

# ПИД-регулятор. Корректирующие фильтры (устройства) в системах автоматического регулирования

## Нуруллин Р. Ю.

Нуруллин Роман Юрьевич / Nurullin Roman Yurievich, - студент,  
кафедра систем автоматического управления и контроля,  
факультет интеллектуальных технических систем,  
Национальный исследовательский университет,  
Московский институт электронной техники, г. Зеленоград

**Аннотация:** в статье будут рассмотрены устройство ПИД-регулятора, переходные и частотные характеристики при некоторых значениях, а также математический аппарат данного регулятора для вычисления его передаточной функции. Также рассмотрим некоторые сведения о корректирующих устройствах в системах автоматического регулирования и принципах их включения в цепь.

**Ключевые слова:** ПИД-регулятор, передаточная функция, корректирующие устройства, корректирующие фильтры.

ПИД-регулятор.

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор — устройство регулирования сигнала в управляющем контуре с наличием обратной связи. Используется в системах автоматического регулирования для формирования управляющего сигнала с целью получения нужной точности переходного процесса. ПИД-регулятор формирует управляющее воздействие, которое является суммой выходных значений сигналов трёх звеньев, первое из которых пропорционально разности заданного входного значения сигнала и сигнала обратной связи (пропорциональное звено), второе — интеграл значения ошибки регулирования, третье — производная значения ошибки регулирования. Если какие-то из этих трех звеньев не функционируют, то регулятор называют пропорционально-интегрирующим, пропорционально-дифференцирующим, пропорциональным, интегрирующим и т. д. Простейшая структурная схема ПИД-регулятора изображена на рис. 1:

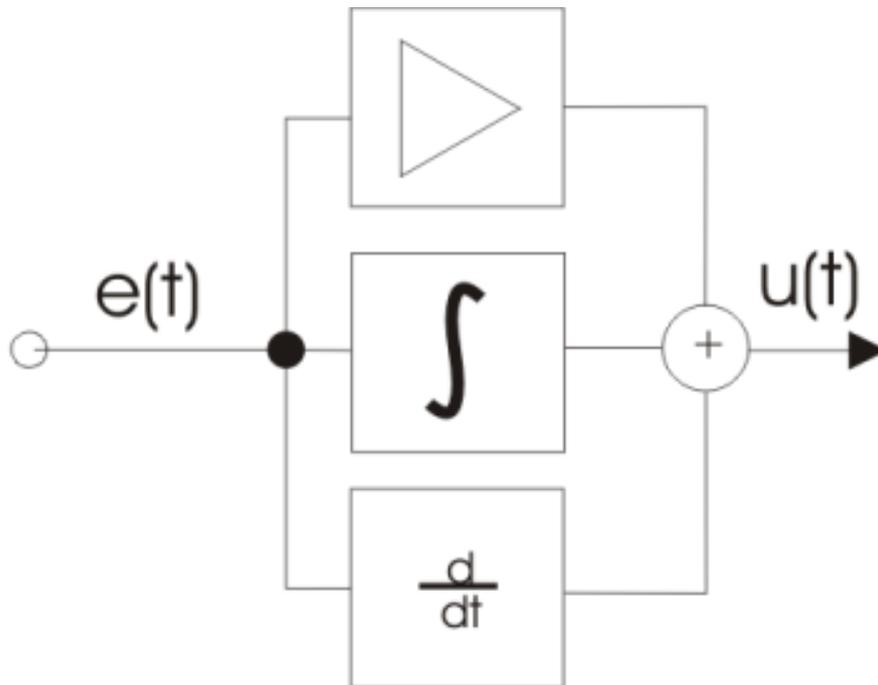


Рис. 1. Структурная схема ПИД-регулятора

Выходной сигнал ПИД-регулятора вычисляется по формуле:

$$U(t) = P + I + D = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

где:

- $U(t)$  – функция, выходной сигнал с ПИД-регулятора.
- $P$  – пропорциональное звено системы,
- $I$  – интегральное звено системы,
- $D$  – дифференциальное звено системы,
- $e(t)$  – текущая ошибка регулирования,

- $K_p$  – коэффициент пропорциональности (безразмерный),
- $T_i$  – постоянная интегрирования (разность времени),
- $T_d$  – дифференциальная постоянная [4].

ПИД-регулятор получают при помощи добавления дифференцирующего звена к ПИ-регулятору (объединенных пропорционального и интегрального звеньев). Поэтому на ПИД-регулятор переносятся все свойства ПИ-регулятора и добавляются новые. Дифференцирующее звено вносит положительный фазовый сдвиг до  $90^\circ$ , но только на частотах, которые выше  $\frac{K_p}{T_d}$ . Это позволяет привести систему к устойчивости и улучшить качество регулирования системы в случаях, когда это невозможно сделать с помощью ПИ-регулятора.

