

С.П. Круглов¹¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация**СТАБИЛИЗИРУЮЩИЙ РЕГУЛЯТОР СО СТАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИЕЙ**

Аннотация. В статье предлагается решать задачу стабилизации выхода нелинейного и/или нестационарного объекта управления с неполной информацией о его характеристиках с помощью стабилизирующего регулятора со статической адаптацией. Входным сигналом такой системы является постоянное заданное значение выхода. Дополнительной задачей системы является компенсация внешних возмущений. Структура системы управления с таким регулятором в отличие от классической следящей системы использует на входе не сумматор, а блок умножения-деления. Для настройки такого регулятора достаточно лишь приблизительная информация о времени переходного процесса исходного объекта и знак его коэффициента усиления (знак постоянен). Сформулированы требования к системе управления. Система управления, использующая регулятор со статической адаптацией, выгодно отличается от классической следящей системы управления тем, что не требует перестройки закона управления в условиях нелинейности и/или нестационарности объекта. Единственным недостатком в сравнении с классической системой является увеличенный переходный процесс, что в ряде задач управления не является существенным. Приведены результаты модельного исследования предлагаемой системы управления с разными объектами.

Ключевые слова: адаптация, объект управления, стабилизирующий регулятор, система управления, внешнее возмущение, обратная связь.

S.P. Kruglov¹¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia**THE STABILIZING REGULATOR WITH STATIC ADAPTATION**

Abstract. In article it is offered to solve a problem of stabilization of an exit of a nonlinear and/or non-stationary control object with incomplete information on its characteristics by means of the stabilizing regulator with static adaptation. Entrance signal of such system is the constant preset value of an exit. The additional task of a system is compensation of external disturbances. The structure of a control system with such regulator unlike a classical servo-mechanism uses not the adder, but the multiplication-division block on an entrance. For setup of such regulator only approximate information on transient period of an initial object and the sign of its intensification coefficient are enough (the sign is constant). Requirements to a control system are formulated. The control system using the regulator with static adaptation favourably differs from a classical servo-mechanism of control of what doesn't demand reorganization of the control law in the conditions of nonlinearity and/or not stationarity of an object. The single shortcoming in comparison with a classical system is the increased transition process that in a number of tasks of management isn't essential. Results of a model research of the offered control system with different objects are given.

Keywords: adaptation, control object, stabilizing regulator, control system, external disturbance, feed-back.

Введение

В технических системах часто используются регуляторы, предназначенные для стабилизации выходной величины объекта управления на заданном значении при отсутствии жестких требований к скорости и качеству переходного процесса. Примером являются регуляторы длительных технологических процессов. Основная задача таких регуляторов – удержание выходной величины объекта управления на заданном постоянном значении и парирование внешних неконтролируемых возмущений.

Широко известны стабилизирующие регуляторы, построенные на основе следящей системы управления [1-3]. Структурная схема такой системы управления для скалярного объекта управления представлена на рис.1.

На рисунке обозначено: x – регулируемый выход объекта управления; $x_{зад}$ – заданное значение x ; u – управление, формируемое регулятором (вход объекта); Δx – внешнее возмущение, приведенное к выходу объекта.

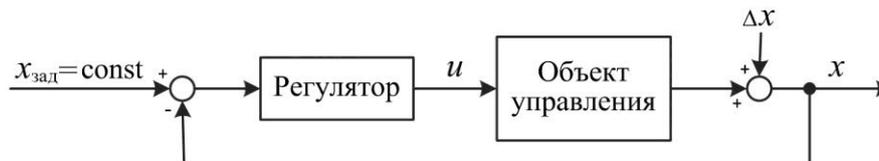


Рис.1. Классическая структура стабилизирующей системы управления

Характерной деталью этой замкнутой системы управления является сумматор, формирующий ошибку стабилизации, по которой формирует управление регулятор. В качестве регулятора обычно используются П-, ПИ-, ПИД-регуляторы и их модификации, параметры которых выбираются исходя их известной математической модели объекта, либо настраиваются на предварительных испытаниях системы управления [4]. Если математическая модель объекта имеет нелинейную часть, то в указанном регуляторе дополнительно реализуется принцип динамической компенсации, устраняющий эту нелинейность, на основе априорной информации о функциональной зависимости нелинейной части объекта [3]. В силу интегральной составляющей в ПИ- и ПИД-регуляторах внешнее возмущение (Δx) практически полностью компенсируется только когда, которое является постоянным или близким к таковому. В структуре указанной на рисунке системы могут находиться внутренние контуры, улучшающие работу системы управления.

