

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

В сельскохозяйственном производстве широко распространены регуляторы непрерывного действия, позволяющие реализовать пропорциональный (П-), интегральный (И-), издромный (ПИ-), пропорционально-дифференциальный (ПД-), а также издромный с предварением (ПИД-) законы регулирования.

**П-регуляторы** – это такие, у которых между положением затвора РО и значением отклонения выходного воздействия объекта управления от уставки (нормы) существует прямая зависимость

$$x_{p.o} = k_p \Delta y, \quad (3.4)$$

где  $x_{p.o}$  – перемещение затвора регулирующего органа;  $k_p$  – коэффициент передачи регулятора;  $\Delta y$  – отклонение регулируемого параметра (выходного воздействия объекта) от уставки.

Из выражения (3.4) видно, что равновесное состояние регулятора возможно при различных значениях регулируемого параметра.

В динамическом отношении П-регулятор аналогичен безынерционному звену с передаточной функцией

$$W_{\Pi}(p) = k_p. \quad (3.5)$$

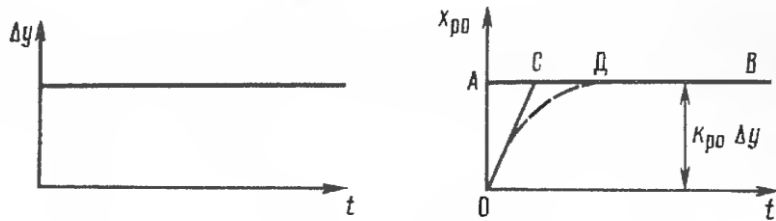


Рис. 3.2. Кривая разгона П-регулятора

Кривая разгона П-регулятора показана на рисунке 3.2. У идеализированного регулятора после скачкообразного изменения входного воздействия  $\Delta y$  затвор регулирующего органа перемещается также скачкообразно (по ломаной OAB), а у реального – по экспоненте OD (показана штриховой линией) или по прямой OC. После перемещения затвор регулирующего органа остается в занятом им положении до тех пор, пока выходное воздействие объекта снова не приблизится к уставке. Основные достоинства П-регулятора – быстрое действие и высокая устойчивость процесса регулирования. Благодаря этим качествам регулятор можно использовать в тех случаях, когда в

объекте отсутствует самовыравнивание и наблюдаются частые и резкие возмущающие воздействия. В то же время П-регулятору присуще остаточное отклонение (статическая ошибка), что снижает точность регулирования.

Для большинства промышленных электрических регуляторов (в том числе и для П-регулятора) их качества в основном определяются свойствами цепи обратной связи. Это можно показать, проанализировав структурную схему обобщенного регулятора (рис. 3.3).

Передаточная функция регулятора

$$W_{\text{рег}}(p) = k_y W_{\text{и.м.}}(p) / [1 + W_{\text{и.м.}}(p) W_{\text{о.с.}}(p)], \quad (3.6)$$

где  $k_y$  – коэффициент передачи усилительного устройства;  $W_{\text{и.м.}}(p)$  – передаточная функция исполнительного механизма;  $W_{\text{о.с.}}(p)$  – передаточная функция обратной связи.

Если передаточную функцию прямого канала структурной схемы регулятора обозначить как

$$W_{\Pi}(p) = k_y W_{\text{и.м.}}(p), \quad (3.7)$$

то

$$W_{\text{рег}}(p) = W_{\Pi}(p) / [1 + W_{\Pi}(p) W_{\text{о.с.}}(p)] = 1 / [1/W_{\Pi}(p) + W_{\text{о.с.}}(p)]. \quad (3.8)$$



Рис. 3.3. Структурная схема обобщенного промышленного регулятора

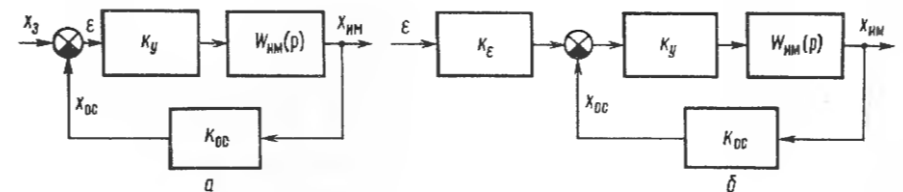


Рис. 3.4. Структурная схема П-регулятора:

а – общий вариант; б – с дополнительным усилением рассогласования

В промышленных электрических регуляторах  $W_{\Pi}(p) \gg 1$ , поэтому  $1/W_{\Pi}(p) \ll W_{о.с.}(p)$ . В этой связи можно записать, что

$$W_{рег}(p) \approx 1/W_{о.с.}(p). \quad (3.9)$$

Условие (3.9) справедливо и для П-регуляторов. Для их реализации используют структурную схему, показанную на рисунке 3.4, а. Отрицательная обратная связь (жесткая) вводится по положению регулирующего органа или исполнительного механизма. Чаще всего в электрических П-регуляторах в качестве исполнительного механизма применяют электрический двигатель с редуктором, которые в динамическом отношении являются интегрирующим звеном

$$W_{и.м.}(p) = 1/(T_{и.м.}p), \quad (3.10)$$

где  $T_{и.м.}$  — постоянная времени исполнительного механизма.

