

Лекция

**Замкнутые системы
автоматического управления
регулируемыми
электроприводами**

Вопросы:

1. Способы автоматического регулирования координат и их основные показатели.

2. Типовые законы регулирования координат и их реализация.

- пропорциональные (П-регуляторы)**
- пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы)**
- пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы)**

3. Замкнутые схемы управления электроприводами с двигателями постоянного тока по скорости

4. Замкнутые электропривода с подчиненным регулированием координат

5. Замкнутый электропривод с частотным управлением асинхронного двигателя

6. Замкнутая схема импульсного регулирования скорости асинхронного двигателя с помощью резистора в цепи ротора

1. Способы автоматического регулирования координат и их основные показатели.

Электропривод предназначен для приведения в движение рабочих машин и механизмов и управления этим движением. Наиболее характерными регулируемыми координатами электропривода являются *скорость, момент (ток) и положение*.

Способы регулирования координат в разомкнутых системах достаточно простые, но точность регулирования их ограничена. Поэтому там, где необходимо обеспечить требуемую точность поддержания регулируемой величины, применяют замкнутые системы регулирования.

Известны три способа автоматического регулирования координат:

- 1) регулирование по отклонению координаты от заданного значения с помощью отрицательной обратной связи по регулируемой величине;
- 2) регулирование по возмущению, где с помощью положительной обратной связи компенсируется влияние возмущения на регулируемую величину;
- 3) комбинированное регулирование координат.

В электроприводе применяется в основном *регулирование по отклонению*, поскольку при этом можно обеспечить требуемую точность независимо от характера возмущения. Находит также применение и *комбинированное регулирование*, в котором сочетается регулирование по отклонению с регулированием по возмущению.

Для оценки свойств регулируемого электропривода вводится ряд показателей: *точность, диапазон, плавность, динамические показатели, экономичность, допустимая нагрузка.*

Точность регулирования оценивается отношением наибольшего отклонения ΔX_{\max} регулируемой величины к ее среднему значению $X_{\text{ср}}$ при данном изменении возмущения F (рис.1).

$$\delta_x = \frac{\Delta X_{\max}}{X_{\text{ср}}} = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{X_{\max} + X_{\min}}$$

Для замкнутых систем регулирования точность оценивается как отношение абсолютной величины разности между заданным X_3 и текущим X значениями регулируемой величины к ее заданному значению:

$$\delta_x = \frac{|X_3 - X|}{X_3}$$

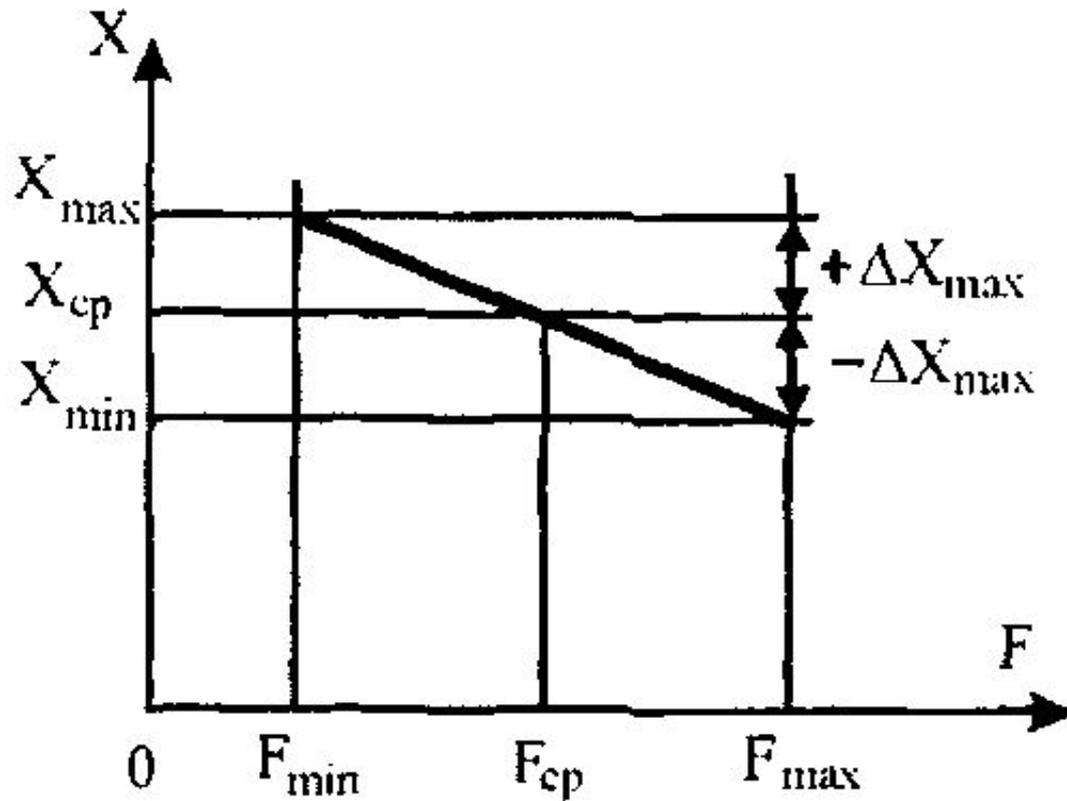


Рисунок 1 – Изменение регулируемой величины X при изменении возмущения F .

Диапазон регулирования D

$$D = \frac{X_{cp.max}}{X_{cp.min}}$$

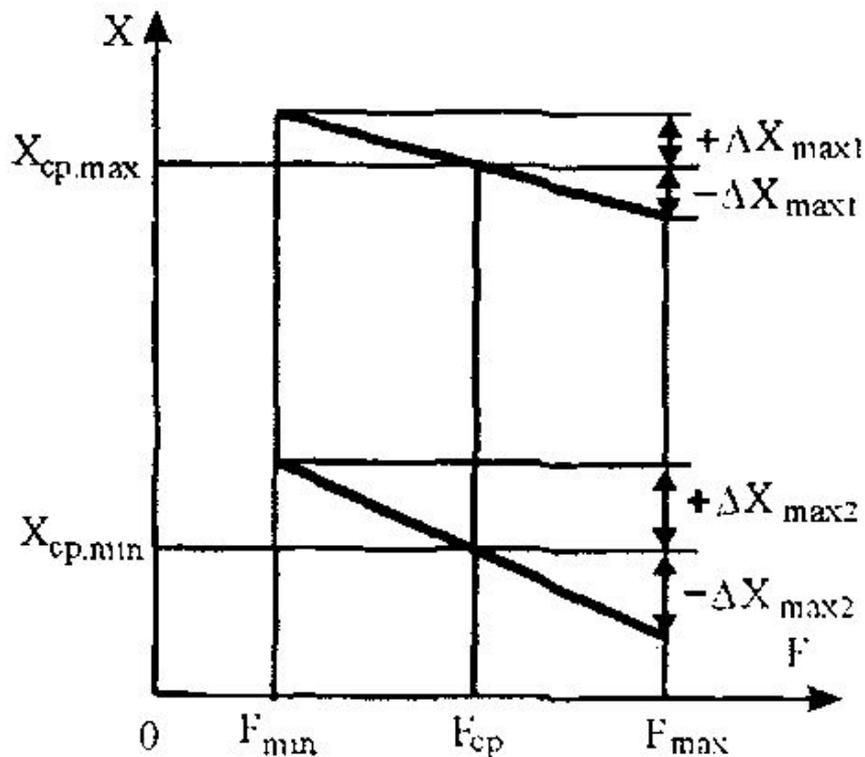


Рисунок 2 - Диапазон регулирования величины X при изменении возмущения F .