Если объект управления является нестационарным, имеет нелинейную часть, то использование указанной системы на практике связано с такими проблемами, как организация перестройки параметров регулятора по режимам работы, опять же на основе априорной информации о параметрах объекта, возникновение неустойчивости в замкнутой системе управления, низкое качество стабилизации и пр. [3].

Одним из путей решения указанного, в том числе и при априорной неопределенности параметров объекта, является построение адаптивных систем управления, подстраивающихся под текущие характеристики объекта и внешнего возмущения. Однако использование полной адаптивной системы управления связано со значительным усложнением системы управления, в частности, с организацией оценивания неизвестных параметров объекта управления, или регулятора [5]. В данной работе будет предложен метод построения адаптивной системы управления для задачи стабилизации нелинейного, нестационарного объекта управления в упрощенной постановке построения адаптивного управления – со статической адаптацией. Регулятор, построенный по этому методу, по сложности соответствует системе управления, представленной на рис.1, но отличается от нее по структуре.

Изложение метода статической адаптации в задаче стабилизации выхода объекта управления

Рассмотрим устойчивый (обязательное условие) и, в общем случае, нелинейный нестационарный скалярный объект управления. Пусть его динамика описывается следующим дифференциальным уравнением (без учета начальных условий входа и выхода):

$$x(t) = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_0} u(t) + \Delta x = \tilde{x}(t) + \Delta x, \quad (1)$$

где обозначения сигналов соответствуют рис.1; $\tilde{x}(t)$ – первое слагаемое в правой части (1), т.е. выход объекта без внешнего воздействия; t – текущее время; параметры объекта (в общем случае неизвестные): $b_i \triangleq b_i(x,t)$, $a_j \triangleq a_j(x,t)$, $i = \overline{1,m}$, $j = \overline{1,n}$, $i \leq j$; внешнее возмущение Δx тоже считается неизвестным; $p \triangleq d/dt$ – оператор дифференцирования; считаем, что непосредственно измеряются сигналы u и x ; также считаем, что размах

3 сигналов управления и выхода объекта известен в виде положительных чисел u_{\max} и \tilde{x}_{\max} соответственно.

Еще одним обязательным требованием к исходному объекту управления примем условие

$$k(x,t) \triangleq \tilde{x}_{уст}/u_{const}; \quad \text{sign}[k(x,t)] = \text{const}, \quad (2)$$

где $k(x,t)$ – ненулевой коэффициент усиления объекта, знак которого известен (далее его будем обозначать как k); u_{const} – любое постоянное управление; $\tilde{x}_{уст}$ – установившееся после окончания переходного процесса значение выхода объекта, устойчивого по условию, соответствующее u_{const} ; время переходного процесса приблизительно известно.

Заметим, что принятые свойства рассматриваемого объекта управления удовлетворяют подавляющему большинству технических установок, систем, приборов.

Из первого равенства (2) следует, что коэффициент объекта управления можно определить на установившемся процессе в виде его оценки (вначале считаем внешнее возмущение отсутствующим, $\Delta x \equiv 0$):

$$\hat{k}_{уст} = x_{уст}/u_{const}, \quad (3)$$

где $\hat{k}_{уст}$ – оценка коэффициента усиления на установившемся процессе; $x_{уст}$ – установившееся значение выхода системы управления, соответствующее постоянному управлению u_{const} .

Отсюда требуемое управление ($u_{\text{треб}}$), доставляющее достижение цели управления без учета динамики переходного процесса является:

$$u_{\text{треб}} = x_{\text{зад}}/\hat{k}_{уст}. \quad (4)$$

Однако использование соотношений (3), (4) нецелесообразно для нелинейного нестационарного объекта, т.к. требует множественного выхода системы на установившийся процесс, получение оценки (3) на нем и соответствующего пересчета $u_{\text{треб}}$ с целью постепенного подхода на заданный установившийся процесс по задаче стабилизации.

Чтобы устранить эту проблему, потребуем, чтобы оценка (3) проводилась непрерывно, при этом управление u было близко u_{const} . Для рассматриваемого объекта управления это значит, что скорость управления должна быть намного ниже, чем время переходного процесса объекта. Отсюда вместо (3) и (4) примем соотношения

$$\hat{k} = x/u, \quad u = f_{\text{фнч}}(x_{\text{зад}}/\hat{k}), \quad (5)$$

где \hat{k} – оценка коэффициента усиления объекта управления на текущем управлении; $f_{\text{фнч}}$ – функция низкочастотной фильтрации с частотой среза намного меньше обратной величины времени переходного процесса рассматриваемого объекта.