В соответствии с рисунком 3.4 передаточная функция П-регулятора

$$W_{\Pi}(p) = k_y W_{и.м.}(p) / [1 + k_y W_{и.м.}(p) k_{о.с.}] = \frac{k_y}{T_{и.м.}p} / \left(1 + \frac{k_y k_{о.с.}}{T_{и.м.}p}\right) = \\ = 1/[k_{о.с.} \left(\frac{T_{и.м.}p}{k_{о.с.} k_y} + 1\right)] = 1/[k_{о.с.} (T_{б.}p + 1)]. \quad (3.11)$$

$$\text{Здесь } T_{б.} = T_{и.м.} / (k_{о.с.} k_y). \quad (3.12)$$

Из отношения (3.11) видно, что передаточная функция промышленного П-регулятора представлена последовательным соединением идеального П-регулятора с передаточной функцией

$$W_{\Pi}(p) = 1/k_{о.с.} = k_p \quad (3.13)$$

и некоторого балластного звена с передаточной функцией

$$W_{б.}(p) = 1/(T_{б.}p + 1). \quad (3.14)$$

Чем больше  $T_{б.}$ , тем большие искажения вносятся в П-закон промышленного П-регулятора. Из выражения (3.12) видно, что чем больше

$k_{о.с.}$ , тем меньшее влияние оказывает балластное звено на закон регулирования. Однако при этом коэффициент передачи регулятора уменьшается [см. отношение (3.13)], что нежелательно. Чтобы устранить подобный недостаток, в промышленных П-регуляторах часто предусматривается дополнительное усилительное устройство величины  $\epsilon$  рассогласования, которое не охватывается местной обратной связью. В данном случае коэффициент передачи регулятора

$$k_p = k_{\epsilon} \frac{1}{k_{о.с.}}, \quad (3.15)$$

где  $k_{\epsilon}$  — коэффициент передачи дополнительного усилительного устройства.

При такой структуре П-регулятора (рис. 3.4, б), изменяя  $k_{о.с.}$ , устанавливают требуемую точность реализации П-закона регулирования, а затем, изменяя  $k_{\epsilon}$  — требуемое значение  $k_p$ .

Предел пропорциональности или диапазон дросселирования (терминология заводов-изготовителей) — величина, обратная коэффициенту передачи регулятора, выраженная в процентах,

$$\delta = 100/k_p, \quad (3.16)$$

где  $\delta$  — диапазон дросселирования (предел пропорциональности).

Таким образом, коэффициент передачи  $k_p$ , градуируемый заводом-изготовителем в процентах предела пропорциональности, — единственный параметр настройки П-регулятора.

И-регулятор — это регулятор (астатический), для которого характерно то, что при отклонении регулируемого параметра объекта от уставки затвор РО будет перемещаться до тех пор, пока параметр снова не вернется к заданному значению. И-регуляторы бывают как непрерывного, так и прерывистого действия. У первых скорость перемещения затвора регулирующего органа пропорциональна отклонению регулируемого параметра от уставки:

$$d x_{ро} / dt = (1/T_1) \Delta y, \quad (3.17)$$

где  $T_1$  — постоянная времени регулятора (время, за которое затвор РО переместится из одного крайнего положения в другое при максимальном отклонении регулируемого параметра от заданного значения).

В динамическом отношении И-регулятор представляет собой интегрирующее звено с передаточной функцией

$$W_{И}(p) = 1/T_1 p = k_p / p, \quad (3.18)$$

где  $1/T_1 = k_p$  — коэффициент передачи регулятора, численно равный скорости перемещения РО (скорости разгона  $\epsilon_p$ ) при отклонении входной величины на единицу ее изменения.

При ступенчатом изменении выходного параметра объекта затвор РО будет перемещаться с постоянной скоростью до тех пор, пока есть отклонение от уставки. В зависимости от значения  $T_1$  скорость переме-

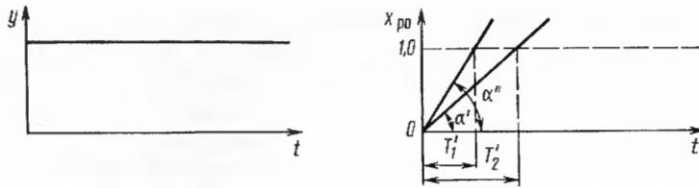


Рис. 3.5. Разгонная характеристика И-регулятора

щения затвора может быть различной (рис. 3.5), т. е.  $T_1$  – параметр настройки, принимаемый во внимание при выборе И-регулятора. К достоинству И-регулятора следует отнести его точность, а также возможность использования с объектами, в которых допускаются значительные колебания нагрузки. Недостаток И-регулятора заключается в замедленности действия. В этой связи его рекомендуется применять в объектах с самовыравниванием, небольшим запаздыванием и допускающих хоть и значительные, но в то же время плавные и редкие колебания нагрузки.

**ПИ-регулятор** представляет собой прибор, затвор регулирующего органа которого перемещается под воздействием уже двух составляющих: отклонения выходной величины объекта от уставки и интеграла по времени от этого отклонения:

$$x_{p.o} = k_p \Delta y + \frac{k_p}{T_{из}} \int_0^t \Delta y dt, \quad (3.19)$$

где  $T_{из}$  – время изодрома;  $k_p$  – коэффициент передачи регулятора.

