

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

## Системы подчиненного регулирования параметров электроприводов

## По книгам:

- Волков Н. И., Миловзоров В. П.  
Электромашинные устройства автоматики: Учеб,  
для вузов по спец. «Автоматика и  
телемеханика». — 2-е изд., перераб. и доп. — М.:  
Высш. шк., 1986. — 335 с.: ил.
- Сабинин Ю. А. Электромашинные устройства  
автоматики: Учебник для вузов. — Л.:  
Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. — 408  
с.: ил.

# **СТРУКТУРА ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ**

- В ряде случаев предъявляются повышенные требования к быстродействию электропривода, точности и удобству управления и т. д. При этом приходится использовать только приводы с индивидуальными преобразователями и замкнутыми системами управления. Для двигателей постоянного тока, как правило, применяются выпрямительные преобразователи, причем для двигателей средней и большой мощности — тиристорные. Для прецизионных установок применяются преобразователи с широтно-импульсной модуляцией. Приводы переменного тока строятся на базе преобразователей частоты.

- Значительное число приводов с замкнутой цепью управления представляют собой статические системы. В этих приводах общий коэффициент усиления определяется максимальной допустимой статической погрешностью, которая в основном зависит от статизма системы. Соответственно структура основной цепи управления выясняется уже на этапе статического расчета. При введении интеграторов система становится астатической. В этом случае для выбора необходимого коэффициента усиления Должна быть задана требуемая добротность по скорости.

- Структура систем управления электромашиными установками не отличается от структуры систем управления другими объектами. В основе должен быть принцип обеспечения максимальной производительности производственных механизмов. При этом стремятся достичь максимального быстродействия привода, минимума потерь в двигателе и т. д. Усложняющим обстоятельством является тот факт, что в электромашиных установках всегда существуют ограничения, число которых возросло с внедрением тиристорных преобразователей: ограничения по току и его производной, по напряжению в проводящем и запертом состоянии тиристоров и др.

- Для систем управления электромашиными установками используются общепринятые методы синтеза, а именно частотный, метод типовых форм уравнений, модального управления, аналитического конструирования. Два последних из указанных методов нашли ограниченное применение из-за необходимости введения большого числа обратных связей, равного порядку уравнения системы. При этом иногда схема оказывается трудно реализуемой и приходится вводить в систему наблюдающие устройства, что, естественно, приводит к ее усложнению.

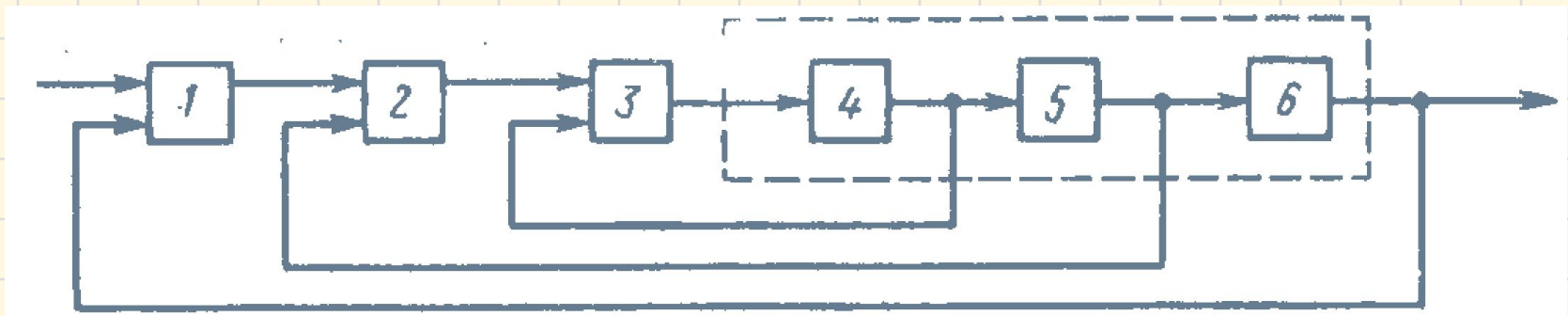
- Для коррекции, как правило, используются обычные пассивные четырехполюсники. Токи и напряжения ограничиваются за счет нелинейных задержанных обратных связей, а также задатчиков интенсивности и ограничителей последовательного типа.
- В последнее десятилетие наибольшее распространение в управлении электромашинными устройствами получил принцип подчиненного регулирования. При этом как структура систем управления, так и методы их синтеза приобретают некоторые особенности.