В соответствии с полученным решением (5) построим систему управления, представленную на рис.2

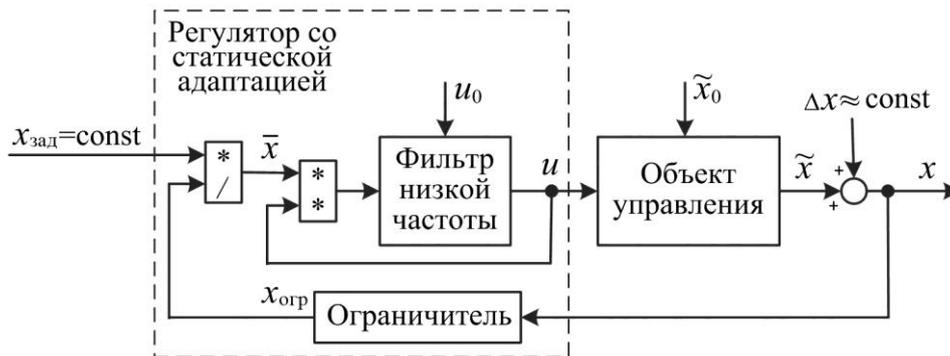


Рис.2. Структура предлагаемой стабилизирующей системы управления

На рис.2 приведены следующие обозначения: \tilde{x}_0 – начальное значение \tilde{x} (здесь и далее нижний индекс «0» означает начальный момент времени); фильтр низкой частоты представлен в виде подбираемого динамического звена с апериодической динамикой со временем переходного периода намного больше переходного процесса объекта управления, фильтр формирует управление объекта (u); $\bar{x} = x_{\text{зад}}/x_{\text{огр}}$; сигнал на входе в фильтр – есть $(\bar{x}u)$; ограничитель используется для ограничения сигнала x до $x_{\text{огр}}$ по зависимости $x_{\text{огр}} = f_{\text{огр}}(x)$, которая будет определена ниже.

Характерным отличием схемы по рис.2 от классической является использование блока «умножение-деление» вместо «сложение-вычитание». В связи с этим система управления по рис.2 является нелинейной, и поэтому аналитический анализ ее функционирования значительно осложнен. Далее рассмотрим свойства этой системы управления лишь на качественно-логическом уровне.

Рассмотрим отдельные частные свойства этой системы при разных начальных значениях \tilde{x}_0 и u_0 , при условии, что ограничения в системе нет ($x_{\text{огр}} \equiv x$) и нет внешнего возмущения ($\Delta x \equiv 0$):

- если $u_0 = 0$, то из рис.2 и свойств объекта следует, что дальнейшее поведение системы соответствует $u \equiv u_0 = 0$ и $\tilde{x} \rightarrow 0$, это состояние системы назовем «мертвой точкой», в которую нельзя выводить систему;
- если $\tilde{x}_0 = \tilde{x}_{\text{уст0}} = x_{\text{зад}}$, где $\tilde{x}_{\text{уст0}}$ соответствует $u_0 \neq 0$, то $\bar{x}_0 = 1$ и дальнейшее поведение системы будет: $x_{\text{зад}} \equiv \tilde{x} \equiv \tilde{x}_{\text{уст0}}$, $\bar{x}_0 \equiv 1$, $u \equiv u_0 \neq 0$, что соответствует устойчивому состоянию системы управления с достижением цели управления;
- если $\tilde{x}_0 > x_{\text{зад}}$, то $\bar{x}_0 < 1$ и это порождает уменьшение сигнала u , т.е. $\dot{u} < 0$;
- если $\tilde{x}_0 < x_{\text{зад}}$, то $\bar{x}_0 > 1$ и это порождает увеличение u , т.е. $\dot{u} > 0$.

Не сложно определить, что скорость изменения сигнала u по двум последним случаям пропорциональна величине сигнала \bar{x} . Если изменение сигнала u приводит к устойчивому целевому состоянию системы управления, то это предельное значение управления будем обозначать как $u_{\text{уст}}$.

Исходя из полученных свойств, рассмотрим поведение системы управления для разных соотношений \tilde{x}_0 и u_0 (здесь примем $k > 0$). Также считаем отсутствующими внешнее возмущение и ограничение x .

1). Если $0 < u_0 \leq u_{\text{уст}}$, а $\tilde{x}_0 \leq x_{\text{зад}}$ ($\bar{x}_0 \geq 1$), то это дает плавное (в силу работы фильтра низких частот) увеличение u до тех пор, пока не будет $u = u_{\text{уст}}$, т.е. не наступит целевое устойчивое движение системы управления.