Выражение (3.19) включает две составляющие: пропорциональную  $k_p \Delta y$ ;

интегральную  $\frac{k_p}{T_{из}} \int_0^t \Delta y dt$ .

Из отношения (3.19) можно легко получить передаточную функцию ПИ-регулятора. Для этого необходимо выражение сначала продифференцировать, а затем воспользоваться преобразованием Лапласа. В итоге

$$\frac{d x_{p.o}}{d t} = k_p \frac{d \Delta y}{d t} + \frac{k_p}{T_{из}} \Delta y, \quad (3.20)$$

$$W_{ПИ}(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_{из} p} \right). \quad (3.21)$$

В динамическом отношении ПИ-регулятор эквивалентен П- и И-регуляторам, соединенным параллельно (рис. 3.6, а):

$$W(p) = k_p + \frac{1}{T_1 p} = \frac{k_p T_1 p + 1}{T_1 p}. \quad (3.22)$$

Если  $k_p T_1 = T_{из}$ , то

$$W(p) = \frac{k_p T_1 p + 1}{T_1 p} = \frac{T_{из} p + 1}{T_{из} p / k_p} = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_{из} p} \right) = W_{ПИ}(p), \quad (3.23)$$

т. е. выражение (3.22) действительно эквивалентно выражению (3.23).

Из рисунка 3.6, б видно, что при скачкообразном изменении выходного параметра объекта в момент  $t_0$  затвор регулирующего органа под действием пропорциональной составляющей скачком перемещается на размер  $k_p \Delta y$  (отрезок АС), а затем под действием интегральной составляющей будет продолжать перемещаться в том же направлении (линия АВ<sub>1</sub> либо АВ<sub>2</sub>) с постоянной скоростью, которую принято называть скоростью изодрома, зависящей от значения времени изодрома  $T_{из}$  (времени удвоения).  $T_{из}$  – время, в течение которого затвор регулирующего органа под действием интегральной составляющей удвоит предварительное перемещение, полученное за счет действия пропорциональной составляющей.

Видно, что коэффициент передачи ПИ-регулятора и время изодрома – это параметры настройки, принимаемые во внимание при его выборе.

Промышленность выпускает ПИ-регуляторы по двум структурным схемам: в первой не используются интегрирующие свойства исполнительного механизма (рис. 3.7, а), во второй исполнительный механизм участвует в реализации закона регулирования (рис. 3.7, б). Для случая, показанного на рисунке 3.7, а, передаточная функция промышленного ПИ-регулятора будет иметь вид

$$W_{ПИ}(p) = \frac{k_y W_{и.м}(p)}{1 + k T p / (T p + 1)} = \frac{T p + 1}{k T p} \frac{k k_y W_{и.м}(p)}{T p + 1 + k k_y T p W_{и.м}(p)} = \frac{1}{k} \left( 1 + \frac{1}{T p} \right) W_б(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T p} \right) W_б(p), \quad (3.24)$$

где  $k_p = 1/k$  – коэффициент передачи регулятора;  $T = T_{из}$  – время изодрома;

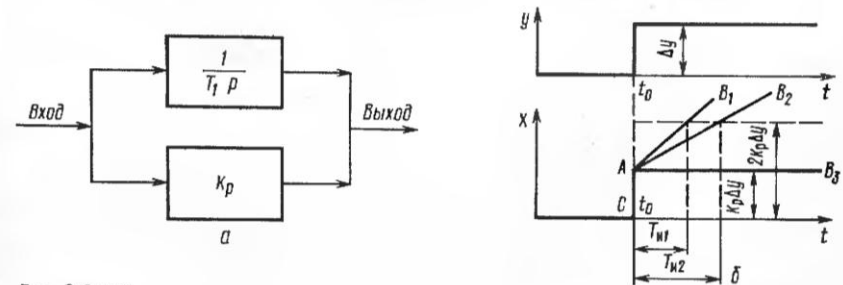


Рис. 3.6. ПИ-регулятор:

а – эквивалентная структурная схема; б – разгонная характеристика

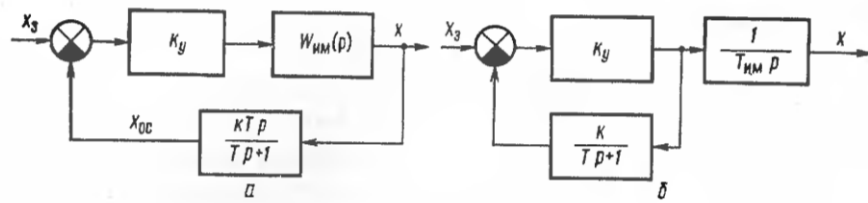


Рис. 3.7. Структурная схема ПИ-регулятора:

а — исполнительный механизм не участвует в формировании закона регулирования; б — интегрирующие свойства исполнительного механизма используются в формировании закона регулирования

$$W_б(p) = \frac{k k_y T p W_{и.м}(p)}{[k k_y W_{и.м}(p) + 1] T p + 1} \quad (3.25)$$

передаточная функция балластного звена.

