

УДК 681.51

В.А. Бейнарович

Инвариантные системы автоматического управления с релейным усилителем

Излагаются принципы построения и методы расчета инвариантных систем автоматического управления с релейным усилителем, работающих в режиме автоколебаний.

Ключевые слова: инвариантные системы управления, принцип обратной связи, релейный регулятор, метод гармонического баланса, автоколебания, самонастройка.

В системах автоматического управления (САУ) часто используется принцип обратной связи, обеспечивающий минимизацию отклонений регулируемой величины от заданного значения независимо от причин, вызвавших эти отклонения [1, 2]. В линейных САУ величина отклонений в установившихся режимах $\Delta x(t) = G(t) - x(t)$ обратно пропорциональна коэффициенту передачи K и в пределе, при $K = \infty$ и нулевых начальных условиях, отклонение регулируемой величины $\Delta x(t)$ будет равно нулю при любых воздействиях на САУ, если они ограничены по модулю. В таких САУ регулируемая величина будет инвариантна к возмущающему воздействию $F(t)$ и ковариантна к задающему воздействию $G(t)$ (рис. 1).

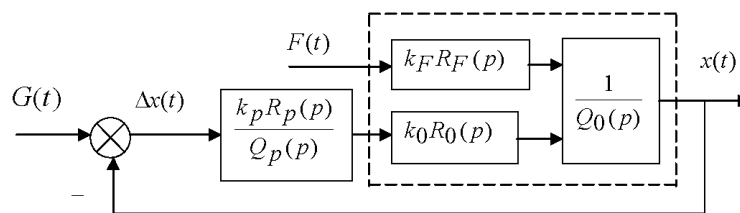


Рис. 1. Структура инвариантной САУ с бесконечно большим $k_p \rightarrow \infty$

Передаточные функции в такой инвариантной САУ (ИСАУ) по возмущающему и задающему воздействиям будут:

$$W_F(p) = \frac{\Delta x(p)}{F(p)} = \frac{k_F R_F(p) Q_p(p)}{Q_p(p) Q_0(p) + k_p k_0 R_p(p) R_0(p)}, \quad (1)$$

$$W_G(p) = \frac{\Delta x(p)}{G(p)} = \frac{Q_p(p) Q_0(p)}{Q_p(p) Q_0(p) + k_p k_0 R_p(p) R_0(p)}. \quad (2)$$

Общее отклонение регулируемой величины определится выражением

$$\begin{aligned} \Delta x(p) = W_F(p) \cdot F(p) + W_G(p) \cdot G(p) = & \frac{k_F R_F(p) Q_p(p)}{Q_p(p) Q_0(p) + k_p k_0 R_p(p) R_0(p)} F(p) + \\ & + \frac{Q_p(p) Q_0(p)}{Q_p(p) Q_0(p) + k_p k_0 R_p(p) R_0(p)} G(p). \end{aligned} \quad (3)$$

Если все коэффициенты в выражении (3), кроме k_p , являются конечными величинами, а $k_p = \infty$ и $k_p k_0 = \infty$, то при нулевых начальных условиях отклонение регулируемой величины Δx будет равно нулю при всех ограниченных по модулю воздействиях $G(t)$ и $F(t)$. В такой САУ регулируемая величина $x(t)$ будет инвариантна до свободной составляющей относительно возмущающего воздействия ($\Delta x = 0$ при $F = \text{var}$) и ковариантна к задающему воздействию ($x \equiv G$).

Однако в САУ с бесконечно большим коэффициентом усиления регулятора, например с релейным регулятором, возникают автоколебания, форма и амплитуда которых зависят от параметров замкнутой системы управления и формы релейной характеристики регулятора.

Если автоколебания выходной величины $X(t)$ ограниченной амплитуды в САУ допустимы по условиям эксплуатации, то инвариантную систему управления с релейным регулятором с насыщением $\pm U_0$ можно построить по схеме (рис. 2) при линейризации всех других звеньев системы.