На рис. 2 показано влияние дифференциальной постоянной на отклик замкнутой системы на скачок  $r(t)$ :

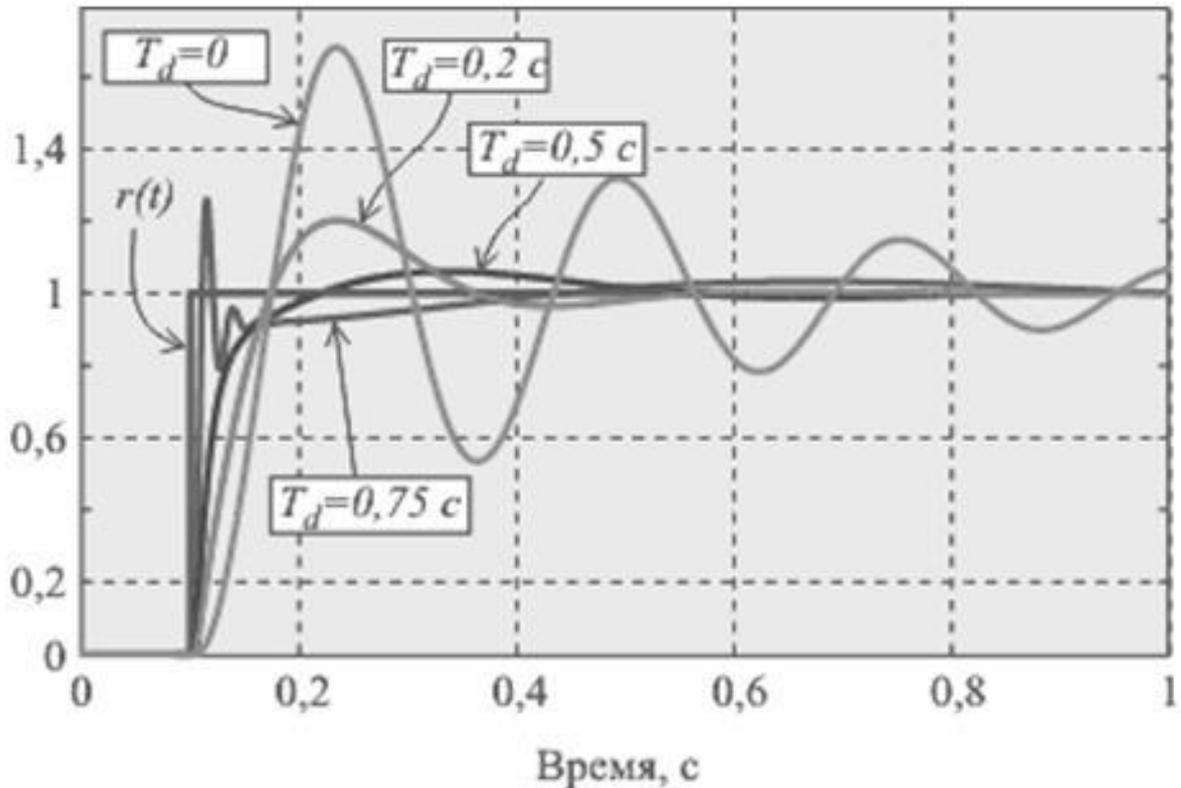


Рис. 2. Реакция замкнутой системы с ПИД-регулятором на скачок  $r(t)$  при  $T_i = 0,015$  с,  $K = 6$  при  $T = 0,1$  с.

Уменьшение амплитуды колебаний и увеличение коэффициента затухания при росте дифференциальной постоянной  $T_d$  объясняется тем, что благодаря положительному крену АЧХ, изображенному на рис. 3, в области  $\omega > \frac{K_p}{T_d}$  уменьшается сдвиг фаз в контуре регулирования:

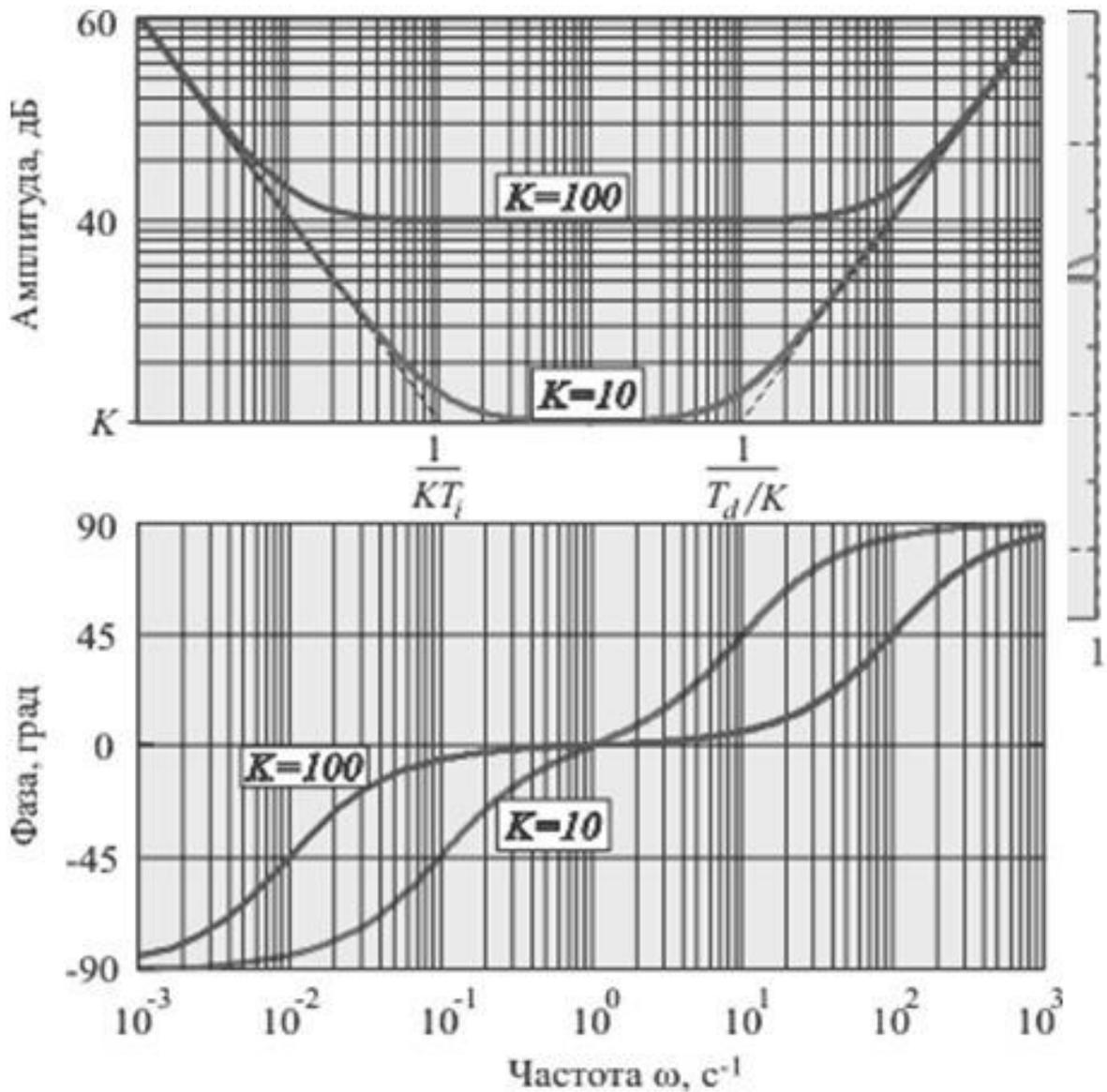


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика и фазово частотная характеристика ПИД-регулятора при  $T_i = 1 \text{ с}$ ,  $T_d = 1 \text{ с}$ ,  $K_p = 10$ ,  $K_p = 100$

Последующее увеличение постоянной дифференцирования (т.е. снижение частоты  $\omega = \frac{K_p}{T_d}$ ) приводит к росту усиления регулятора на высоких частотах, при  $\omega > \frac{K_p}{T_d}$ , как показано на рис. 3. Так как сдвиг по фазе  $\varphi = \omega T_d$  неограниченно растет при увеличении частоты, то при росте усиления, в связи с увеличением  $T_d$ , наступит момент, когда петлевое усиление системы на частоте сдвига по фазе  $180^\circ$  будет больше единицы, при этом на переходной характеристике замкнутой системы регулирования сначала появляются затухающие колебания ( $T_d = 0,75 \text{ с}$ ), затем, при последующем увеличении  $T_d$ , система переходит режим колебаний [3].