Т. е. промышленный ПИ-регулятор реализует ПИ-закон с погрешностью, вносимой условным балластным звеном. Время изодрома при такой структурной схеме определяется постоянной времени звена обратной связи.

Если  $k_y \gg 1$ , то  $W_б(p) \approx 1$  и регулятор достаточно точно реализует ПИ-закон регулирования.

В общем случае в качестве исполнительного механизма можно использовать либо усилитель, либо электрический двигатель. Погрешность, вносимая при этом балластным устройством, будет различной. Кроме того, она будет зависеть и от структурной схемы регулятора. Рассмотрим это подробнее.

1. Структурная схема ПИ-регулятора в соответствии с рисунком 3.7, а.

$$W_{и.м}(p) = k_{и.м}.$$

В этом случае передаточная функция балластного звена

$$W_б(p) = \frac{k_б T_б p}{T_б p + 1}, \quad (3.26)$$

$$\text{где } k_б = \frac{k k_y k_{и.м}}{k_y k k_{и.м} + 1}, \quad (3.27)$$

$$T_б = T (k_y k k_{и.м} + 1). \quad (3.28)$$

2. Та же структурная схема

$$W_{и.м}(p) = 1 / T_{и.м} p.$$

При этом погрешность в ПИ-закон регулирования будет вноситься балластным звеном с передаточной функцией

$$W_б(p) = k_б / (T_б p + 1), \quad (3.29)$$

$$\text{где } k_б = k_y k T_{и.м} / (k_y k T + T_{и.м}); \quad (3.30)$$

$$T_б = T T_{и.м} / (k_y k T + T_{и.м}). \quad (3.31)$$

3. Структурная схема ПИ-регулятора в соответствии с рисунком 3.7, б.

В этом случае балластное звено, которое искажает ПИ-закон регулирования, может быть представлено в виде выражения (3.29), однако

$$k_б = k_y k / (k_y k + 1), \quad (3.32)$$

$$T_б = T / (k_y k + 1). \quad (3.33)$$

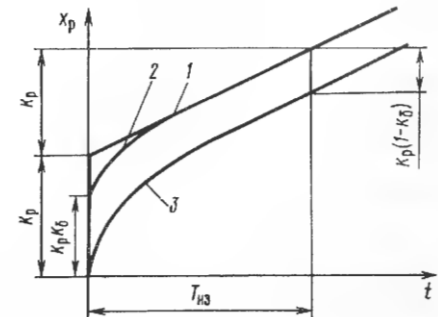
Параметры ПИ-регулятора для данной структурной схемы могут быть найдены и следующим образом:

$$k_p = T / (k T_{и.м}), \quad T = T_{и.с}. \quad (3.34)$$

Из разгонных характеристик для промышленного ПИ-регулятора (рис. 3.8) видно, что его кривая разгона соответствует кривой разгона идеального ПИ-регулятора, если  $k_y \gg 1$  (т. е. коэффициент передачи усилителя в прямом канале структурной схемы регулятора должен быть очень большим). Во всех остальных случаях в закон регулирования вносится погрешность условным балластным звеном. Эта погрешность максимальная, если в качестве исполнительного механизма используют электродвигательный с передаточной функцией  $W_{и.м}(p) = 1 / T_{и.м} p$  (кривая 3). Если же в качестве исполнительного механизма применяют усилитель с передаточной функцией  $W_{и.м}(p) = k_{и.м}$ , а сам регулятор выполнен по структурной схеме, изображенной на рисунке 3.7, а, то кривая разгона идентична кривой 2, показанной на рисунке 3.8. Следует подчеркнуть, что кривые разгона промышленного ПИ-регулятора приведены для случая, когда на его вход подается единичный скачок.

Рис. 3.8. Разгонная характеристика ПИ-регулятора:

1 —  $k_y \gg 1$ ; 2 — исполнительный механизм имеет передаточную функцию  $W_{и.м}(p) = k_{и.м}$  и не участвует в формировании закона регулирования (структурная схема рис. 3.7, а); 3 — регулятор выполнен по структурной схеме рисунка 3.7, б (или по структурной схеме рис. 3.7, в с исполнительным механизмом  $W_{и.м}(p) = 1 / T_{и.м}(p)$ )



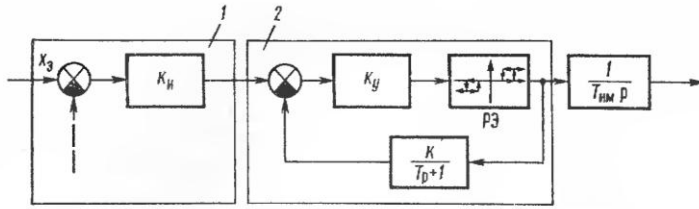


Рис. 3.9. Структурная схема ПИ-регулятора с релейным элементом (РЭ) в прямом канале усиления (пунктиром показана главная обратная связь):

1 и 2 — измерительный и регулирующий блоки

Большинство ПИ-регуляторов выпускают в соответствии со структурной схемой, данной на рисунке 3.7, б (например, Р25, РПИБ и др.). В качестве исполнительных механизмов в них используют электродвигатели с постоянной частотой вращения вала. Выход усилителей в прямом канале — релейный. Подобные приборы состоят, как правило, из измерительного и регулирующего блоков (субблоков) (рис. 3.9). Местная обратная связь, влияющая на формирование закона регулирования, состоит из  $R-C$  цепочек (РПИБ), которые дополняются местными усилителями (Р25). Приборы работают в импульсном режиме. Длительность импульсов и пауз регулирования позволяет корректировать точность реализации ПИ-закона.

