что система рис. 1 сохраняет структурную устойчивость, если основной контур системы является астатическим.

Следовательно, управление, представленное в системе на рис. 1 оказывается предпочтительней во всех отношениях – отсутствия статических ошибок, запаса устойчивости, чувствитель-

ности к изменениям параметров управления и затрат на обслуживание.

Нелинейные автоколебательные системы.

Большой класс нелинейных автоколебательных систем образуют релейные системы управления, обладающие простотой конструкции, алгоритмической и программной реализацией, высоким быстродействием, надежностью и высокой степенью инвариантности к вариациям параметров объекта [4]. Простейший релейный закон управления при симметричном управляющем воздействии имеет следующий вид:

$$U = B \cdot \text{sign}(M(x)), \quad (16)$$

где $M(x)$ – функция переключения, $M(x) = x_0 - x(t)$, sign – знаковая функция, $\text{sign}(M(x)) = 1$, если аргумент функции больше нуля, и $\text{sign}(M(x)) = -1$, если аргумент функции меньше или равен нулю, B – величина управляющего воздействия.

При асимметричном управлении уравнение (16) принимает вид:

$$U = \begin{cases} B, & \text{при } M(x) > 0, \\ 0, & \text{при } M(x) \leq 0. \end{cases} \quad (17)$$

Внешние возмущающие воздействия и асимметричность управления вызывают смещение среднего значения автоколебаний относительно заданного, которое понимается здесь как статическая ошибка. Качество работы релейных автоколебательных систем обычно оценивается по величине амплитуды автоколебаний в установившемся режиме работы, а в переходном – временем затухания колебательных процессов, перерегулированием и числом колебаний, превышающих амплитуду автоколебаний в установившемся режиме работы.

Рассмотрим статику и динамику системы управления рис.1, в которой пропорциональный регулятор $W_1(p)$ заменен релейным регулятором с законом управления вида (18),

$$U = \begin{cases} B(t) & \text{при } M_1(x) > 0, \\ 0, & \text{при } M_1(x) \leq 0. \end{cases} \quad (18)$$

где функция переключения

$$M_1(x) = x_0(t) - x(t) = k_2 x_0 - x(t) + k_1 \cdot \int_0^t (x_0 - x_{cp}) dt,$$

x_{cp} – среднее значение амплитуды автоколе-

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

x_{\max} и x_{\min} – экстремальные значения регулируемой координаты, $B(t)$ – величина управляющего воздействия,

$$B(t) = B_0 + k_3 \int_0^t (Z - A) dt, B_0 \leq B(t) \leq B_1, \quad (19)$$

B_0, B_1 – постоянные ограниченные величины, Z – заданное значение амплитуды автоколебаний $A = |x_0 - x_3|$, x_3 – экстремальные значения регулируемой координаты.

Таким образом, управление (18) обеспечивает стабилизацию амплитуды автоколебаний и их симметричность относительно уставки в условиях неопределенности параметров объекта и среды путем изменения соответственно сигнала $B(t)$ и масштабирования уставки.

Гармоническая линеаризация нелинейности (18) при симметричных автоколебаниях и $B(t) = B_0$ приводит к выражению:

$$W(A) = \frac{2 \cdot B_0}{\pi \cdot A}.$$

Значения амплитуды и частоты автоколебаний для заданного объекта определяются из уравнения гармонического баланса [1]:

$$W(j\omega) = -\frac{1}{W(A)}$$

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. Качественные же показатели и их особенности в переходном режиме в подобных системах проще выявить методом компьютерного моделирования с использованием модели одного и того же объекта (рис. 2).

Из рис. 2, где представлены процессы в релейной (с управлением (17)) и самонастраивающихся системах (с управлением (18))

при $B(t) = B_0$ и $B(t)$ в виде соотношения (19) и увеличенным на 30% коэффициентом усиления системы) с объектом (10), видно, что переключения управления в самонастраивающихся системах происходят в переходном процессе с опережением по отношению к уставке x_0 . В них существенно меньше перерегулирование, отсутствует статическая ошибка, за счет масштабирования уставки, а время затухания переходных процессов практически не превышает длительности переходного процесса в релейной системе без самонастройки.