Плавность регулирования оценивается **коэффициентом плавности**

$$K_{пл} = \frac{X_i}{X_i - X_{i-1}} = \frac{X_i}{\Delta X_i}$$

Динамические показатели:

а) **быстродействие** определяет быстроту реакции электропривода на управляющее воздействие. Быстродействие оценивается по времени пуска и торможения электропривода:

б) **время регулирования** (t_p - это время, за которое регулируемая величина X первый раз достигает установившегося значения $X_{уст}$)

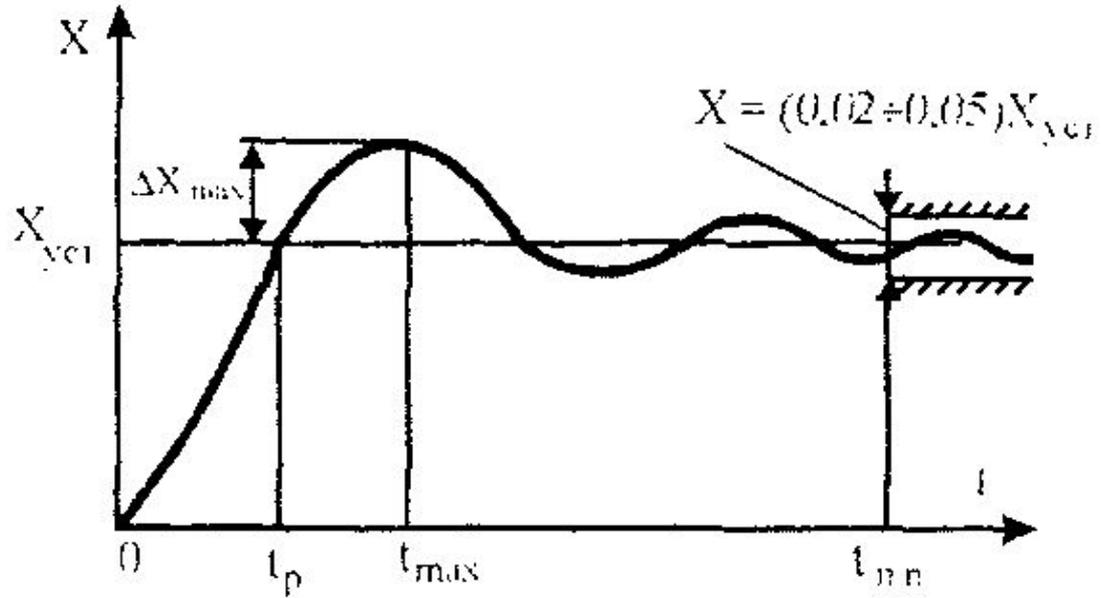


Рисунок 3 – Кривая переходного процесса электропривода

в) перерегулирование представляет собой динамическую ошибку и определяется как относительная величина максимального отклонения

$$\sigma_{max} = \frac{\Delta X_{max}}{X_{уст}}$$

г) колебательность оценивается числом колебаний N_{Σ} за время переходного процесса

Экономичность регулирования оценивается технико-экономическими расчетами, учитывающими капитальные затраты на реализацию данного способа регулирования, эксплуатационные расходы при работе регулируемого электропривода, срок окупаемости капиталовложений, повышение производительности и надежности установки.

2. Типовые законы регулирования координат и их реализация.

- пропорциональные (П-регуляторы)**
- пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы)**
- пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы)**

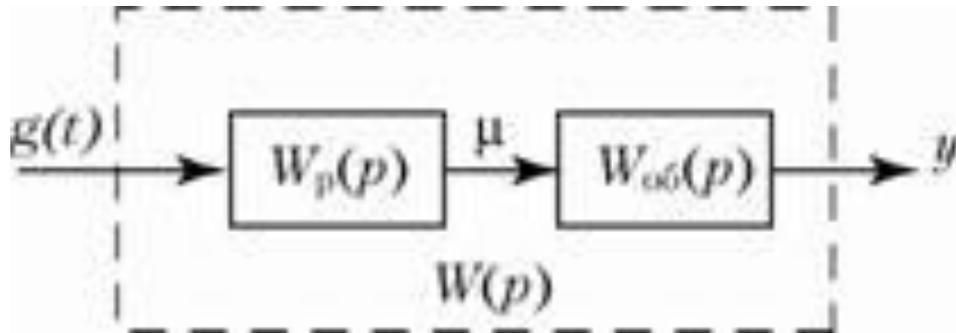
В системах автоматического регулирования поддержание заданного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону обеспечивается аппаратурными средствами, имеющими общее название — автоматические регуляторы.

По характеру изменения регулирующего воздействия автоматические регуляторы подразделяются на *регуляторы с линейными и нелинейными законами регулирования*. Примером регуляторов с нелинейным законом регулирования могут служить двухпозиционные регуляторы температуры в помещениях, холодильных машинах.

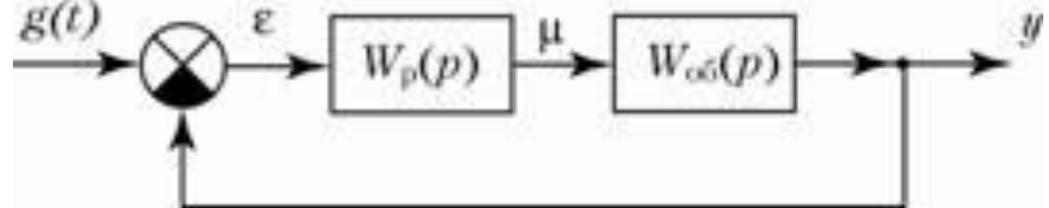
Регуляторы с линейным законом регулирования по математической зависимости между входными и выходными сигналами подразделяются на следующие основные виды:

- пропорциональные (П-регуляторы);
- пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы);
- пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы).

В зависимости от задающего воздействия и параметров объекта регулирования подбирают регулятор с определенной характеристикой W_p . Изменение W_p адекватно ведет к изменению коэффициентов дифференциального уравнения общего передаточного звена (регулятор-объект) и тем самым достигается необходимое качество регулирования.



а



б

Рисунок 4 – Структурная схема САР: а – разомкнутой системы по каналу задающего воздействия; б – то же, но замкнутой системы.

Регуляторы называются **пропорциональными (П-регуляторы)** если они имеют один параметр настройки – коэффициент передачи k_p .