ПИ-регуляторы можно применять для объектов как с самовыравниванием, так и без него в тех случаях, когда необходима высокая точность регулирования при больших, но плавных изменениях нагрузки.

ПД-регуляторы часто называют П-регуляторами с дополнительным воздействием по производной от отклонения выходного воздействия объекта (статические регуляторы с предварением). Закон регулирования для них может быть представлен как

$$x_{p.o} = k_p \Delta y + T_n \frac{d\Delta y}{dt} k_p, \quad (3.35)$$

где  $T_n$  — время предварения, характеризующее степень влияния дифференциальной составляющей выражения (3.35) на перемещение затвора регулирующего органа.

Следует отметить, что и  $k_p$  и  $T_n$  — это параметры, по которым выбирают ПД-регулятор. В динамическом отношении ПД-регулятор представляет собой последовательное соединение двух звеньев — пропорционального и дифференцирующего:

$$W(p) = k_p (T_n p + 1). \quad (3.36)$$

Из разгонной характеристики ПД-регулятора (рис. 3.10, а) видно, что в момент времени  $t_0$  происходит скачок регулирующего органа, который затем устанавливается в положение, определяемое пропор-

циональной составляющей выражения (3.35), т. е. значением  $k_p$ . Для реального ПД-регулятора переходный процесс заканчивается по кривой, показанной на рисунке штриховой линией, что указывает на наличие не идеального, а реального дифференцирующего звена. Время предварения в этом случае определяют при помощи касательной. На практике время предварения ПД-регулятора находят несколько иначе (рис. 3.10, б). На вход регулятора подают не скачок, а непрерывно возрастающий сигнал. При этом благодаря дифференциальной составляющей регулирующей орган совершает скачок, а затем продолжает двигаться в том же направлении за счет пропорциональной составляющей. Время предварения определяют как разность между одними и теми же значениями  $x_{p.o}$  при наличии предварения (линия 1) и без него (линия 2).

ПД-регуляторы могут иметь либо прямое, либо обратное предварение, т. е. сигнал на выходе регулятора может соответственно либо опережать, либо отставать от входного. ПД-регуляторы промышленности выпускают в виде специальных приставок, предназначенных для уменьшения колебаний и ускорения затуханий переходных процессов в САУ. Для объектов с большой постоянной времени рекомендуется применять блоки с прямым предварением, а для объектов с малой постоянной времени — с обратным.

ПИД-регулятор воздействует на затвор регулирующего органа за счет пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих

$$x_{p.o} = k_p \left( \Delta y + \frac{1}{T_{ис}} \int \Delta y dt + T_n \frac{d\Delta y}{dt} \right). \quad (3.37)$$

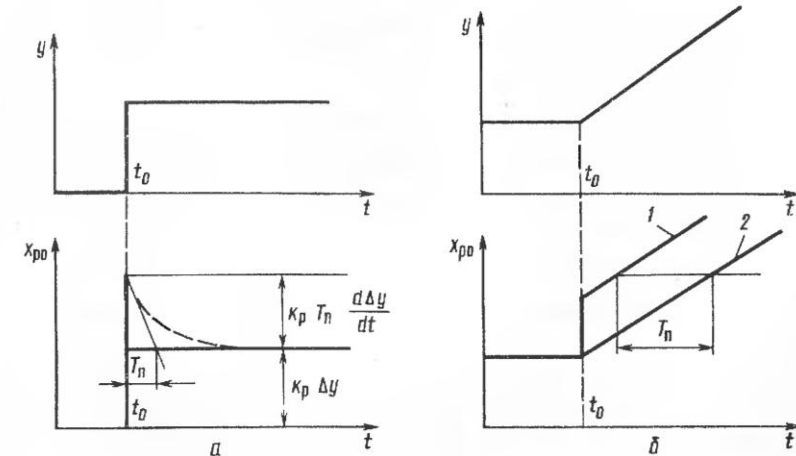


Рис. 3.10. Динамическая характеристика ПД-регулятора:

а — кривые разгона; б — графический способ определения времени предварения (1 и 2 — с учетом и без учета дифференциальной составляющей)

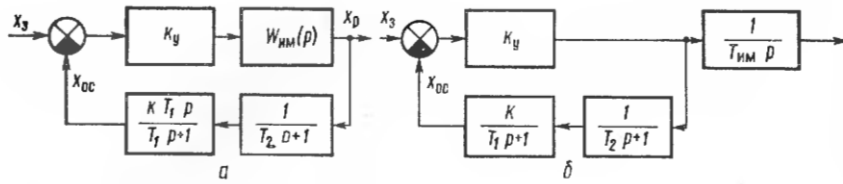


Рис. 3.11. Структурные схемы ПИД-регулятора:

а – исполнительный механизм не участвует в формировании закона регулирования; б – интегрирующие свойства исполнительного механизма используются для формирования закона регулирования

Знак « + » или « - » указывает на то, что предварение может быть прямым и обратным.