Техническая реализация таких инвариантных САУ не вызывает затруднений, и задача их создания заключается в ограничении амплитуды автоколебаний на допустимом уровне, поскольку инвариантность к возмущениям обеспечивается до величины, равной амплитуде автоколебаний, когда за отклонение от условия инвариантности взято рассогласование ε .

Для синтеза инвариантной САУ с релейным регулятором с насыщением для ограничения амплитуды автоколебаний регулируемой величины $X(t)$ удобно использовать метод гармонического баланса [1, 2]. Нужно рассмотреть установившийся режим автоколебаний выходной величины $X(t)$, режим стабилизации амплитуды автоколебаний при изменении возмущения $F(t)$ и режим управления выходной величиной $X(t)$ при изменении задающего воздействия $G(t)$.

Для компенсации максимального возмущения $F(t)$ минимальное значение U_0 в рассматриваемой системе должно быть $U_0 \geq k_F / \tau_0$ (см. рис. 2). Затем методом гармонического баланса [1, 2] определяются значения выходной величины y релейного элемента и амплитуды автоколебаний, которая в рассматриваемой системе будет равна [1, 2]

$$A = \frac{2U_0 K_0 K_p (T_0 T_p - \tau_0 T_0 - 2d\tau_0 T_p)}{\pi d (T_p^2 + T_0^2 + 2dT_0 T_p)} \quad (4)$$

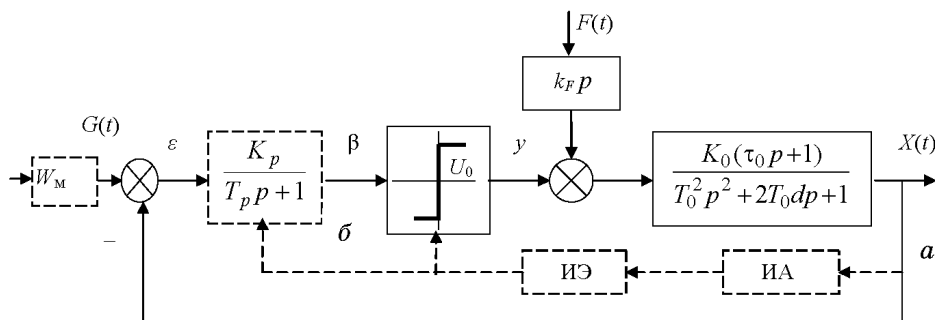


Рис. 2. Инвариантная САУ с релейным регулятором с насыщением

Варьируя изменяемые параметры системы K_p и $K_p / (T_p p + 1)$, добиваются значения амплитуды автоколебаний, не превышающей допустимой величины. Если при данной структуре и данном значении U_0 амплитуда автоколебаний превышает допустимое значение, то в структуру ИСАУ вводятся форсирующие связи по производным, увеличивающие частоту и уменьшающие амплитуду автоколебаний.

При изменениях задающего $G(t)$ и возмущающего $F(t)$ воздействий амплитуда автоколебаний при выбранных значениях K_p и T_p может превысить допустимое значение. Изменение параметров объекта управления можно скомпенсировать за счет самонастройки величины U_0 релейной характеристики регулятора (при этом частота автоколебаний изменяться не будет). Если в процессе работы системы управления амплитуда автоколебаний превышает максимально допустимое значение ε_m при выбранных K_p и T_p , то значение U_0 необходимо уменьшить и наоборот. Устройство самонастройки в простейшем случае состоит из измерителя амплитуды автоколебаний ИА и исполнительного элемента самонастройки ИЭ (см. рис. 2), изменяющих величину U_0 релейного элемента и коэффициент усиления K_p таким образом, чтобы амплитуда автоколебаний оставалась постоянной. Цепь самонастройки в данной системе замкнутая. Здесь выходные сигналы релейного элемента могут рассматриваться как пробные сигналы, а ИА – как элемент, оценивающий реакцию системы на эти сигналы. При расчете цепи самонастройки необходимо учитывать, что U_0 не должно уменьшаться ниже некоторого предела, определяе-

мого выполнением условия инвариантности системы к возмущающему воздействию $F(t)$ и ковариантности к управляющему сигналу $G(t)$. Это относится и к случаю, когда самонастройка производится за счет изменения коэффициента усиления элементов, включенных после релейного элемента.