# **СИСТЕМА ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

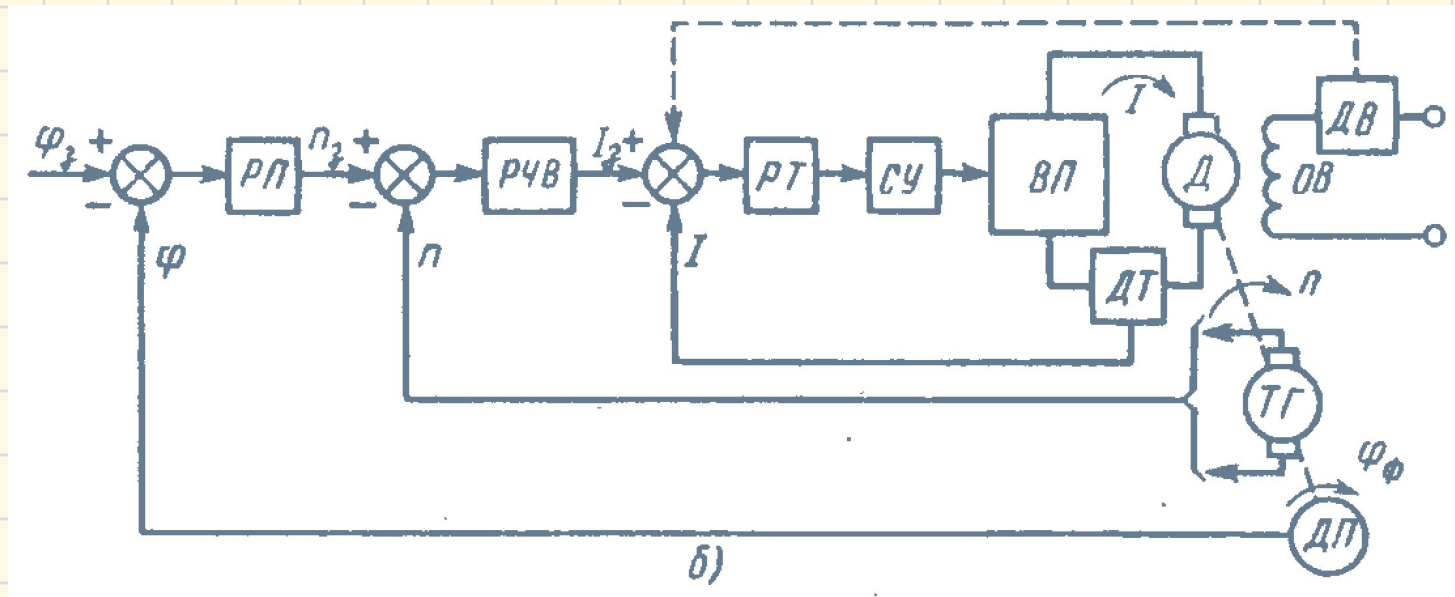
В настоящее время при создании систем регулирования применяют принцип последовательной коррекции или так называемого подчиненного регулирования, сущность которого состоит в следующем.

Объект регулирования (обведен пунктиром) представляют в виде последовательно соединенных звеньев 4 — 6, выходными параметрами которых являются, например, угол поворота выходного вала следящей системы, частота вращения вала двигателя, ток в цепи якоря, магнитный поток, вращающий момент и т. п.



- Для управления каждым из таких параметров создают отдельный регулятор 1 — 3, образующий с объектом контур, замкнутый соответствующей обратной связью, которая осуществляет регулирование только этого параметра.

- ВП – вентильный преобразователь
- СУ – схема управления
- РП, ДП – регулятор положения и датчик поворота
- РЧВ, ТГ – регулятор частоты вращения и тахогенератор
- РТ, ДТ – регулятор тока и датчик тока
- ОВ, ДВ – обмотка возбуждения и датчик возбуждения
- Д - двигатель



- Регуляторы соединяют последовательно так, что выход одного является входом другого. При этом замкнутые контуры регулирования образуют систему с внутренним контуром управления, состоящим из регулятора и одного из звеньев объекта управления, первым внешним контуром, включающим в себя внутренний контур и следующее звено объекта управления, вторым внешним контуром, образованным первым и следующим звеном объекта управления и т. д.