Передаточная функция ПИД-регулятора может быть получена после дифференцирования выражения (3.37) с последующим преобразованием его по Лапласу

$$W_{\text{ПИД}}(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{инт}} p} + T_n p \right). \quad (3.38)$$

Учитывая, что ПИД-закон регулирования формируется обратной связью, ее передаточная функция

$$W_{\text{ос}}(p) = 1 / W_{\text{ПИД}}(p) = 1 / \left[ k_p \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{инт}} p} + T_n p \right) \right] = (1 / k_p) T_{\text{инт}} p / (T_{\text{инт}} T_n p^2 + T_{\text{инт}} p + 1). \quad (3.39)$$

Если знаменатель выражения (3.39) разложить на множители, то

$$W_{\text{ос}}(p) = k T_1 p / [(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)], \quad (3.40)$$

где  $k$  – коэффициент передачи звена обратной связи;  $T_1, T_2$  – его постоянные времени.

Таким образом, для реализации ПИД-закона регулирования в обратную связь необходимо включить реальное дифференцирующее звено с передаточной функцией

$$W_d(p) = k T_1 p / (T_1 p + 1) \quad (3.41)$$

и апериодическое звено первого порядка с передаточной функцией

$$W_a(p) = 1 / (T_2 p + 1). \quad (3.42)$$

Из рисунка 3.11, а видно, что при этом исполнительный механизм не участвует в формировании ПИД-закона регулирования. Параметры, на основании которых выбирают регулятор, можно определить из следующих соотношений:

$$k_p = (T_2 + T_1) / k T_1; T_{\text{инт}} = T_1 + T_2; T_n = T_1 T_2 / (T_1 + T_2). \quad (3.43)$$

Наиболее распространены ПИД-регуляторы, у которых при формировании закона регулирования используются интегрирующие свойства исполнительного механизма (рис. 3.11, б). Если  $k_y \gg 1$ , то передаточную функцию регулятора при такой структурной схеме определяют выражением (3.39), а параметры его настройки вычисляют следующим образом:

$$k_p = (T_1 + T_2) / k T_{\text{инт}}; T_{\text{инт}} = T_1 + T_2; T_n = T_1 T_2 / (T_1 + T_2). \quad (3.44)$$

В проектах автоматизации ПИД-закон очень часто реализуется ПИ-регуляторами с вводом дифференциальной составляющей в закон регулирования от дифференциаторов типа ДЛ-Т или ДЛ-П. Передаточная функция такого устройства

$$W_{\text{ПИ+Д}}(p) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{инт}} p} \right) + k_d \frac{T_d p}{T_d p + 1}, \quad (3.45)$$

где  $k_d, T_d$  – коэффициент передачи и постоянная времени дифференциатора.

На рисунке 3.12 показана разгонная характеристика составного регулятора, когда в качестве исполнительного механизма используют электродвигатель с постоянной частотой вращения и на вход регулятора подается воздействие в виде единичной ступеньки. Настраиваемые параметры регулятора могут быть получены, если из кривой разгона вычтеть интегральную составляющую 2. В итоге найдем составляющую ПИД-закона регулирования (кривая 3).

ПИД-регуляторы рекомендуется применять на объектах, не допус-

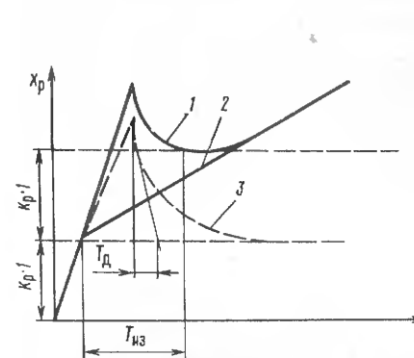


Рис. 3.12. Разгонная характеристика ПИД-регулятора

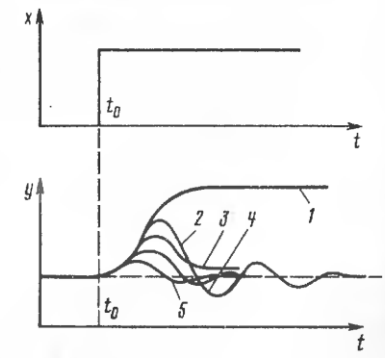


Рис. 3.13 Кривые переходных процессов в САУ:

1 – при отсутствии регулятора; 2, 3, 4 и 5 – при подключении к объекту соответственно И-, П-, ПИ- и ПИД-регулятора

кающих статической неравномерности, у которых нагрузка меняется часто и резко и наблюдается значительное запаздывание.

Таким образом, рассмотрены основные динамические характеристики регуляторов, реализующих непрерывный закон. Для сравнения на рисунке 3.13 приведены кривые переходных процессов в САУ при условии поочередного подключения к одному и тому же объекту описанных регуляторов для компенсации одинакового возмущения. Как видно, лучшие результаты дают ПИ- и ПИД-регуляторы.

Справочные материалы о регуляторах, реализующих непрерывный закон регулирования, приведены в таблицах 1 и 2 приложения.

В сельскохозяйственном производстве различные объекты управления существенно отличаются своими динамическими свойствами. Очевидно, что для каждого из них наилучшим будет лишь какой-то вполне конкретный закон регулирования, а следовательно, и тип регулятора. В этой связи рассмотрим методику выбора закона регулирования.