ВЫВОДЫ

1. Исследованы статические и динамические свойства робастных самонастраивающихся линейных и релейных автоколебательных систем управления динамических объектов, алгоритмы которых обеспечивают полную инвариантность статических ошибок при постоянных задающих и возмущающих воздействиях без использования интегрирующих элементов в основном контуре.
2. Показано, что запас устойчивости в самонастраивающихся линейных системах не меньше, чем в системах, содержащих интегрирующие элементы в основном контуре.
3. Линейная система с исследованным алгоритмом проще в настройке, ее управление не превосходит по сложности реализации стандартный ПИ-регулятор, и она не теряет работоспособности при обрыве обратной связи в основном контуре.
4. Исследована чувствительность линейных систем к изменению параметров объекта и управления. Установлено, что чувствительность самонастраивающихся систем к изменению в ограни-

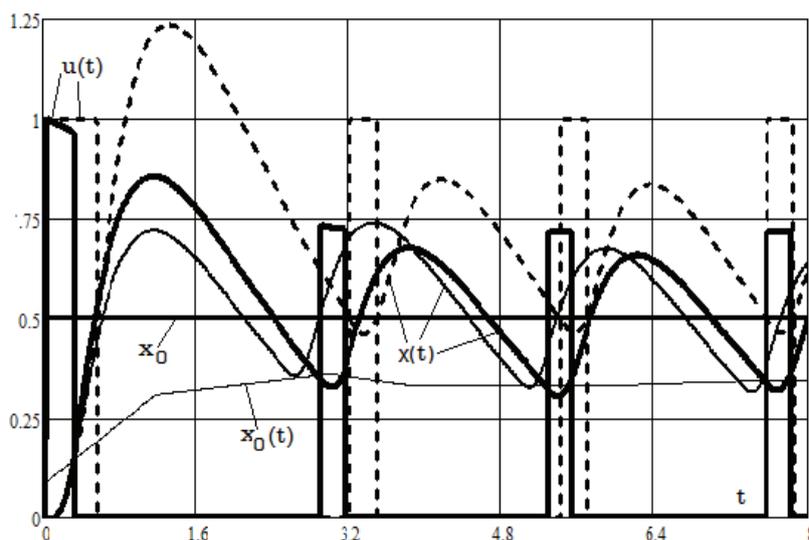


Рис. 2. Процессы в замкнутых релейных системах (объект (10): сплошные тонкие и утолщенные линии соответственно – самонастраивающиеся системы, в которых $B(t) = B_0$ и в виде соотношения (19) при увеличении k_0 на 30%, пунктирные – релейная система с управлением (17), $k_2 = 0.1$)

ченном диапазоне параметров объекта при прочих равных условиях не больше, чем в системах содержащих ПИ-регулятор и существенно меньше – к изменению коэффициента усиления управления в основном контуре.

5. 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 (в автоколебательных системах) существенно их превосходят.

6. Исследованный самонастраивающийся алгоритм управления релейными системами обеспечивает стабилизацию амплитуды автоколебаний и их симметричность относительно уставки в условиях неопределенности параметров объекта

и среды путем изменения соответственно сигнала управления и масштабирования уставки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорф Р., Бишон Р. Современные системы управления [пер. с англ.]. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 768 с.
3. Вохрышев В.Е. Самонастраивающееся устройство для устранения статической ошибки в автоматических системах стабилизации динамических объектов. Пат. Российская Федерация. № 2505847. Опубл. Бюл. 2014, №3.
4. 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.

ROBUST SELF-ADAPTING LINEAR AND NON-LINEAR AUTOMATIC SYSTEMS OF DIRECTION BY DYNAMIC OBJECTS WITH SIGNAL ADAPTATION

© 2014 A.S. Baklanov, V.E. Vohryshev

Samara State Technical University

The article researches static and dynamic characteristics of the self-adapting robust linear and non-linear automatic oscillation systems with passive adaptation and stabilization on the basis of full invariant of static mistakes under constant influences without using integrated elements in a main contour of the system. It's shown that systems possess low sensitivity to variations of objects and direction and have big robustness. The quality properties of transitive processes in self-adapting systems with given algorithms in the conditions of parametrical and signal revolts are comparatively investigated by method of computer modeling.

Key words: Robust system, self-adapting algorithm, signal adaptation, dynamic system sensitivity, relay direction system, static mistake

Alexander Baklanov, Graduate Student.

E-mail: sasha89bas@yandex.ru

Valery Vohryshev, Doctor of Technics, Professor.

E-mail: vohr3@yandex.ru