

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

Կ. Մ. ХОДЖАՅԱՆԸ, Բ. Ա. ՏԱՐԿԻՅԱՆԻ, Կ. Ա. ՆԱՐԻՆՅԱՆԻ

ДВУХПОЗИЦИОННЫЙ КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫЙ РЕГУЛЯТОР
 ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Одним из основных параметров, требующих высокой точности регулирования в современных технологических процессах, является температура. Поэтому оптимальный выбор технических средств регулирования имеет огромное народно-хозяйственное значение. Около 80% регулируемых технологических устройств в народном хозяйстве удовлетворяются при точности регулирования от 0,5 до 1,5%.

В высокоточных аналоговых регуляторах регулируемая величина фиксируется непрерывно и постоянно сравнивается в компараторе с задающей величиной. Сигнал ошибки воздействует через регулятор на регулируемый объект, поддерживая постоянной регулируемую величину при определенных возмущениях. Напротив, в двухпозиционном регуляторе регулируемый параметр фиксируется периодически, прерывисто, также прерывисто происходит воздействие регулятора на регулируемый объект. При таком регулировании значительно упрощается система регулирования, но появляются значительные отклонения в регулировании. Снабдив двухпозиционный регулятор простейшими корректирующими цепями RC, можно значительно снизить эти отклонения. При этом регулятор превращается в импульсно-пропорциональный с ПД или ПИД законами регулирования. Ввиду повышения частоты колебаний регулятора, амплитуда колебаний регулируемой величины значительно уменьшается, характеристики регулирования при этом мало отличаются от таковых для аналоговых регуляторов.

При не слишком жестких требованиях, на практике импульсно-пропорциональные регуляторы с ПД и ПИД законами регулирования изготавливаются для фиксированных значений времени изотропа и предвращения. Это обстоятельство значительно упрощает систему корректирующей обратной связи в регуляторе, снижает его вес, габариты и стоимость. За рубежом около 70% регуляторов температуры изготавливаются по вышеописанному принципу.

Развитие микроэлектроники в настоящее время позволяет в корне пересмотреть вопросы организации, конструирования и серийного производства регуляторов температуры широкого применения. При сравнительно небольшом количественном повышении квалификации разработчиков можно одновременно добиться значительного снижения требований к квалификации рабочих и ИТР в серийном производстве, повышения технологичности и интенсификации производства.

Следует отметить, что двухпозиционному автоматическому регулированию, несмотря на его прогрессирующее распространение, в нашей печати уделяется очень мало внимания и вовсе отсутствуют работы по комплексному рассмотрению работы двухпозиционного регулятора на интегральном операционном усилителе в составе объекта регулирования.

Работа регулятора при разомкнутом цикле. Характеристика двухпозиционного регулятора представлена на рис. 1, из которого видно, что при отклонении регулируемой величины x от заданного w приток тепла Q скачком изменяется от максимального значения до 0. Диапазон нечувствительности или гистерезис включения составит:

$$\Delta U = x - w > U_c;$$

$$\Delta U = w - x < U_0;$$

где U_c и U_0 — приведенные ко входу пороги срабатывания и отспускания триггера.

Применяя операционный усилитель с большим коэффициентом усиления, можно уменьшить зону нечувствительности.

На рис. 2 приведена упрощенная принципиальная схема регулятора.

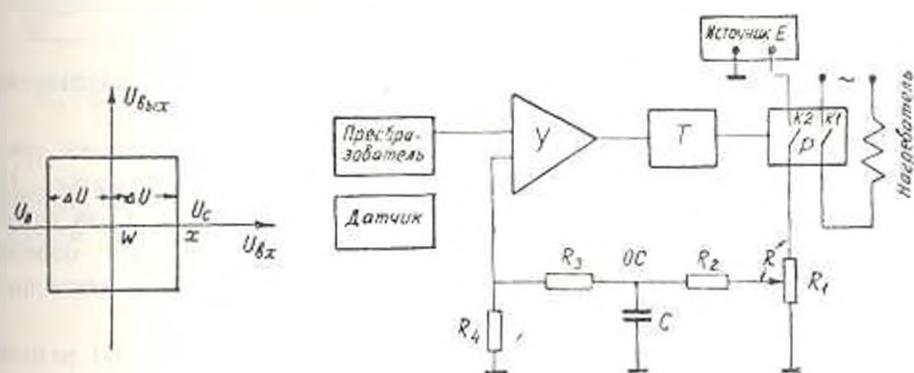


Рис. 1. Характеристики двухпозиционного регулятора.

Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема регулятора.

ра, где U — интегральный операционный усилитель; T — триггер; OC — цепь обратной связи. Без цепи OC регулятор работает по двухпозиционной схеме. Для перехода к импульсно-пропорциональному регулированию периодически замыкается и размыкается ключ $K2$. Для операционного усилителя с достаточно большим коэффициентом усиления (К1УТ401Б, К1УТ402) коэффициент передачи определяется выражением:

$$k = \frac{R_{12}}{R_{11}} \gg 1.$$

Передаточная характеристика регулятора совместно с ОС будет иметь вид

$$K_{\Sigma} = \frac{R_{oc}}{R_{oc}} (1 + T_D P),$$

где T_D — время предварения.

При включении регулятора, когда температура объекта ниже заданной, в преобразователе датчика возникает положительная расстройка, и, при достаточной величине этой расстройки, срабатывает исполнительное устройство, состоящее из триггера Т и реле Р, контакт К1 замыкается и включаются нагреватели рис. 2. Одновременно размыкается контакт К2. Нагреватели будут включены до тех пор, пока температура объекта не достигнет заданного значения и частично превысит это значение. В этот момент произойдет обратное срабатывание триггера и нагреватели выключатся, так как напряжение kU станет равным 0 или несколько меньше 0. После выключения нагревателей, kU снова будет возрастать, в то же время, ввиду замыкания ключа К2, начнется заряд конденсатора С от источника питания через R_1 и R_2 .

Суммарное напряжение, поступающее на вход измерительного усилителя, при этом будет равно

$$U_{\Sigma} = |U| + U_{oc},$$

где $|U|$ — напряжение расстройки измерительного преобразователя; U_{oc} — напряжение обратной связи.

Когда U_{Σ} превышает пороговое значение U_c , срабатывает триггер и включаются нагреватели, $|U|$ будет медленно понижаться, U_{oc} будет быстро спадать, благодаря разряду конденсатора С на сопротивление $R_1 \parallel R_2$, нагреватели снова выключатся. Таким образом возникает автоколебательный режим, обеспечивающий существенное снижение амплитуды автоколебаний.

Когда напряжение на входе триггера меньше kU_c , ключ К1 разомкнут, ключ К2 замкнут и происходит заряд конденсатора С.

Процесс заряда конденсатора описывается обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка с постоянными коэффициентами

$$\tau \frac{dU}{dt} + U(t) = E, \quad (1)$$

где $\tau = R_2 C$ — постоянная времени цепи заряда; E — э. д. с. источника питания.

Решение уравнения (1) имеет вид

$$U_{\text{зад}}(t) = U(\infty) - [U(\infty) - U(0)] e^{-t/\tau}. \quad (2)$$

В качестве граничных условий примем:

$U(\infty)$ — установившееся значение напряжения на выходе цепи ОС (на R_1);

$U(0)$ —начальное напряжение на выходе;
так же учтем, что

$$U(\infty) = \frac{E}{R_1} \cdot \frac{(R_2 - R)R_3}{R_2 + R_3 + R_4}$$

При $R = R_1$ имеем двухпозиционный режим регулирования. При $R < R_1$ пропорционально дифференциальный (ПД) режим регулирования. При этом коэффициент пропорциональности увеличивается с уменьшением R и R_1 .