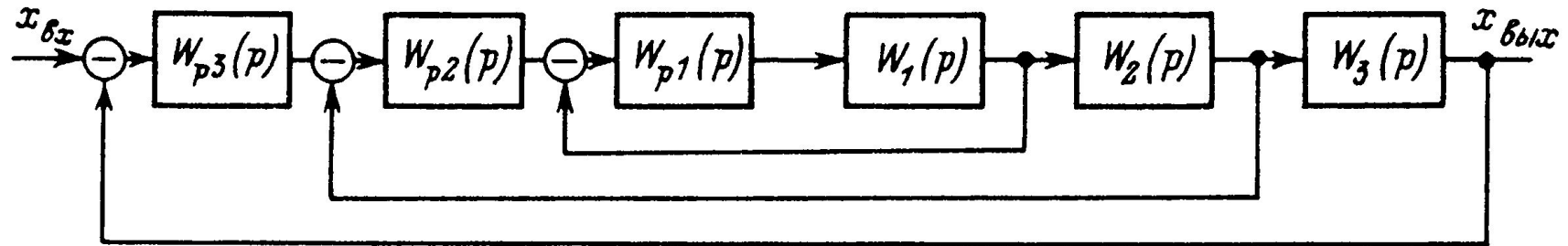
- Выходной сигнал каждого внешнего контура является задающим для последующего, заключенного внутри него контура. Таким образом, каждый внутренний контур регулирования подчинен соответствующему внешнему, что и нашло отражение в названии этого принципа регулирования.
- На рис. Б) изображена структурная схема следящей системы, обрабатывающей заданный угол поворота  $\varphi_3$  с подчиненным регулированием частоты вращения и тока, изменяемого вентильным преобразователем ВП по сигналу от схемы управления СУ.
- Основным регулятором является регулятор положения (угла поворота) РП, на вход которого с датчика положения ДП поступает сигнал рассогласования, пропорциональный разности заданного  $\varphi_3$  и фактического  $\varphi_f$  углов поворота выходного вала системы. Обратная связь этого внешнего контура создается, например, с помощью потенциометра.
- Выходной сигнал регулятора положения является сигналом, задающим частоту вращения  $\omega_3$  для подчиненного ему регулятора частоты вращения РЧВ, контур которого замыкается обратной связью через тахогенератор ТГ.

- Выходной сигнал регулятора частоты вращения является сигналом задания подчиненного ему регулятора тока РТ, обратная связь в контуре которого осуществляется через датчик тока ДТ.
- В таких системах легко можно ограничить значения параметров (например, пусковые токи при скачкообразных изменениях нагрузки на валу исполнительного двигателя или большие начальные рассогласования в следящих системах). Это достигается путем ограничения выходных сигналов предыдущего регулятора. При этом такое ограничение, в свою очередь, может зависеть от других параметров. Так, например, ограничение тока можно выполнить в зависимости от степени ослабления магнитного потока двигателя по сигналу от датчика тока возбуждения ДВ при регулировании во второй зоне управления, как показано пунктиром на рисунке.

- Преимуществом систем подчиненного регулирования по сравнению с системами независимого регулирования состоит в простоте анализа, синтеза и наладки системы. Это объясняется тем, что вся система разбивается на простейшие контуры, позволяющие настраивать каждый параметр отдельно, начиная с внутреннего, и делать это независимо от настройки внешнего параметра.
- Недостатком систем подчиненного регулирования является некоторый проигрыш по быстродействию, связанный с последовательным воздействием на систему через внутренние контуры, а не сразу на входное звено объекта управления. В большинстве случаев этот недостаток не является существенным, а преимущества таких систем имеют решающее значение.

# **СТРУКТУРНАЯ СХЕМА**





Регулятор подбирается из условия, чтобы при последовательном включении его с соответствующим звеном системы была скомпенсирована большая постоянная времени  $T$  и взамен ее действовала существенно меньшая постоянная времени  $T_0$ . При этом результирующее эквивалентное звено, состоящее из исходного звена и регулятора, должно быть интегрирующим, с передаточной функцией  $W_{рез}(p) = 1/T_0 p$ .