Переходные процессы в П-регуляторе описываются выражением

$$\mu = k_p \cdot \varepsilon,$$

где ε – входное воздействие на регулятор, равное отклонению регулируемой величины от заданного значения;

μ – воздействие регулятора на объект, направленное на ликвидацию отклонения регулируемой величины от заданного значения.

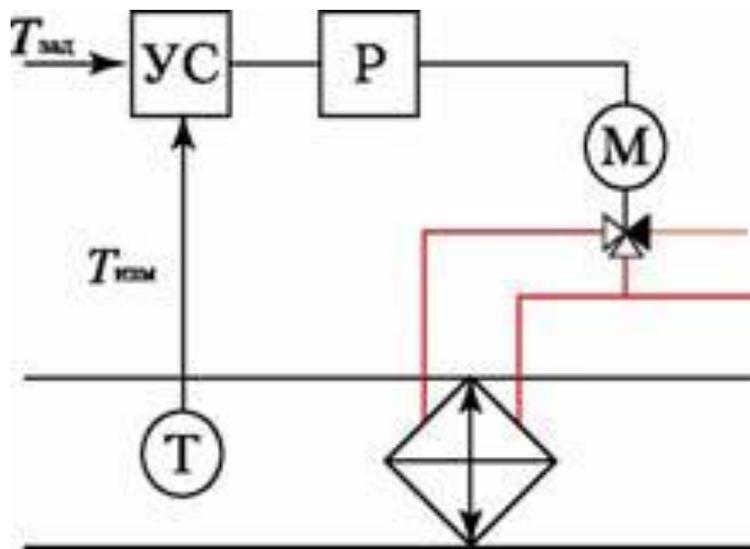


Рисунок 5 - Контур регулирования температуры приточного воздуха в канале центрального кондиционера

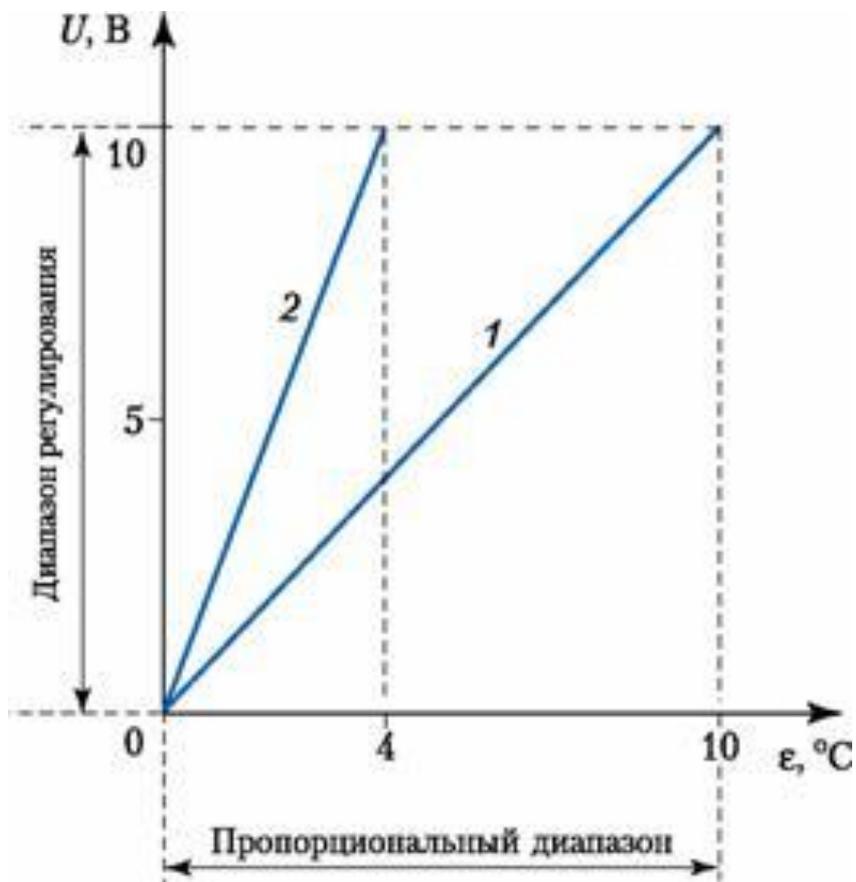


Рисунок 6 – График пропорционального регулирования

Из графика (рис.6) видно, что чем меньше пропорциональный диапазон, тем круче характеристика регулирования. Кривая (1) соответствует диапазону изменения температуры 0–10 °С, а кривая (2) – диапазону 0–4 °С.

Величина k_p есть коэффициент регулирования. В первом случае $k_p = 1$, а во втором $k_p = 2,5$. При больших значениях k_p в контуре регулирования могут возникнуть колебания (рис.7).

Сигнал на выходе устройства управления будет иметь вид

$$y(t) = U_0 + k_p \cdot \varepsilon,$$

где U_0 – сигнал на выходе устройства управления при $\varepsilon = 0$.