На рис. 3 приведены кривые $U(t)$ при различных положениях движка потенциометра. Как видно из рис. 3, время выключенного

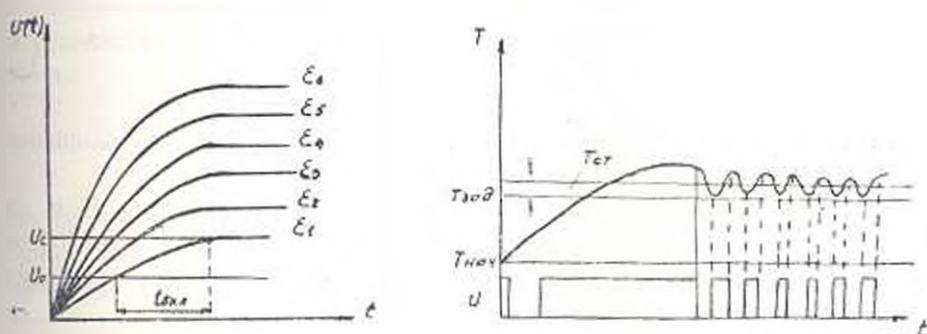


Рис. 3. Кривые $U(t)$ при различных положениях движка потенциометра R .
Рис. 4. График ПД регулирования

состояния регулятора $t_{\text{выкл}}$, а следовательно, период будет зависеть от ϵ . Чем больше ϵ , тем меньше $t_{\text{выкл}}$. Из (2) можно вычислить

$$t_{\text{выкл}} = R_2 C \ln \frac{\epsilon - U_0}{\epsilon - U_c} \quad (3)$$

Так как $\frac{U_0}{\epsilon} \ll 1$ и $\frac{U_c}{\epsilon} \ll 1$, то разложение в ряд Тейлора дает

$$t_{\text{выкл}} = R_2 C \frac{U_c - U_0}{\epsilon} \quad (4)$$

(заметим, что $U_c - U_0$ —гистерезис включения регулятора).

Когда напряжение на выходе операционного усилителя равно ϵU_c , триггер срабатывает, включается ключ К1 и выключается К2. Начинается разряд конденсатора C на параллельную цепь $(R_2 + R_4) \parallel (R_2 + R_3 - R)$. Решение уравнения (1) для разряда будет иметь вид

$$U_{\text{разр}}(t) = \epsilon U e^{-t/\tau_{\text{разр}}} \quad (5)$$

где $\tau_{\text{разр}} = (R_2 + R_4) \parallel (R_2 + R_3 - R) C$.

Так как R_2 и $R_4 \ll R_2$ и R_3 (из схемных соображений), то

$$\tau_{\text{разр}} \approx \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C.$$

При этом $U(\infty) = 0$, $U(0) = U_c$.

Из (5) время включенного состояния

$$t_{\text{вкл}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C \ln \left(\frac{U_c}{U_0} \right) \quad (6)$$

Так как $\frac{U_c - U_0}{U_0} \ll 1$, то

$$t_{\text{вкл}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C \left(\frac{U_c}{U_0} - 1 \right). \quad (7)$$

Период колебаний будет

$$T = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}}.$$

Для данной схемы ε , U_c , U_0 постоянны, поэтому период колебаний будет зависеть от ε .

Влияние параметров объекта на процессы регулирования. Если на один из входов операционного усилителя поступает сигнал $|U|$ от объекта, то граничные условия при решении уравнения (1) будут следующие:

$$U(\infty) = \varepsilon; \quad U(0) = U_0 \pm |U|;$$

$$U(t) = U_c \pm |U|,$$

где знак «+» для положительных сигналов (объект требует нагрева), знак «-» для отрицательных сигналов (нагрев необходимо выключить).

$$t_{\text{выкл}} = R_2 C \ln \frac{\varepsilon - (U_0 - U)}{\varepsilon - (U_c - U)} \quad (8a)$$

или

$$t_{\text{выкл}} \approx R_2 C \varepsilon \frac{U_c - U_0}{\varepsilon - U}. \quad (8b)$$

Как видно из (8), время выключения при отрицательных сигналах уменьшается, а при положительных увеличивается, что соответствует нагревотому и холодному состояниям объекта.

Для времени включения получим:

$$t_{\text{вкл}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C \ln \frac{U_c \pm U}{U_0 \pm U} \quad (9a)$$

или

$$t_{\text{вкл}} \approx \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C \left(\frac{U_c - U_0}{U_0 + U} \right) \quad (96)$$

При положительных сигналах время включения уменьшается, при отрицательных — увеличивается. Период колебаний и скважность будут одновременно зависеть от напряжений ε и U .

На рис. 4 представлена характеристика ПД регулирования.