т. е. регулятор всегда должен быть построен так, чтобы

$$W_{\text{рез}}(p) = W(p) \cdot W_{\text{рег}}(p) = 1/T_0 p$$

I. Если в основной цепи имеется интегрирующее звено

$W(p) = \frac{1}{Tp}$ , то регулятор должен быть **пропорциональным**,

причем  $W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{рег}}$ ;  $W_{\text{рез}}(p) = k_{\text{рег}}/T_0 p$ . Тогда после создания замкнутого контура

$$W_3(p) = \frac{k_{\text{рег}}/Tp}{1+k_{\text{рег}}/Tp} = \frac{1}{1+T_0 p}; \text{ где: } T_0 = T/k_{\text{рег}}$$

При  $k_{\text{рег}} \rightarrow \infty$  постоянная времени  $T_0$  может иметь любое сколь угодно малое значение.

II. Если последовательно с интегрирующим звеном включено усилительное, то  $W(p) = k/T_0 p$ , то при том же

пропорциональном регуляторе  $W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{рег}}/T_0 p$ , откуда для

замкнутого контура  $W_3(p) = \frac{1}{1+T_0 p/k}$

III. Если исходное звено апериодическое с передаточной функцией  $W(p) = \frac{1}{1+Tp}$

то регулятор должен иметь передаточную функцию

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{1 + Tp}{T_0 p}$$

Тогда  $W_{\text{рез}}(p) = \frac{1}{1+Tp} \cdot \frac{1+Tp}{T_0 p} = 1/T_0 p$

или после охвата обратной связью опять получим  $W_3(p) = \frac{1}{1+T_0 p}$

При наличии в апериодическом звене некоторого коэффициента усиления, т. е. при передаточной функции

$$W(p) = \frac{k}{1 + Tp}$$

аналогично получим  $W_{\text{рез}}(p) = \frac{k}{1+Tp} \cdot \frac{1+Tp}{T_0 p} = k/T_0 p$

соответственно  $W_3(p) = \frac{1}{1+T_0 p/k}$

# РЕГУЛЯТОРЫ

Используются регуляторы четырех видов:

1. Пропорциональные, с передаточной функцией

$$W_{\text{рег}}(p) = k_{\text{рег}}$$

2. Интегральные

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{1}{T_0 p}$$

3. Пропорционально-интегральные

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{1 + T p}{T_0 p} = \frac{1}{T_0 p} + \frac{T}{T_0}$$

4. Пропорционально-интегрально-дифференциальные

$$W_{\text{рег}}(p) = \frac{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}{T_0 p} = \frac{1}{T_0 p} + \frac{T_1 + T_2}{T_0} + \frac{T_1 T_2 p}{T_0}$$

Последний вид бывает необходим при наличии двух больших постоянных времени, подлежащих компенсации, например в контуре с колебательным звеном.

Таким образом, при использовании названных регуляторов получаем единообразную структуру системы.

# **ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

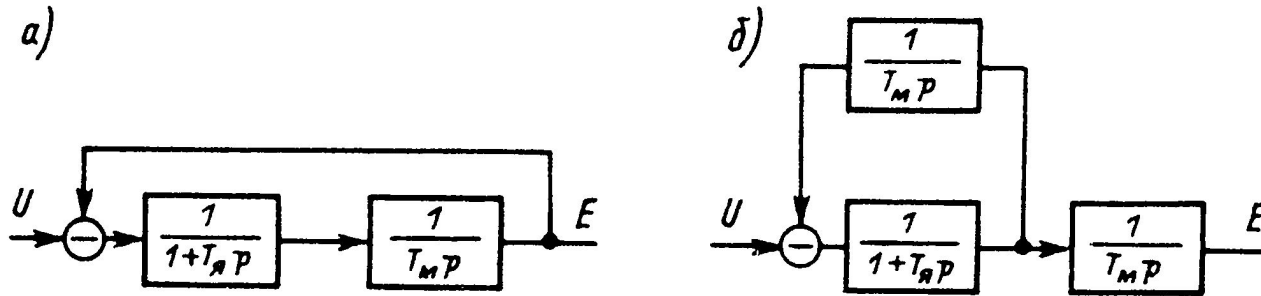


Рис. 13-2. Обратная связь по ЭДС в схеме двигателя постоянного тока

- Некоторый диссонанс вносит двигатель постоянного тока, у которого существует внутренняя обратная связь, обусловленная ЭДС (рис. 13-2, а). Чтобы исключить охват обратной связью двух звеньев, можно структурную схему двигателя преобразовать (рис. 13-2, б). Передаточная функция при этом не изменится и может быть представлена в виде:

$$W_{д}(p) = \frac{\omega}{U}(p) = \frac{\frac{1}{1+T_{я}p} \cdot \frac{1}{T_{м}p}}{1 + \frac{1}{1+T_{я}p} \cdot \frac{1}{T_{м}p}} \cdot \frac{1}{k_E} = \frac{k_D}{T_{я}T_{м}p^2 + T_{м}p + 1}$$

где  $k_D = 1/k_E$ .