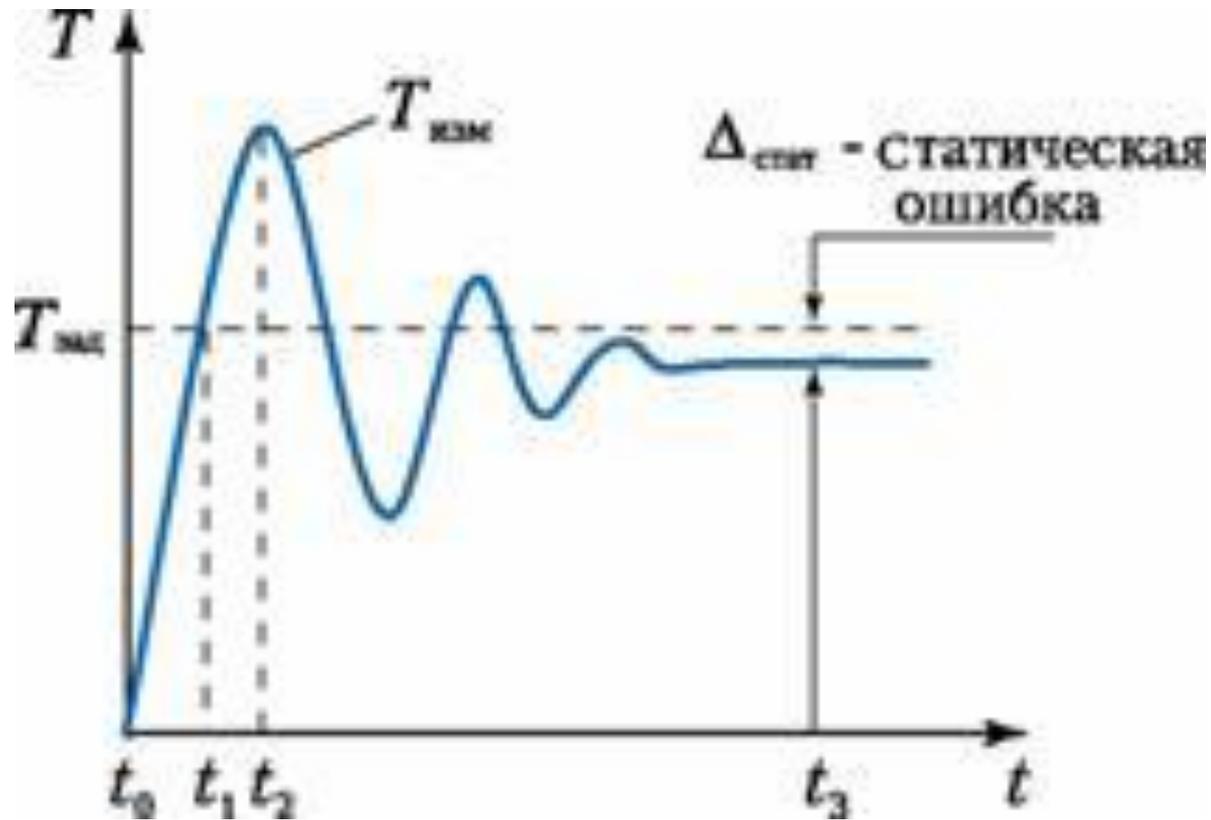


Рисунок 7 – Переходный процесс при пропорциональном (П) регулировании.

Из рис.5 видно, что в цепочке регулирования в реальном регуляторе имеется *еще одно инерционное (балластное) звено – исполнительный механизм (М)*. В данном случае – это электродвигатель привода трехходового клапана. Электрический привод является интегрирующим звеном и *его влияние по возможности уменьшают, используя обратные связи*. Это объясняется тем, что динамические свойства участка, охваченного обратной связью, независят от динамических свойств прямого участка, а *определяются в основном динамическими свойствами звена обратной связи*.

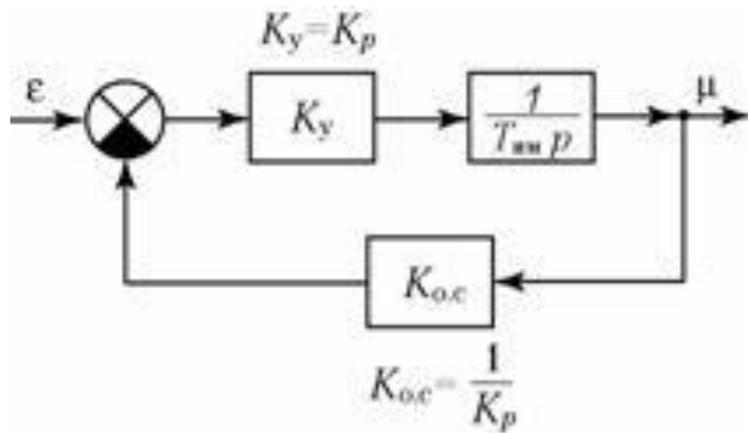


Рисунок 8 — Структурная схема П-регулятора

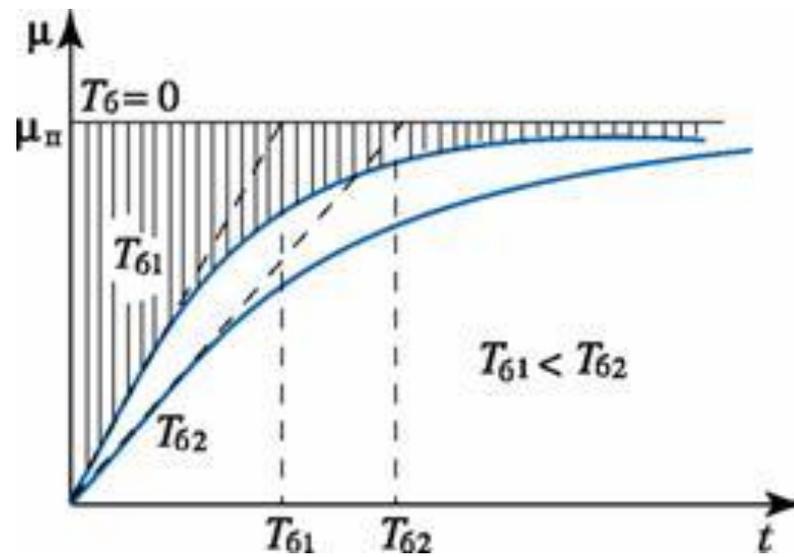


Рисунок 9 — Закон П-регулирования

Параметром настройки регулятора - коэффициент передачи устройства обратной связи $k_{ос}$. Коэффициент передачи регулятора k_n тем больше, чем меньше $k_{ос}$. Однако, чем больше k_n , тем больше постоянная времени балластного звена и тем больше искажается идеальный закон П-регулирования (рис.9).

Пропорционально-интегральные регуляторы

Статическую ошибку, возникающую при пропорциональном регулировании, можно исключить, если кроме пропорционального ввести еще и интегральное звено.

Последнее образуется путем постоянного суммирования ε за определенный промежуток времени.

Математически интегральный процесс регулирования описывается следующей зависимостью:

$$\mu = k_u \int_0^t \varepsilon dt$$

где $k_{и}=1/T_{и}$ – коэффициент пропорциональности интегральной составляющей,

$T_{и}$ - постоянная времени интегрирования, параметр настройки регулятора.

Если $k_{и} \neq 0$, то даже при незначительных отклонениях регулируемой величины сигнал со временем может достичь любой величины.

По истечении времени $t=T_{и}$ значение выходного сигнала будет равно $\mu = \varepsilon_0$ (рис.10, а).

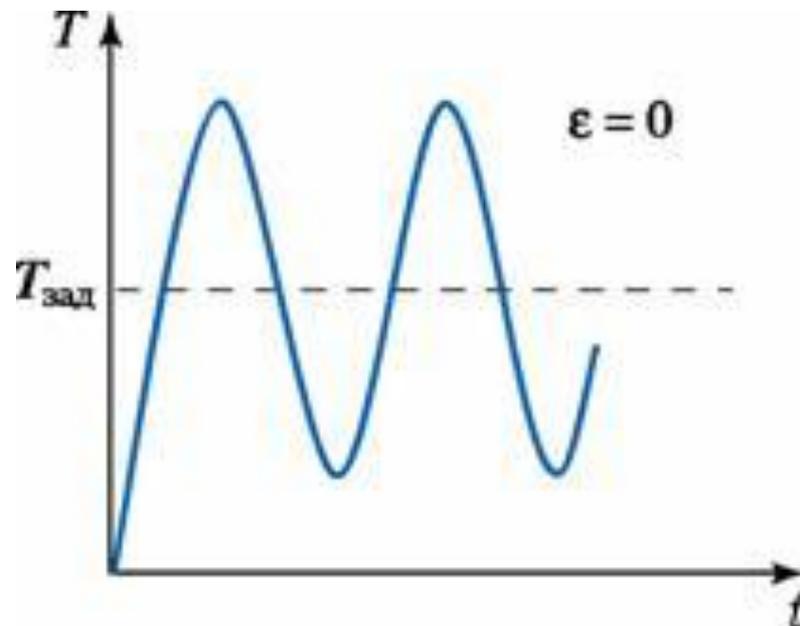
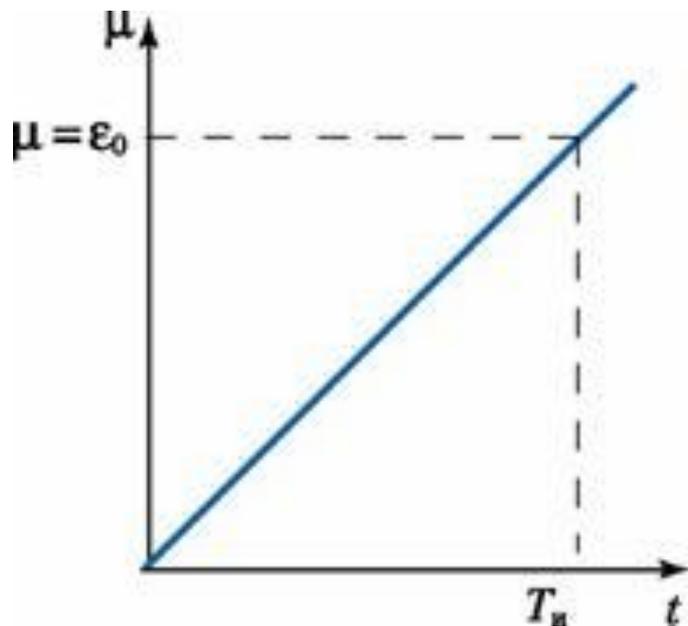