При первом включении регулятор от нескольких до нескольких десятков минут включает нагреватели, при этом температура объекта растет и несколько переходит заданное значение, затем нагрев объекта выключается и включается периодически, но с различной скважностью, соответствующей термодинамическому состоянию объекта. При этом точная установка задания невозможна; возникает статизм, который вносит некоторую систематическую погрешность в регулирование.

Погрешности регулятора. Относительная погрешность установки задатчика

$$|\delta_3| = \frac{R_{\text{зад}} - R_{\text{ист}}}{\Delta R}$$

где $R_{\text{зад}}$ — сопротивление, соответствующее значению сопротивления термометра или компаратора; $R_{\text{ист}}$ — истинное значение сопротивления задатчика;

ΔR — диапазон изменения сопротивления задатчика

$|\delta_{3, \text{др}}|$ — относительная погрешность, возникающая за счет временного дрейфа;

$|\delta_{3, \text{тдр}}|$ — относительная погрешность, возникающая за счет температурного дрейфа;

$|\delta_4|$ — относительная погрешность, возникающая за счет изменения напряжения питания;

$|\delta_5|$ — относительная погрешность от радио и сетевых помех.

Указанные погрешности не коррелированы, поэтому [3]

$$\delta = (\delta_3^2 + \delta_{3, \text{др}}^2 + \delta_{3, \text{тдр}}^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2)^{1/2}$$

Если тривиально за основную погрешность принять $|\delta_3|$, то остальные погрешности будут считаться дополнительными, при этом уменьшение погрешности $|\delta_3|$ возможно достигнуть более простыми средствами, чем $\delta_{3, \text{др}}$ и δ_5 [4, 5], ибо $\delta_{3, \text{др}}$ и δ_5 в операционном усилителе постоянного тока имеют противоположную тенденцию при компенсации. Так, в усилителе с преобразователем трудно подавить $\delta_{3, \text{др}}$ и усилителе без преобразователя δ_5 труднее компенсируется.

Кроме δ в регуляторе имеется также систематическая погрешность, непосредственно складывающаяся с δ_3 . (Это — статизм при ПД регулировании). Она может быть учтена при градуировке шкалы задатчика для объектов, имеющих постоянные термодинамические параметры, или же путем введения издромного регулирования.

Как было показано выше, регулятор обеспечивает импульсно-пропорциональный режим при установившемся процессе, при этом период колебаний составляет 1—20 сек. Процесс установления продолжается от нескольких до десятков минут. Поэтому регулятор более относится к аналоговым регуляторам и назван—квази непрерывным.

Поступило 18.IV.1975.

ՅՈՒ. Մ. ԿՈՋԱՅԱՆՑ, Ռ. Ա. ՍԱՐԳՍՅԱՆ, Կ. Ա. ԱՄՐՈՒՅԱՆ

ՕՊԵՐԱՑԻՈՆ ՈՒՏԵՎԱՅՈՒՑԻՋՈՎ ԶԵՐՄԱՍՏԻՃԱԿԵՐ ԵՐԿՐԻՐՔԱՅԻՆ
ՔՎԱԶԻՆՆԵՐՄԱՏ ԿԱՐԳԱՎՈՐՐԶ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում գրտված է ինտեգրալ օպերացիոն ուժեղացուցիչով չերմաստիճանի երկդիրքային կարգավորիչի աշխատանքը՝ իմպուլսային համեմատական դիֆերենցող-ճշգրտող հետագայքով կապով:

Ստացված են արտահայտություններ կարգավորիչի միաջաման ու անջաման ժամանակները ստատիկ ու դինամիկ ուժեղանքերում հաշվարկելու համար: Վերլուծության է ենթարկված սխեմանի կայունությունն ալգմուկներին և բաշտահայտված է կարգավորման սխալը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Der Operationsverstärker als elektronischer Regler. „Elektronik“, №21,2, 1973.
2. Кашко-Ведли А. А. Автоматическое звуко-оптическое регулирование. Изд. «Наука», М., 1967.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Изд. «Наука», М., 1969.
4. Сергеев А. Н., Цепенко М. П. Методы уменьшения помех в термометрических цепях. Изд. «Энергия», М., 1968.
5. Шилло В. В. Линейные интегральные схемы. Изд. «Сов. радио», М., 1974.