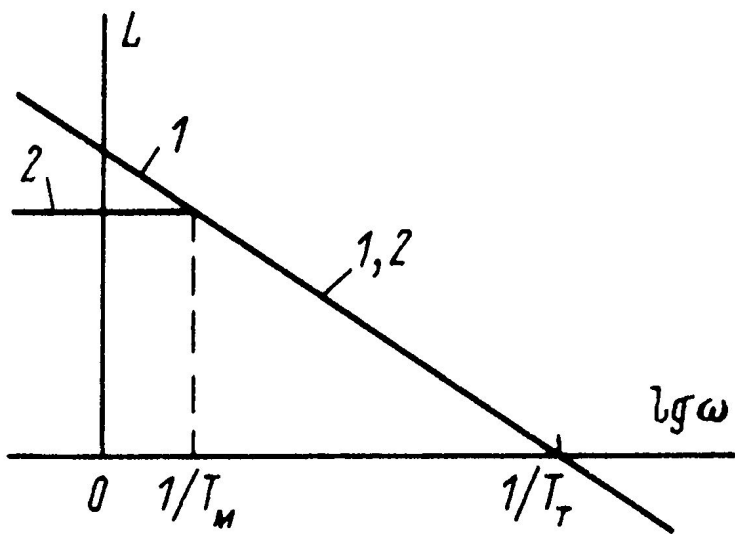
- Однако структурная схема на рис. 13-2, б тоже неудобна, так как при введении регулятора у контура тока будут две большие постоянные времени. Постоянная  $T_m$ , кроме того, будет относиться к двум контурам.
- Поэтому обычно отказываются от учета обратной ЭДС двигателя и принимают упрощенную структурную схему, которой соответствует передаточная функция

$$W_d(p) = \frac{k_d}{T_m p (1 + T_j p)}$$

# ЛАЧХ

1 – без учета ОС по ЭДС

2 – с учетом ОС по ЭДС



При этом, естественно, вносится погрешность. Однако можно показать, что пренебрежение ЭДС не внесет существенного искажения в расчет динамики привода.

Реальный контур будет обладать статизмом

При этом, естественно, вносится погрешность. Однако можно показать, что пренебрежение ЭДС не внесет существенного искажения в расчет динамики привода.

Реальный контур будет обладать статизмом

$$\delta = \frac{1}{1+k} = \frac{1}{1+T_M/T_T} = \frac{T_T}{T_M+T_T}$$

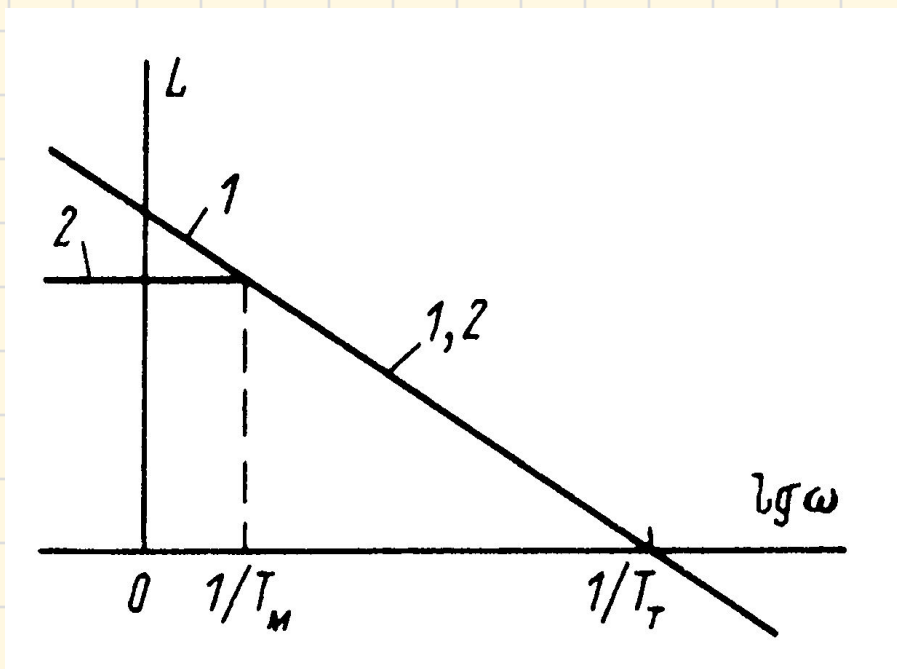
где  $T_T$  - постоянная времени регулятора тока