Рисунок 10 - Закон регулирования (а) и переходной процесс (б) при интегральном (И) регулировании

Передаточная функция ПИ-регулятора

$$W_{\text{ПИ}}(p) = K \left(p + \frac{1}{T_u p} \right) *$$

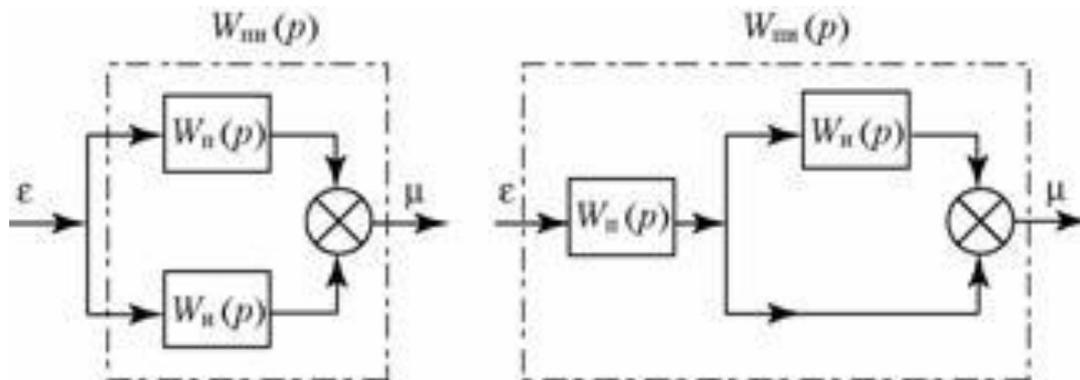


Рисунок 11 - Структурная схема идеальных ПИ-регуляторов: а – с передаточной функцией (*); б – с передаточной функцией (**)

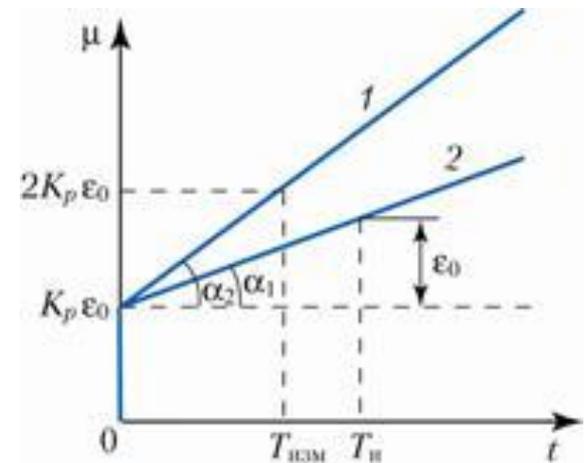


Рисунок 12 - Закон ПИ-регулирования регуляторов 1 – с передаточной функцией (*) 2 – с передаточной функцией (**)

Передаточная функция ПИ-регулятора по схеме рис.11,б:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = K \frac{T_{uz} p + 1}{T_{uz} p} \quad **$$

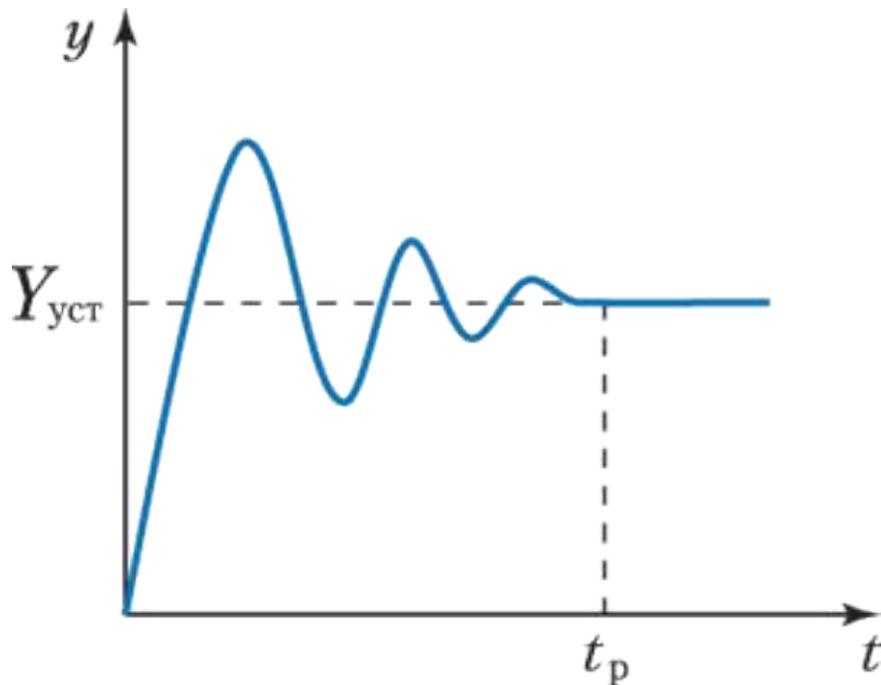
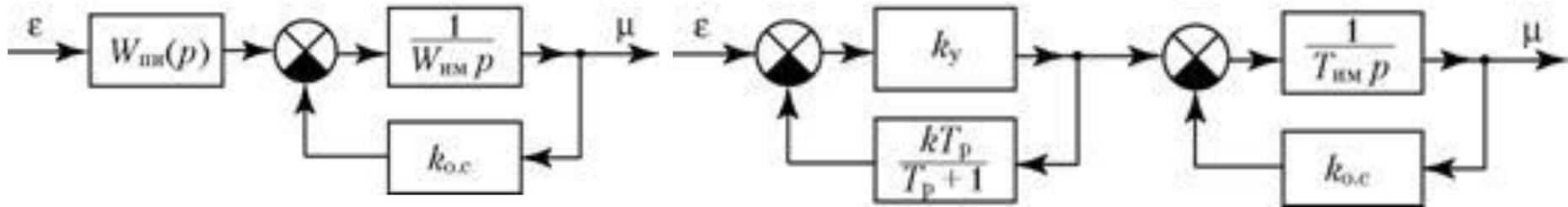
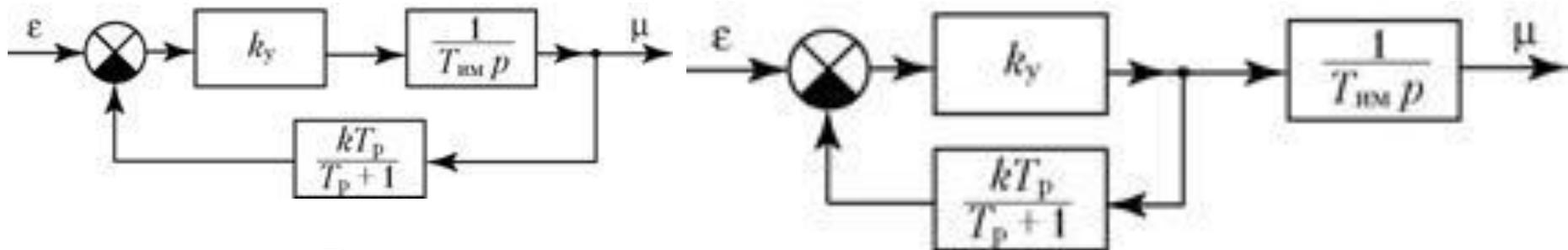