### 3.2.1.1. УПРОЩЕННАЯ МЕТОДИКА ВЫБОРА ЗАКОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Известно, что переходный процесс в САУ характеризуется временем  $t_p$  регулирования, перерегулированием  $\sigma$ , максимальным динамическим отклонением  $y_1$ , статической ошибкой  $y_{ст}$ . Реализацией различных законов регулирования для одного и того же объекта не удается добиться одновременной минимизации всех названных показателей. В этой связи САУ принято настраивать на один из трех типовых переходных процессов: апериодический, с 20 %-ным перерегулированием и минимальным интегральным критерием (рис. 3.14). Каждый из них подходит лишь для определенных объектов и характеризуется:

первый – максимальным динамическим отклонением, отсутствием перерегулирования, незначительным временем регулирования;

второй – наличием существенного перерегулирования, сравнительно небольшим временем регулирования, незначительным динамическим отклонением;

третий – существенным временем регулирования, большим перерегулированием, наименьшим динамическим отклонением.

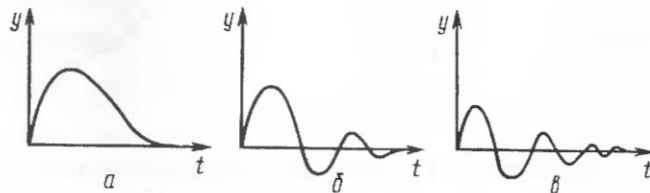


Рис. 3.14. Типовые переходные процессы:

а – апериодический; б – с 20 %-ным перерегулированием; в – с минимальным интегральным критерием

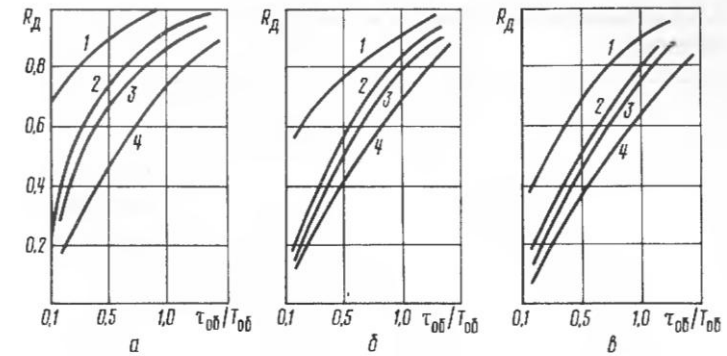


Рис. 3.15. Графические зависимости для определения закона регулирования:

а – для апериодического переходного процесса; б и в – для переходного процесса с 20 %-ным перерегулированием и минимальным интегральным критерием; 1, 2, 3 и 4 – соответственно И-, П-, ПИ- и ПИД-регулятор

Методика выбора наилучшего закона регулирования для конкретного объекта заключается в определении динамического коэффициента  $R_d$  регулирования. Для статических объектов

$$R_d = y_1 / (k_{об} y_B), \quad (3.46)$$

где  $k_{об}$  – коэффициент передачи объекта;  $y_B$  – максимально возможное возмущение по нагрузке (обычно выражают в процентах хода регулирующего органа).

Затем (если объект статический) для определения закона регулирования необходимо воспользоваться одной из графических зависимостей, изображенных на рисунке 3.15. Следует помнить, что время чистого запаздывания и постоянную времени объекта определяют графическим методом (см. раздел 2.2.1.2) вне зависимости от того, на каком расстоянии от оси абсцисс располагается ордината точки перегиба нормированной кривой разгона.

Для астатических объектов

$$R_d = y_1 / (\epsilon_{об} \tau_{об} y_B), \quad (3.47)$$

где  $\epsilon_{об}$  – скорость разгона ( $\epsilon_{об} = 1 / T_a$ );  $T_a$  – время разгона;  $\tau_{об}$  – время чистого запаздывания.

Параметры астатического объекта определяют графическим методом по кривым разгона.

Закон регулирования для астатического объекта может быть найден по таблице 3.2.

После выбора закона регулирования проверяют, будет ли при этом обеспечиваться необходимое время регулирования, которое определяется технологическими нормами. Для этого нужно воспользоваться выражением

### 3.2. Динамические коэффициенты регулирования для астатических объектов

Закон регулирования	$R_d$ типового переходного процесса регулирования		
	апериодического	с 20 %-ным перерегулированием	с минимальным интегральным критерием

П	2,9	1,4	—
ПИ	1,4	1,3	0,9
ПИД	1,3	1,1	0,8

$$t_p = \psi \tau_{об} \quad (3.48)$$

где  $\psi$  — относительное время регулирования, которое можно выбрать по таблице 3.3.

Для И-закона регулирования относительное время для статических объектов (И-регуляторы для астатических объектов не применяют, так как в этом случае получается структурно-неустойчивая САУ) может быть найдено при помощи графических зависимостей (рис. 3.16).