При  $T_T < T_{я} < T_M$  статизм должен быть невелик

ЛАЧХ

1 – без учета ОС по ЭДС

2 – с учетом ОС по ЭДС



# **ВЫБОР ПОСТОЯННЫХ ВРЕМЕНИ РЕГУЛЯТОРОВ**

- Выбор постоянных времени регуляторов - важный вопрос. Принимать их малыми, существенно меньшими постоянных времени самой управляемой системы, можно было бы только в идеальной системе, не обладающей никакими другими постоянными времени, кроме учетных, и шумами.
- В действительности практически в каждом контуре существуют еще малые неучтенные постоянные, которые при компенсации основных больших постоянных будут оказывать значительное влияние на поведение системы, причем характер влияния труднопредсказуем.
- Поэтому постоянные времени в регуляторах нельзя снижать за пределы некоторого уровня. Должно соблюдаться условие

$$T_0 = (2 \div 4)T_\mu$$

где  $T_\mu$  — некомпенсируемая малая постоянная времени.

- При наличии в контуре безынерционного звена, естественно, должно быть

$$\frac{T_0}{k} = (2 \div 4)T_\mu$$

- Если малых постоянных времени несколько, то

$$T_0 = (2 \div 4)\Sigma T_\mu ; \frac{T_0}{k} = (2 \div 4)\Sigma T_\mu$$

• При наличии в контуре некомпенсируемой малой постоянной времени вместо

$$W_{\text{рез}}(p) = W(p) \cdot W_{\text{рег}}(p) = 1/T_0 p$$

получим

$$W_{\text{рез}}(p) = \frac{1}{T_0 p (1 + T_\mu p)},$$

а после создания замкнутого контура

$$W_3(p) = \frac{1}{1 + T_0 p (1 + T_\mu p)}$$

Отсюда имеем характеристическое уравнение 2-го порядка

$$T_0 T_\mu p^2 + T_0 p + 1 = 0$$

Решая характеристическое уравнение находим, что собственная частота контура будет

$$\omega_{\text{собств}} = \frac{1}{\sqrt{T_0 T_\mu}};$$

коэффициент демпфирования

$$\lambda = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_0}{T_\mu}}.$$



Таким образом, характер процесса определяется соотношением постоянных времени  $a = T_0/T_\mu$ .

Принимая  $a = T_0/T_\mu = 2$ , получим  $\lambda = \sqrt{2}/2 = 0,707$  и при отработке задаваемого воздействия перерегулирование  $\sigma \approx 5\%$ .

При  $a = T_0/T_\mu = 4$  коэффициент  $\lambda = 1$  и процесс будет апериодическим.

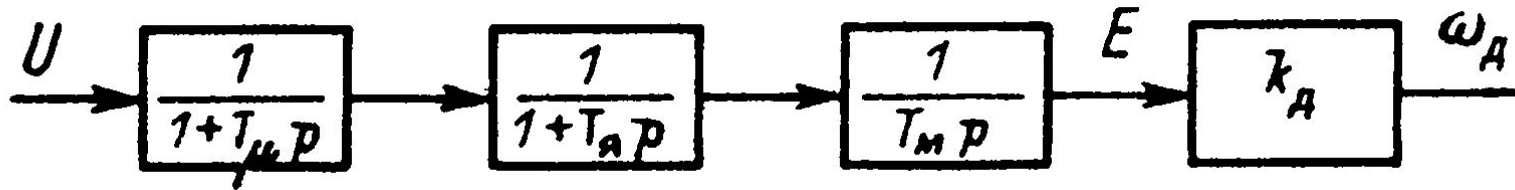
Малые некомпенсируемые постоянные приводят к увеличению фазового сдвига. Полагая, что малая постоянная соответствует апериодическому звену, получим фазовый сдвиг  $\varphi = \arctg T_\mu \omega$ .