Рисунок 13 - Переходной процесс при пропорционально-интегральном (ПИ) регулировании.



а

б



в

г

Рисунок 14 - Структурные схемы промышленных ПИ-регуляторов.

Пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы.

П- и ПИ-регуляторы не могут упреждать ожидаемое отклонение регулируемой величины, реагируя только на уже имеющееся отклонение. Возникает необходимость в регуляторе, который вырабатывал бы дополнительное регулирующее воздействие, пропорциональное скорости отклонения регулируемой величины от заданного значения

$$\mu_{\delta} = T_{\delta} \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Такое регулирующее воздействие используется в дифференциальных и ПИД-регуляторах. ПИД-регуляторы воздействуют на объект пропорционально отклонению ε регулируемой величины, интегралу от этого отклонения и скорости изменения регулируемой величины:

$$\mu = k_p \varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon dt + T \frac{d\varepsilon}{dt}$$

По возможностям ПИД-регуляторы являются универсальными. Используя их, можно получить любой закон регулирования. Структурная схема и закон регулирования идеального ПИД-регулятора приведены на рис.15

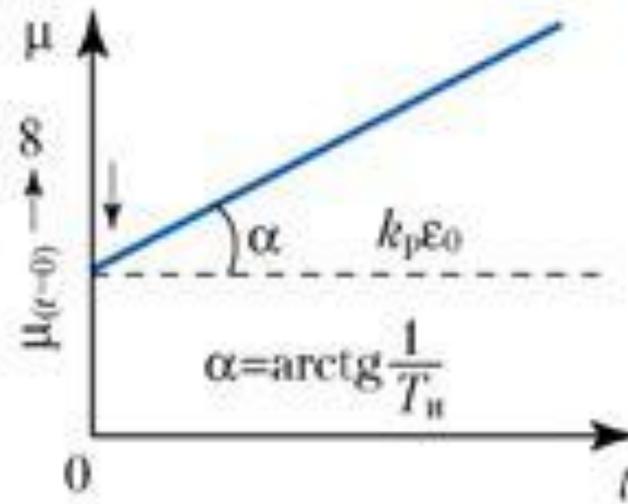
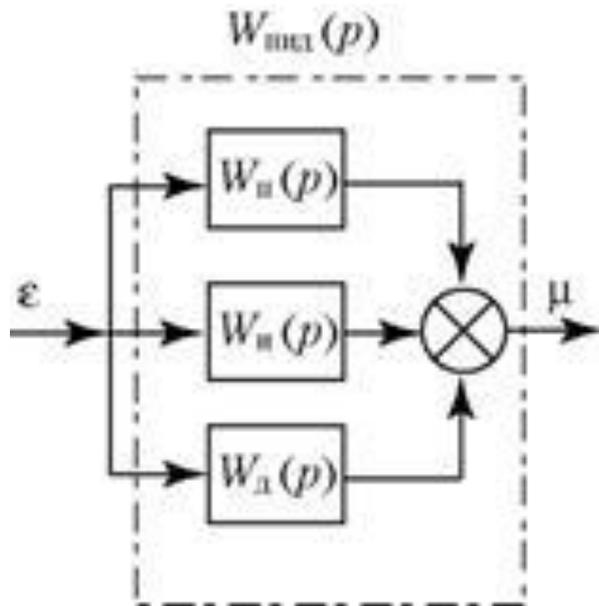


Рисунок 15 - Структурная схема ПИД-регулятора (а) и закон ПИД-регулирования (б).

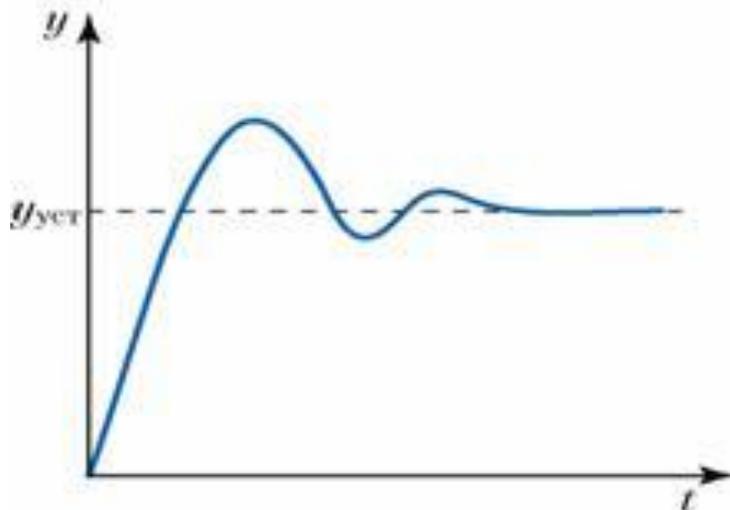


Рисунок 16 - Переходной процесс при ПИД-регулировании.

3. Замкнутые схемы управления электроприводами с двигателями постоянного тока по скорости

Характеристики разомкнутых ЭП, построенных по системе «преобразователь—двигатель» (П — Д), имеют относительно невысокую жесткость из-за влияния внутреннего сопротивления преобразователя. Для получения значительных диапазонов и высокой точности регулирования скорости требуется иметь более жесткие характеристики, которые можно получить лишь в замкнутой системе П—Д. Кроме того, характеристики разомкнутой системы не обеспечивают точного регулирования (или ограничения) тока и момента, что также требует перехода к замкнутой системе.