### 3.3. Относительное время регулирования

Закон регулирования	Объект	$\psi$ типового переходного процесса		
		апериодического	с 20 %-ным перерегулированием	с минимальным интегральным критерием

П	Статический	4,5	6,5	9,0
	Астатический	6,0	8,0	—
ПИ	Статический	8,0	12,0	16,0
	Астатический	14,0	16,0	18,0
ПИД	Статический	5,5	7,0	10,0
	Астатический	9,0	12,0	13,0

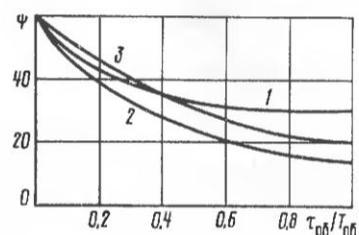


Рис. 3.16. Относительное время регулирования для И-закона (статических объектов):

1 — апериодический процесс; 2 и 3 — процессы соответственно с 20 %-ным перерегулированием и минимальным интегральным критерием

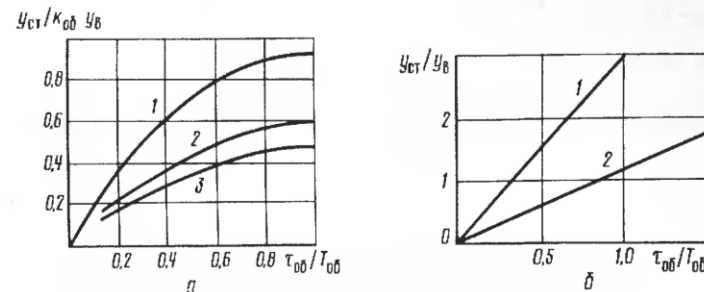


Рис. 3.17. Определение статической ошибки для типовых переходных процессов:

$a$  и  $b$  — статических и астатических объектов; 1 — апериодический; 2 — с 20 %-ным перерегулированием; 3 — с минимальным интегральным критерием

Если для рассматриваемого объекта П-закон регулирования — наилучший, то в этом случае необходимо определить статическую ошибку и сопоставить ее с допустимой. В общем случае

$$y_{ст} = y_B \frac{k_{об}}{1 + k_{об} k_p} \quad (3.49)$$

где  $k_p$  — коэффициент передачи регулятора.

Поскольку переходный процесс в САУ настраивается на один из типовых, то сам процесс вычисления  $y_{ст}$  упрощается (можно воспользоваться графическими зависимостями на рисунке 3.17). Если статическая ошибка превышает допустимую, то в этом случае вместо П-выбирают ПИ-закон, а затем снова проверяют время регулирования и т. д.

**Пример 3.1.** Для объекта с  $k_{об} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} / \% \text{ рег. орг.}$ ;  $\tau_{об} = 80 \text{ с}$ ;  $T_{об} = 266 \text{ с}$  заданы следующие показатели переходного процесса: максимальное динамическое отклонение  $y_1 = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; статическая ошибка  $y_{ст} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ; время регулирования  $t_n = 500 \text{ с}$ ; перерегулирование по возмущению  $\sigma = 0,3$ ; максимальное возмущение по нагрузке  $y_B = 40 \text{ } \%$ .

Находим динамический коэффициент регулирования для статических объектов

$$R_d = y_1 / k_{об} y_B = 5 / 0,2 \cdot 40 = 0,625.$$

Выбираем два типовых переходных процесса: апериодический и с минимальным интегральным критерием. В соответствии с рисунком 3.15,  $a$  устанавливаем, что апериодический процесс обеспечивает П-регулятор (П-закон), а с минимальным интегральным критерием — И-закон (см. рис. 3.15,  $e$ ).

Проверим, обеспечивают ли выбранные законы заданное время регулирования. Для этого рассчитываем относительное время регулирования:

$$\psi_{П} = 4,5 \text{ (по табл. 3.2);}$$

$$\psi_{И} = 35 \text{ (по рис. 3.16);}$$



$$t_{р,П} = \psi_{П} \tau_{об} = 4,5 \cdot 80 = 360 \text{ с};$$

$$t_{р,И} = \psi_{И} \tau_{об} = 35 \cdot 80 = 2800 \text{ с}.$$

Видим, что заданное время регулирования обеспечивает П-закон. В этой связи необходимо определить статическую ошибку. По рисунку 3.17, а находим, что

$$\frac{y_{ст}}{k_{об} y_{в}} = 0,57; y_{ст} = 0,2 \cdot 40 \cdot 0,57 = 4,56 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Так как рассчитанная статическая ошибка больше допустимой, то выбираем ПИ-закон регулирования, для которого статическая ошибка равна нулю. Проверим, сможет ли ПИ-закон обеспечить требуемое время регулирования. По таблице 3.2 находим  $\psi_{ПИ} = 8$ . Следовательно,

$$t_{р,ПИ} = \psi_{ПИ} \tau_{об} = 8 \cdot 80 = 640 \text{ с}.$$

ПИ-закон не обеспечивает необходимое время регулирования. Выбираем ПИД-закон. Для него  $\psi_{ПИД} = 5,5$  (табл. 3.2).

$$t_{р,ПИД} = \psi_{ПИД} \tau_{об} = 5,5 \cdot 80 = 440 \text{ с}.$$

ПИД-закон обеспечивает заданное время регулирования. Поэтому считаем, что для данного объекта необходимо рекомендовать ПИД-регулятор.