#### Корректирующие фильтры (устройства)

Каждое устройство, включаемое в систему регулирования для изменения ее свойств для обеспечения заданных показателей качества, можно рассматривать как корректирующее. По способу подключения корректирующие устройства или корректирующие фильтры делятся на последовательные, параллельные, встречно-параллельные (локальные обратные связи), которые изображены на рис. 4а, 4б, 4в:

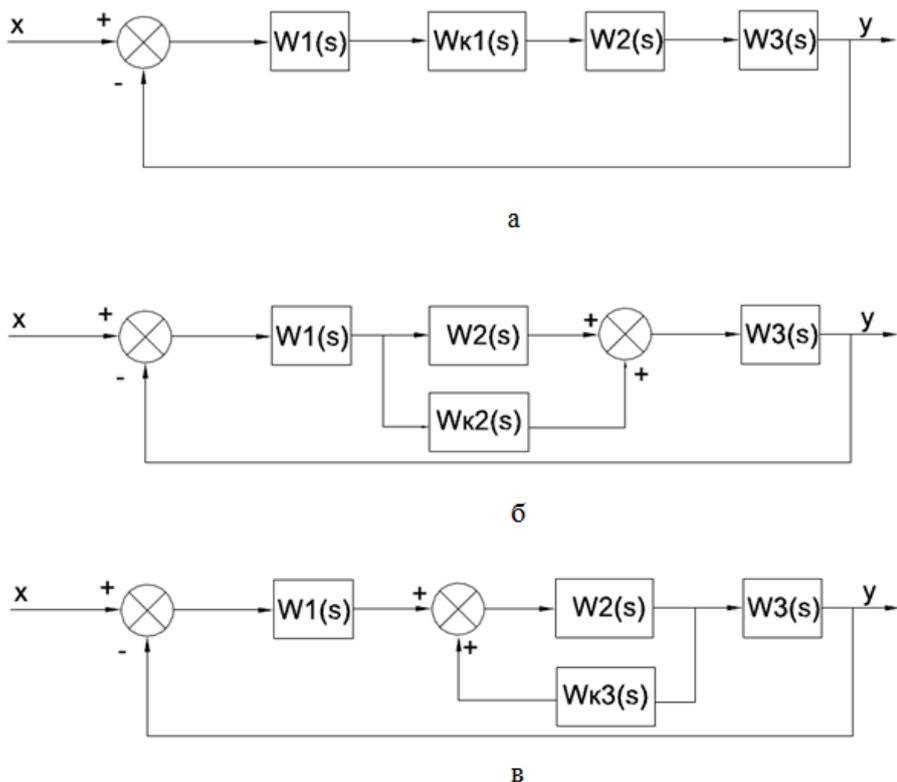


Рис. 4. Способы включения корректирующих фильтров (устройств) в систему автоматического регулирования [2]

Обозначим передаточную функцию последовательного корректирующего фильтра  $W(p)_{K1}$ , параллельного  $W(p)_{K2}$  и встречно-параллельного  $W(p)_{K3}$ .

При отсутствии корректирующего фильтра в системе передаточная функция разомкнутой системы будет равна:

$$W(p)_o = W(p)_{K1} \cdot W(p)_{K2} \cdot W(p)_{K3}. \quad (2)$$

Подключение корректирующего фильтра видоизменяет передаточную функцию общей цепи, которая соответственно для рис. 7а, 7б, 7в будет иметь следующий вид:

$$W(p) = W(p)_1 \cdot W(p)_2 \cdot W(p)_3 \cdot W(p)_{K1}, \quad (3)$$

$$W(p) = W(p)_1 \cdot (W(p)_2 \cdot W(p)_{K2}) \cdot W(p)_3, \quad (4)$$

$$W(p) = \frac{W(p)_1 \cdot W(p)_2 \cdot W(p)_3}{1 + W(p)_2 \cdot W(p)_{K3}}. \quad (5)$$

Отметим, что передаточная функция скорректированной системы зависит не только от значения передаточной функции корректирующего фильтра  $W(p)_{K1}$ , но и от положения корректирующих звеньев  $W(p)_{K2}$ ,  $W(p)_{K3}$  в цепи.

Изображенные на рис. 4 способы подключения корректирующих фильтров (устройств) изменяют передаточную функцию полной цепи, никак не влияя на принципы регулирования системы.

Корректирующим фильтром может служить любое устройство, которое способно реализовать требуемую передаточную функцию устройства. В электромеханических системах в качестве корректирующих фильтров чаще всего используют пассивные или активные четырехполюсники. Их используют в тех системах автоматического регулирования, в которых регулируемый сигнал – это напряжение постоянного тока [1].

### Литература

- [Электронный ресурс]: Хелпикс.Орг – Интернет помощник. URL: <http://helpiks.org/2-48543.html> (дата обращения 16.05.2016).
- Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов, А. А. Воронова и др.; Под ред. А. А. Воронова.—2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 367 с.
- [Электронный ресурс]: Энциклопедия АСУ ТП. URL: [http://www.bookasutp.ru/Chapter5\\_2.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter5_2.aspx) (дата обращения 16.05.2016).
- [Электронный ресурс]: Википедия – свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%94->

%D1%80%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80 (дата обращения  
16.05.2016)