2). Если $u_0 > u_{уст}$, а $\tilde{x}_0 > x_{зад}$ ($\bar{x}_0 < 1$), то это дает плавное уменьшение u до наступления, как и в предыдущем случае, целевого устойчивого движения системы управления.

3). Если $0 < u_0 \leq u_{уст}$, а $\tilde{x}_0 > x_{зад}$ ($\bar{x}_0 < 1$), то это приведет к тому, что на первом этапе u будет медленно уменьшаться, но в силу более быстрого движения выхода объекта управления сигнал \tilde{x} будет быстро уменьшаться, пока не наступит условие $\tilde{x} \leq x_{зад}$ ($\bar{x} \geq 1$), т.е. первый из рассматриваемых случаев, если этот момент считать для него начальным, а, следовательно, – это приведет к устойчивому целевому состоянию системы управления.

4). Если $u_0 > u_{уст}$, а $\tilde{x}_0 \leq x_{зад}$ ($\bar{x}_0 \geq 1$), то движение системы, как и в предыдущем случае, разбивается на два этапа: на первом медленное увеличение u и быстрое увеличение \tilde{x} до наступления условия $\tilde{x} > x_{зад}$ ($\bar{x} < 1$), на втором – движение системы по второму из рассмотренных случаев.

Заметим, что логика функционирования системы управления по четырем рассмотренным случаям справедлива, когда $x_{зад}$ является как положительным, так и отрицательным.

Причем эта логика будет соблюдаться, если справедливы два следующих условия:

- $\text{sign}(x) = \text{sign}(x_{зад}) = \text{const}$, иначе при уменьшении по модулю сигнала x он может поменять знак (например, когда динамика объекта управления колебательная), а следовательно условие $\bar{x} > 1$ резко поменяется на $\bar{x} < 0$, что кардинально меняет логику функционирования системы управления;
- система не попадает в «мертвую точку».

Для выполнения первого из указанных условий вводится блок ограничения x с очевидной функцией ограничения $x_{огр} = f_{огр}(x)$, с учетом требуемой скорости u , в виде:

$$\begin{aligned}
 x_{зад} > 0 : & \begin{cases} x_{огр} = x, & \text{если } x_{зад} / \bar{x}_{\min} \geq x \geq x_{зад} / \bar{x}_{\max}; \\ x_{огр} = x_{зад} / \bar{x}_{\min}, & \text{если } x > x_{зад} / \bar{x}_{\min}; \\ x_{огр} = x_{зад} / \bar{x}_{\max}, & \text{если } x < x_{зад} / \bar{x}_{\max}; \end{cases} \\
 x_{зад} < 0 : & \begin{cases} x_{огр} = x, & \text{если } x_{зад} / \bar{x}_{\min} \leq x \leq x_{зад} / \bar{x}_{\max}; \\ x_{огр} = x_{зад} / \bar{x}_{\min}, & \text{если } x < x_{зад} / \bar{x}_{\min}; \\ x_{огр} = x_{зад} / \bar{x}_{\max}, & \text{если } x > x_{зад} / \bar{x}_{\max}; \end{cases}
 \end{aligned} \tag{6}$$

где \bar{x}_{\min} и \bar{x}_{\max} – ограничения сигнала \bar{x} , такие, что $0 < \bar{x}_{\min} < 1$, $1 \geq \bar{x}_{\max}$, выбираемые из соображений ограничения скорости уменьшения и увеличения сигнала u соответственно.

Перед рассмотрением второго условия отметим, что все изложенные выше доводы остаются справедливыми и для случая отрицательного коэффициента усиления объекта управления ($k < 0$). Отсюда и из изложенного выше следует, что второе условие – непопадания в «мертвую точку» будет выполняться при правильном выборе знака u_0 :

$$\text{sign}(u_0) = \text{sign}(x_{зад}) \text{sign}(k). \tag{7}$$

При этом модуль сигнала u_0 , целесообразно назначать по следующему очевидному правилу, обеспечивающему близость исходных значений входа и выхода объекта к устойчивому состоянию:

$$\frac{|u_0|}{u_{\max}} \approx \frac{|\tilde{x}_0|}{\tilde{x}_{\max}}, \text{ если } \text{sign}(\tilde{x}_0) = \text{sign}(x_{\text{зад}}), \text{ иначе } |u_0| = u_{\min} > 0; \quad (8)$$

$$|u_0| \geq u_{\min},$$

где u_{\min} – маленькое положительное число, выбираемое экспериментально.