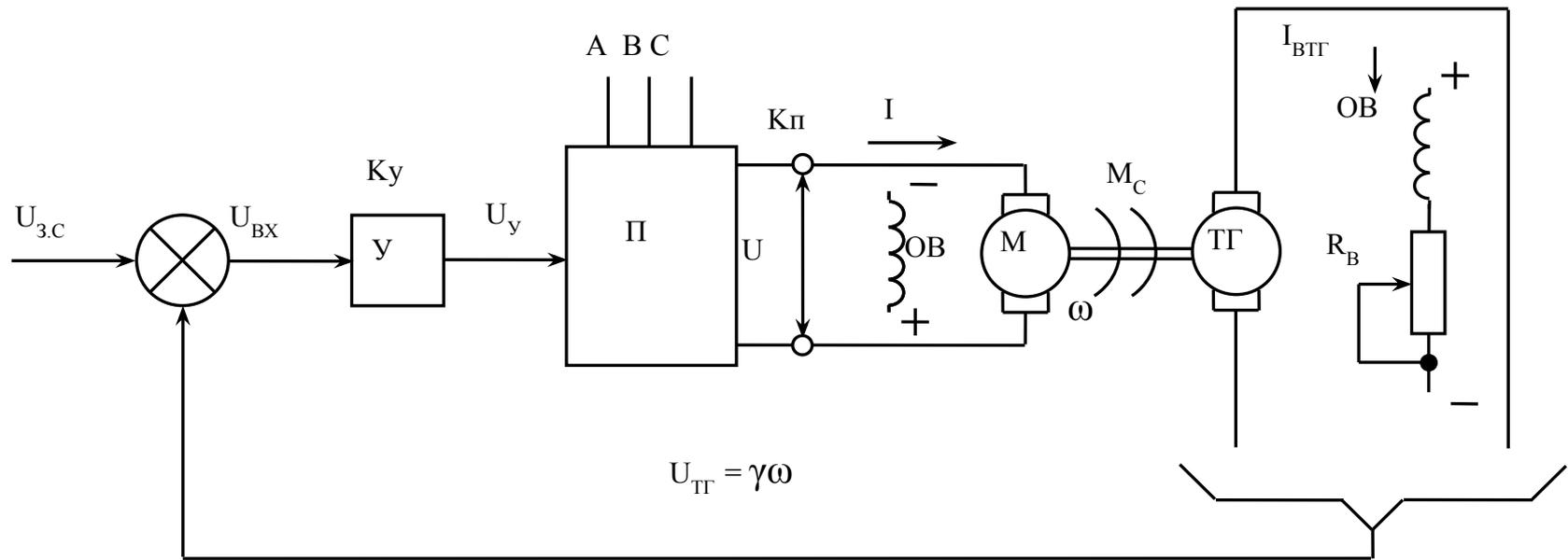


Рисунок 17 - Схема замкнутой системы П—Д с отрицательной обратной связью по скорости.

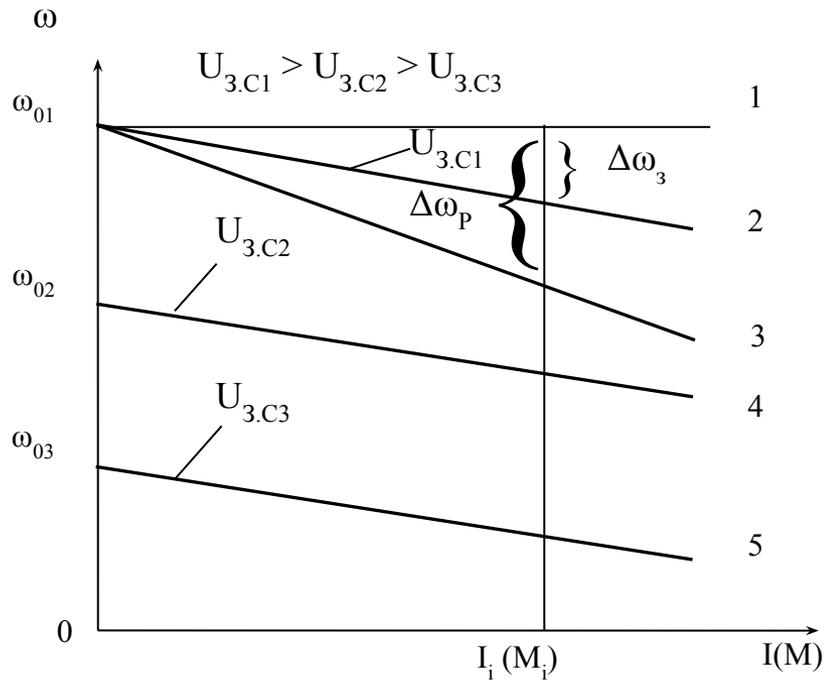


Рисунок 18 - Механические характеристики ДПТ в замкнутой системе регулирования с отрицательной обратной связью (ООС) по скорости

4. Замкнутые электропривода с подчиненным регулированием координат

Эффективное и качественное регулирование координат в системе П — Д обеспечивает принцип подчиненного регулирования. Этот принцип предусматривает регулирование каждой координаты с помощью своего отдельного регулятора и соответствующей обратной связи. Тем самым, регулирование каждой координаты происходит в своем замкнутом контуре и требуемые характеристики ЭП в статике и динамике могут быть получены за счет выбора схемы и параметров регулятора этой координаты и цепи ее обратной связи.

Включение в цепи задающего сигнала скорости $U_{з.с}$ регулятора скорости и его обратной связи (резисторов R_1 и $R_{о.с1}$) обеспечивает изменение (усиление или ослабление) этого сигнала с коэффициентом $k_1=R_{о.с1}/R_1$. Аналогично, изменение сигнала обратной связи по скорости $U_{о.с}$ происходит с коэффициентом $k_2=R_{о.с1}/R_2$. Такой регулятор получил название пропорционального (П) регулятора скорости.

При включении в цепи ОУ конденсаторов (реактивных электрических элементов) его функциональные возможности по преобразованию электрических сигналов становятся шире.