Если изменения коэффициента усиления элементов регулятора и величины U_0 не позволяют удовлетворить условие инвариантности для всех трех характерных режимов работы ИСАУ, то необходимо использовать самонастройку путем изменения частоты автоколебаний с введением форсирующих элементов в усилитель $K_p/(T_p p + 1)$ (см. рис. 2).

Характерной особенностью автоколебательных систем является прохождение полезного низкочастотного задающего сигнала $G(t)$ и высокочастотных сигналов автоколебаний с разными коэффициентами усиления (см. рис. 2).

Это объясняется тем, что коэффициент усиления релейного элемента по высокочастотной гармонической составляющей равен [1, 2]:

$$q(\beta_0, A) = \frac{1}{\pi A} \int_0^{2\pi} \varphi(\beta_0 + A \sin G) \sin G dG, \quad (5)$$

где A – амплитуда автоколебаний; β_0 – постоянная составляющая, поступающая на вход релейного элемента.

При симметричных автоколебаниях $\beta_0 = 0$ и коэффициент усиления

$$q(A) = \frac{4U_0}{\pi A}. \quad (6)$$

По низкочастотной составляющей (по управляющему сигналу) коэффициент усиления равен $k_H = (\partial q_0 / \partial \beta_0)_{\beta_0} = \beta_{\text{зад}}^0$, где в общем случае

$$q_0(\beta_0, A) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \varphi(\beta_0 + A \sin G) dG. \quad (7)$$

Для релейного элемента получим

$$q_0(\beta_0, A) = \frac{2U_0}{\pi} \arcsin \frac{\beta_0}{A}, \quad k_H = \frac{2U_0}{\pi A} \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_0/A}}. \quad (8)$$

Это различие в коэффициентах усиления позволяет создать систему с совмещенной цепью самонастройки, в результате чего значительно упрощается система управления в целом. В такой ИСАУ вместо обычного усилителя устанавливается регулируемый релейный усилитель, в котором выходная величина U_0 изменяется в зависимости от амплитуды автоколебаний. В результате амплитуда автоколебаний остается неизменной за счет стабилизации коэффициента усиления системы по управляющему сигналу. При этом если коэффициент усиления линейной части уменьшается, то эквивалентный коэффициент усиления релейного регулятора увеличивается. Самонастраивающаяся ИСАУ с регулируемым релейным усилителем отличается от ИСАУ, представленной на рис. 2, тем, что в ней место замера амплитуды перенесено из точки a в точку b , а элементы ИА и ИЭ совмещены с релейным усилителем с насыщением. Применение таких ИСАУ является весьма перспективным для управления объектами, допускающими наличие автоколебаний выходной регулируемой величины. Для предотвращения забросов регулируемой величины и срыва автоколебаний при резком изменении управляющего сигнала $G(t)$ последний предварительно пропускается через модель W_M сглаживающего фильтра (см. рис. 2).

Литература

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – М. : Наука, 2003. – 752 с.
2. Корилов А.М. Основы теории управления / А.М. Корилов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2002. – 392 с.
3. Бейнарович В.А. Инвариантные самонастраивающиеся системы автоматического управления // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2008. – № 1(17). – С. 61–64.

Бейнарович Владислав Александрович

Доктор техн. наук, профессор каф. комплексной информационной безопасности ТУСУРа,
заслуженный изобретатель РФ

Тел.: (8-382-2) 41-34-26

Эл. адрес: bva@keva.tusur.ru

V.A. Beynarovich

Invariant automatic control systems with relay amplifier

Constructions principles and calculation methods of self-adjusted systems of automatic control with relay's model for objects with automatic frequency.

Keywords: invariant systems, feedback principle, relay regulator, describing function method, autooscillations, self-adjustment.