Теперь рассмотрим влияние на работу системы управления ненулевого внешнего возмущения. Хотя его действие смещает оценку коэффициента усиления по (5), но не изменяет логики работы системы, если устранена возможность входа системы в «мертвую точку». А для этого требуется выполнения условия:

$$\begin{aligned} \Delta x < x_{\text{зад}}, & \text{ если } x_{\text{зад}} \geq 0; \\ \Delta x > x_{\text{зад}}, & \text{ если } x_{\text{зад}} < 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Действительно, если условия (8) не выполнить, то сигналы u и $u_{\text{уст}}$ будут иметь разные знаки, и при движении $u \rightarrow u_{\text{уст}}$ сигнал u должен пересекать нулевую точку, что и является «мертвой точкой», т.е. сигнал u «застрянет» в этой нулевой точке. При этом $\tilde{x} \rightarrow 0$, а $x \rightarrow \Delta x$. Хотя состояние системы сойдется к устойчивому движению, но целевая установка стабилизации выхода системы управления на значения $x_{\text{зад}}$ будет выполнена с ошибкой, модуль которой равен $|\Delta x - x_{\text{зад}}|$.

Следующий анализ – это влияние нелинейности объекта управления. В рассматриваемой постановке задачи нелинейность будем рассматривать как функцию $x_{\text{уст}} = k(x_{\text{уст}})u_{\text{уст}}$. Можно утверждать, что если функция $k(x_{\text{уст}})$, при выполнении (2), изменяется достаточно плавно – не быстрее, чем изменяется управление, то система управления достигнет целевого состояния. Для доказательства этого тезиса на рис. 3 представлен процесс настройки системы управления при произвольной нелинейности $k(x_{\text{уст}})$ – на рисунке представленная кривая.

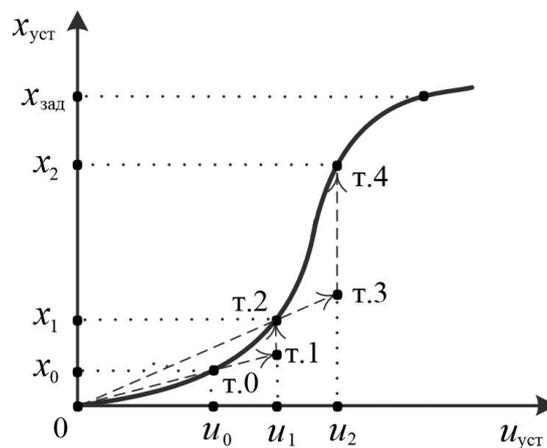


Рис.3. Настройка системы управления с нелинейным объектом

Предположим, что внешнего возмущения нет, входная и выходная переменные измеряются абсолютно точно, система функционирует в дискретные моменты времени (эти предположения не меняют сути дальнейших рассуждений).

Пусть в начальный момент времени система находится в установившемся состоянии (x_0, u_0) , т.е. в точке $t.0$ по рисунку. В этот момент оценивается коэффициент усиления

объекта, значение которого соответствует линии, связывающей начало координат с точкой т.0. По зависимости (5) вычисляется управление (обозначим как u_1), соответствующее точке т.1. По этому управлению в силу устойчивости объекта система окажется в точке т.2, соответствующей устойчивому состоянию (x_1, u_1) . Далее происходит новое оценивание коэффициента усиления и аналогичное продвижение системы последовательно в точки т.3 и т.4. Такое продвижение происходит до тех пор, пока регулируемая переменная x не достигнет целевого устойчивого значения $x_{зад}$.

Аналогичные рассуждения можно привести и для нестационарности объекта управления.

Пример 1

Рассмотрим задачу стабилизации амплитуды колебаний виброэлемента, изображенного на рис.4.

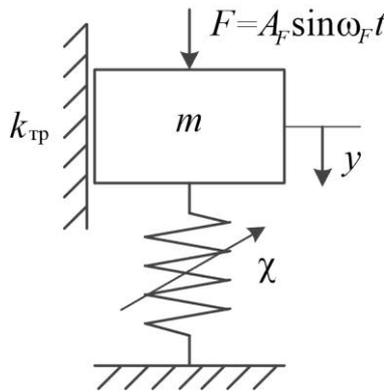


Рис.4. Схема регулируемого виброэлемента

На рисунке обозначено: m – масса виброэлемента; $\chi = \chi(t)$ – регулируемая жесткость пружины – управление этим объектом; в качестве пружины с регулируемой жесткостью может использоваться пневмобаллон с переменным давлением; $y = y(t)$ – перемещение виброэлемента, амплитуда которого является регулируемой (стабилизируемой) величиной; $k_{тр}$ – коэффициент вязкого трения; $F = F(t)$ – внешняя сила вибровозбудителя, действующая по гармоническому закону с постоянными амплитудой A_F и частотой ω_F (обе известны); будем считать, что амплитуда колебаний виброэлемента (обозначим ее как A_y) непосредственно измеряется.