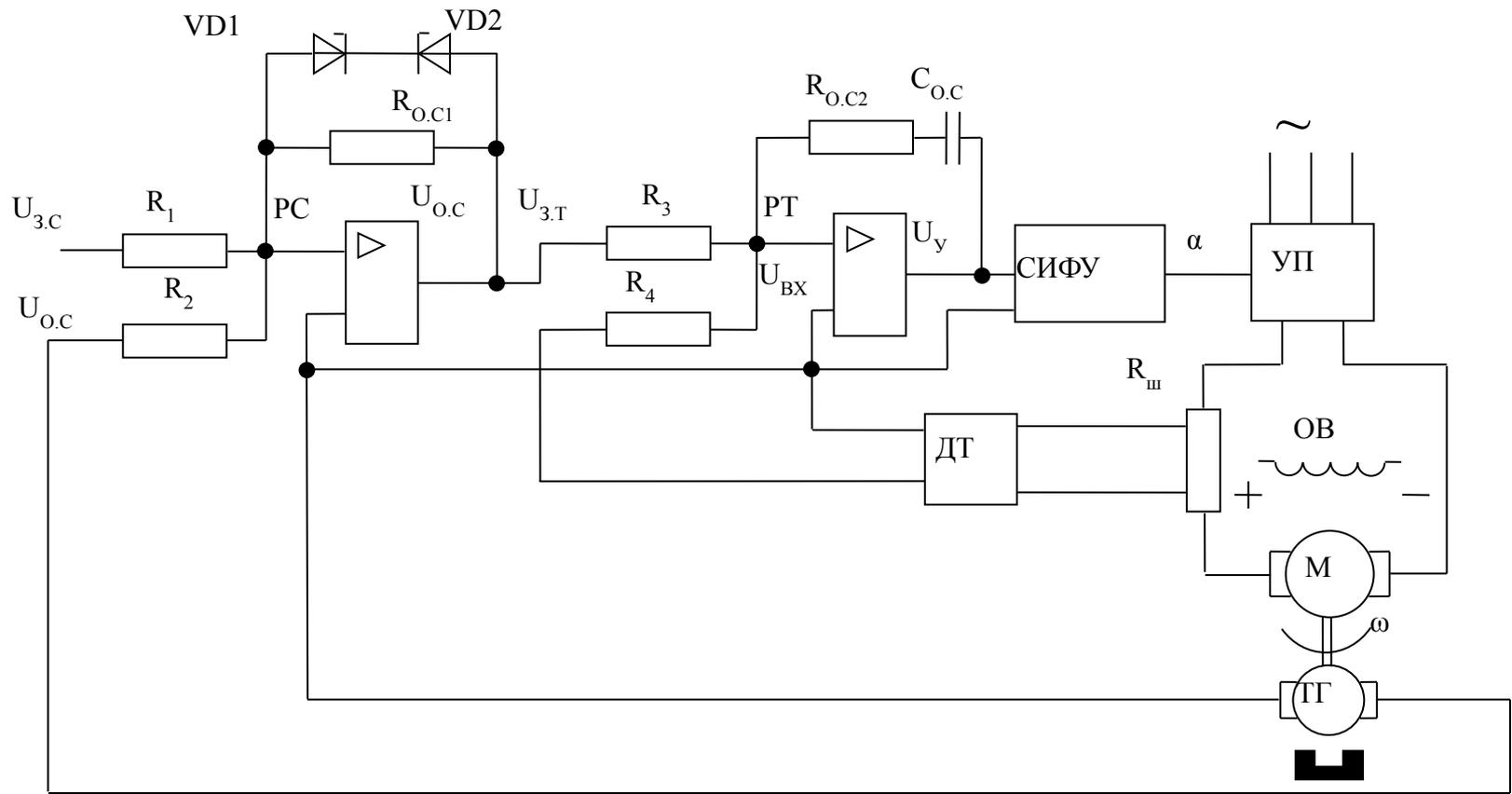


Рисунок 19 - Схема ЭП с подчиненным регулированием координат

Так, схема регулятора тока с включением в цепь обратной связи конденсатора C_0 с последовательно с резистором R_0 позволяет получить сигнал на выходе РТ в виде суммы двух составляющих (пропорциональную и интегральную). В этом случае имеем пропорционально-интегральный (П-И) регулятор.

В схеме для ограничения тока и момента в цепь обратной связи РС включены стабилитроны VD1 и VD2. В результате этого выходное напряжение РС, являющееся задающим сигналом (уставкой) тока $U_{з.т}$, ограничивается и тем самым ток и момент двигателя не могут превзойти заданного уровня.

5. Замкнутый электропривод с частотным управлением асинхронного двигателя

ЭП обеспечивают регулирование скорости, тока и момента трехфазных АД с короткозамкнутым ротором за счет изменения частоты и величины подводимого к нему напряжения. Упрощенная функциональная схема этого ЭП в однолинейном исполнении приведена на рисунке 20, а.

Схема управления ЭП построена по принципу подчиненного регулирования координат и имеет два контура — внутренний (тока) и внешний (напряжения). Регулирование этих координат осуществляется пропорционально-интегральными регуляторами тока РТ и напряжения РН, по сигналам датчиков тока ДТ и напряжения ДН.

6. Замкнутая схема импульсного регулирования скорости асинхронного двигателя с помощью резистора в цепи ротора

В схеме ЭП с импульсным регулированием сопротивления в цепи выпрямленного тока ротора для получения жестких характеристик использована отрицательная обратная связь по скорости двигателя.

В роторную цепь АД включен неуправляемый трехфазный выпрямитель В, к выходу которого подключен резистор $R_{2д}$.

Параллельно резистору включен управляемый ключ К (коммутатор).

Управление ключом происходит от широтно-импульсного модулятора ШИМ, на вход которого поступают сигналы задания $U_{з.с}$ и обратной связи $U_{о.с}$ по скорости.

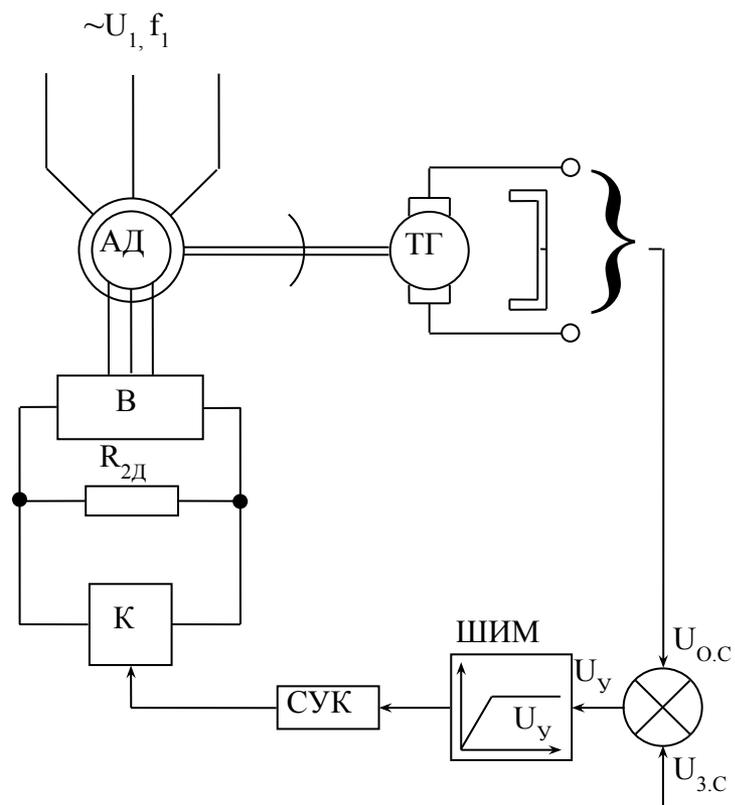


Рисунок 21 - Замкнутая схема импульсного регулирования скорости АД с помощью резистора в цепи ротора