Известно, что динамика перемещения виброэлемента описывается как:

$$m\ddot{y}(t) + k_{тр}\dot{y}(t) + \chi(t)y(t) = F(t); \quad \omega_0 = \sqrt{\chi/m}, \quad (10)$$

где ω_0 – собственная частота колебаний виброэлемента, представляющего собой колебательное звено [1].

Требуется, меняя жесткость пружины, поддерживать амплитуду колебаний виброэлемента на заданном уровне – $A_{зад}$. Поскольку разной жесткости пружины будет соответствовать разная собственная частота, далее примем, что при управлении будет соблюдаться условие $\omega_0 \geq \omega_F$.

Обычно такие задачи решаются с помощью классической следящей системы управления (по рис.1) с использованием П- и ПИ-регулятора [6].

В этой задаче виброэлемент, как объект управления, является нелинейным, поскольку его амплитуда колебаний соответствует амплитудно-частотной характеристике колебательного

звена (10). На рис.5 представлена зависимость амплитуды колебаний при разных значениях жесткости пружины (нижними индексами «0, 1, 2» указаны разные значения коэффициента жесткости и соответствующие ему собственные частоты колебаний виброэлемента).

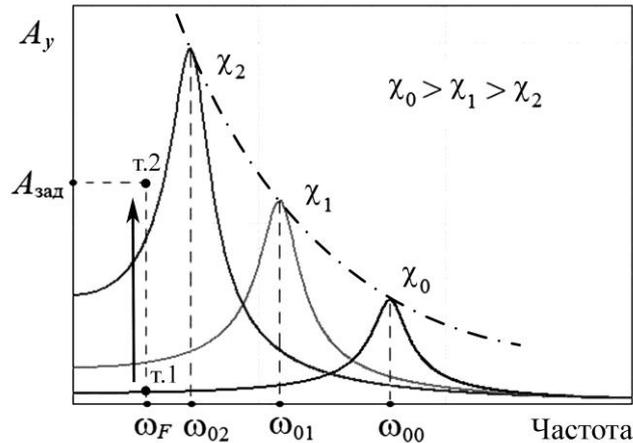


Рис.5. Зависимость амплитуды колебаний от изменения жесткости пружины

Как видим, амплитуда на частоте вынужденных колебаний ω_F нелинейно зависит от изменения жесткости пружины – переход амплитуды из точки т.1 в точку т.2 при уменьшении жесткости пружины (переменные χ_0, χ_1, χ_2 связаны линейной зависимостью). На рисунке штрих-пунктирной линией условно показана нелинейная зависимость установившегося значения регулируемой переменной от управления (от частоты собственных колебаний). Она достаточно плавно изменяется, что удовлетворяет сформированному выше требованию по сходимости настройки системы в условиях нелинейности. Коэффициент усиления объекта – постоянный (положительный).

Поскольку амплитуда возрастает с уменьшением жесткости, поэтому в качестве сигнала управления (в соответствии со схемой по рис.2) примем обратную величину жесткости:

$u \triangleq \chi^{-1}$, а управляемая переменная: $x \triangleq A_y$.

Для исследования выбраны следующие параметры виброэлемента по (10) и системы управления по рис.2: $m=20$ кг; $k_{тр} = 250$ Нс/м; $\omega_F = 10$ Гц; $A_F = 300$ Н; $\chi = 3 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^6$ Н/м; $u_{\max} = 0.33 \cdot 10^{-4}$ м/Н; $u_0 = 0.33 \cdot 10^{-6}$ м/Н, т.е. начальное значение жесткости пружины – максимальное (начальная амплитуда колебаний – минимальная). Из предварительного испытания определено, что время переходного процесса исходного объекта приблизительно равно 0.3с. Фильтр низких частот был реализован в виде апериодического звена с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 1с. Функция ограничения сигнала x не использовалась, в силу постоянного положительного знака амплитуды колебаний, удаленностью ее от нулевого значения и близости ее переходного процесса к апериодическому процессу. Остальные условия функционирования системы управления по рис.2, рассмотренные выше, выполняются. Моделирование проводилось в среде Matlab.

На рис.6 представлены результаты исследования системы стабилизации виброэлементом со схемой по рис.2, $A_{зад} = 5$ мм. Во время моделирования предполагалось воздействие внешнего возмущения: в момент времени $t = 10$ с амплитуда вибровозбуждения (A_F) ступенчато увеличивается на 100Н, а в момент времени $t = 15$ с частота вибровозбуждения (ω_F) ступенчато уменьшается на 3 Гц.

Подобные результаты получены и при других значениях заданной амплитуды колебаний в диапазоне $A_{\text{зад}} = 0.2 \div 17$ мм, что соответствует практически предельным возможностям виброэлемента с указанными характеристиками.

Исследование этой задачи при использовании схемы управления по рис.1 с ПИ-регулятором в указанных диапазонах заданной амплитуды колебаний требует существенной перестройки регулятора по режимам работы, либо ограничивается диапазон заданных значений амплитуды колебаний. Это также сочетается с выводами работы [7].

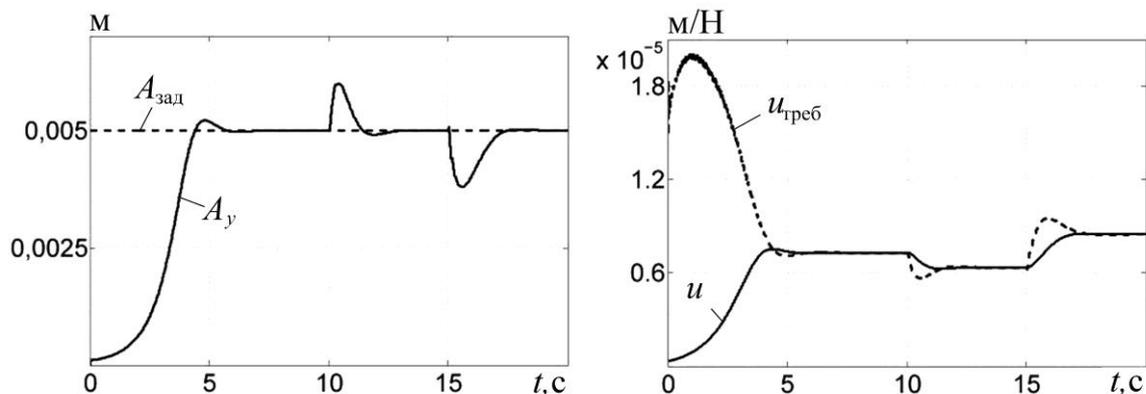


Рис.6. Исследование функционирования стабилизирующего регулятора со статической адаптацией для стабилизации амплитуды виброэлемента

Пример 2

Рассмотрим задачу стабилизации нелинейного объекта, у которого динамика выходного сигнала описывается в виде соединения линейной и нелинейной части. Линейная часть представляет собой колебательное звено с коэффициентом усиления, равным 3, собственной частотой колебаний 5c^{-1} и относительным коэффициентом затухания 0.3. Нелинейная часть представляет собой квадратическую зависимость с сохранением знака входного сигнала.

Из предварительного испытания определено, что время переходного процесса исходного объекта приблизительно 2с. Заданное значение выходного сигнала $x_{\text{зад}} = 1$. Фильтр низких частот был реализован в виде апериодического звена с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени 4с, начальное его значение $u_0 = 0.1$. Величины ограничений переменной \bar{x} выбраны в виде: $\bar{x}_{\text{min}} = 0.5$, $\bar{x}_{\text{max}} = 2$. На выход объекта в момент времени 20с подается внешнее возмущение в виде ступенчатого сигнала величиной -0.7.

Результаты моделирования функционирования замкнутой системы управления по рис.2 с указанным объектом управления представлен на рис.7. Подобные результаты получены и при других заданных значениях регулируемой переменной и внешних возмущениях.

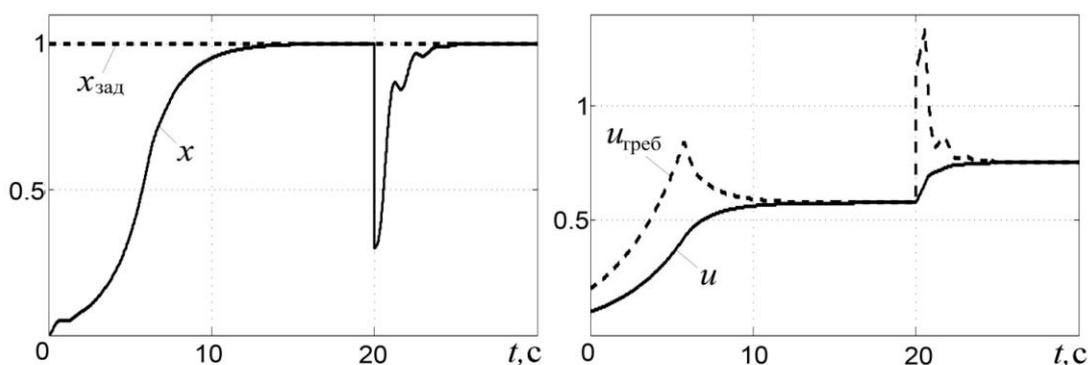


Рис.7. Исследование функционирования стабилизирующего регулятора со статической адаптацией для решения задачи по примеру 2

Заключение

Таким образом, стабилизирующая система управления с использованием регулятора со статической адаптацией (по рис.2) при выполнении условий (6) – (9) обеспечивает выполнение целевой задачи стабилизации для устойчивого нелинейного нестационарного объекта управления при неполной априорной информации об нем. Для настройки такого регулятора в основном достаточно лишь приблизительной информации о времени переходного процесса исходного объекта и знака его коэффициента управления (знак должен быть постоянный). Из представленных рассуждений следует, что устойчивость замкнутой системы всегда можно обеспечить путем уменьшения частоты среза (увеличения переходного периода) фильтра низких частот системы.

Рассматриваемая система управления выгодно отличается от классической следящей системы управления (по рис.1) тем, что не требует перестройки закона управления в этих условиях. Единственным недостатком в сравнении с классической системой является увеличенный переходный процесс, который во многих задачах стабилизации не является критическим фактором. Результаты модельного исследования с разными объектами показывают справедливость теоретических установок и сформулированных выводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб, Издательство «Профессия», 2003. – 752 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления в 5т. Т.3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 617с.
3. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. – СПб: Лань, 2015. 624 с.
4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608с.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления в 5т. Т.5: Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с.
6. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./ Ред. Совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. 1981. – 509с.
7. Еремин Е.Л., Теличенко Д.А., Семичевская Н.П., Чепак Л.В., Шеленок Е.А. Управление техническими системами в условиях неопределенности. Монография. – Благовещенск. Издательство АмГУ. 2014. – 211с.

REFERENCES

1. Besekerskiy V.A., Popov E.P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of systems of automatic control]. St. Petersburg, "Professiya", 2003, 752 p.
2. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of the classical and modern theory of automatic control] in 5 Vol. Vol.3: Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya [Synthesis of regulators of systems of automatic control] / Red. K.A. Pupkov, N.D. Egupov. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2004, 617p.
3. Pervozvanskiy A.A. Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya [Course of the theory of automatic control]. St. Petersburg, Lan', 2015, 624p.
4. Denisenko V.V. Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim processom, eksperimentom, oborudovaniem [Computer production control, experiment, equipment]. Moscow, "Goryachaya liniya-Telekom", 2009, 608p.
5. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of the classical and modern theory of automatic control] in 5 Vol. Vol.5: Metody sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya [Methods of the modern theory of automatic control] / Red. K.A. Pupkov, N.D. Egupov. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2004, 784 p.
6. Vibracii v tekhnike: Spravochnik [Vibrations in technique: Reference book] in 6 Vol./ Red. V.N. Shelomej. Moscow, "Mashinostroyeniye", 1981. Vol.4: Vibracionnyye processy i mashiny [Vibration processes and cars] / Red. E.E. Lavendel. 1981, 509p.
7. Eremin E.L., Telichenko D.A., Semichevskaya N.P., Shepak L.V., Shelonok E.A. Upravlenie tekhnicheskimi sistemami v usloviyah neopredelennosti [Control of technical systems in the conditions of indeterminacy]. Monograph. Blagoveshchensk, AmGU, 2014, 211p.

Информация об авторах

Круглов Сергей Петрович – д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов», Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Authors

Kruglov Sergey Petrovich – doctor of technical sciences, professor of department «Automation of production operations», Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: kruglov_s_p@mail.ru

Для цитирования

Круглов С.П. Стабилизирующий регулятор со статической адаптацией // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2019. – №2. – С. 1-11 – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/23-2019>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус., англ. (дата обращения: 05.06.2019)

For citations

Kruglov S.P. The stabilizing regulator with static adaptation // Informacionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami: ehlektronnyj nauchnyj zhurnal [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems: electronic scientific journal], 2019. No. 2. P. 1-11 [Accessed 05/06/19]