Отставание при частоте среза  $\omega = 1/T_0$   
при  $T_0 = 2T_\mu$   $\varphi = 26,5^\circ$ , а при  $T_0 = 4T_\mu$   $\varphi = 14^\circ$

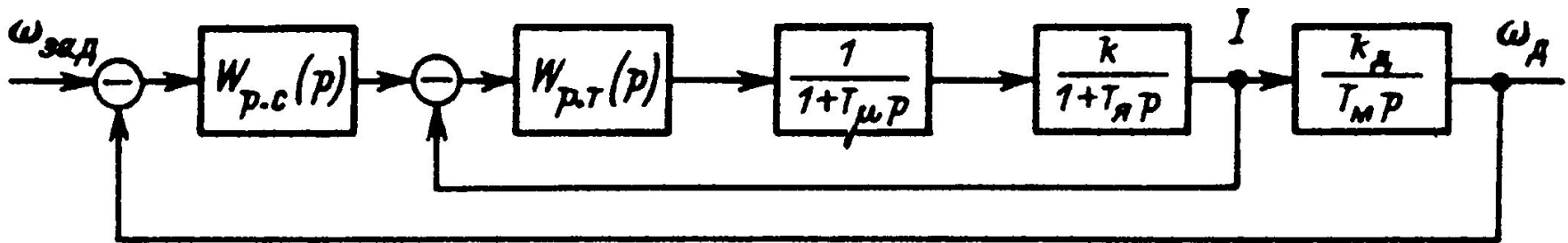
# **СИНТЕЗ СИСТЕМ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Проведем синтез системы стабилизации скорости двигателя независимого возбуждения, питаемого от тиристорного преобразователя.

- Исходная структурная схема разомкнутой системы



- Схема замкнутой системы с регуляторами тока и скорости



# Синтез регулятора тока

Исходная передаточная функция контура тока в соответствии с представленной схемой может быть записана как

$$W(p) = \frac{k}{(1 + T_{\mu}p)(1 + T_{я}p)}$$

где  $k$  - передаточный коэффициент звена.

Желаемая передаточная функция при включении регулятора должна иметь вид

$$W_{рез}(p) = \frac{k}{T_T p (1 + T_{\mu}p)}$$

Отсюда сам регулятор должен обладать передаточной функцией

$$W_{р.т}(p) = \frac{(1 + T_{я}p)}{T_T p}$$

Для обеспечения должных динамических свойств примем  $a = T_T / (kT_\mu) = 2$ . Тогда

$$W_{\text{рез}}(p) = \frac{k}{2T_\mu p(1+T_\mu p)}$$

После замыкания контура тока получим

$$W_{\text{з.т}}(p) = \frac{k}{1 + 2T_\mu p(1 + T_\mu p)} = \frac{k}{1 + 2T_\mu p + 2T_\mu^2 p^2}$$

пренебрегая членом второго порядка малости  $T_\mu^2$

$$W_{\text{з.т}}(p) = \frac{k}{1 + 2T_\mu p}$$

# Синтез регулятора скорости

Для контура скорости в разомкнутом состоянии до введения регулятора скорости

$$W(p) = \frac{k_d}{T_M p (1 + 2T_\mu p)}$$

Теперь  $2T_\mu$  представляет собой малую некомпенсируемую постоянную времени контура скорости. После введения регулятора необходимо получить

$$W_{рез}(p) = \frac{k_d}{T_c p (1 + 2T_\mu p)}$$

Отсюда сам регулятор должен иметь передаточную функцию

$$W_{р.с} = T_M / T_c$$

т. е. в этом случае регулятор будет пропорциональным.

Тогда, принимая  $a = 2$ , получим  $\frac{T_c}{k_d} = a \cdot 2T_\mu = 2 \cdot 2T_\mu = 4T_\mu$

или  $W_{p.c}(p) = T_M/4T_\mu$ . Соответственно

$$W_{z.c}(p) = \frac{1}{1 + \frac{T_c}{k_d} p(1 + 2T_\mu p)} = \frac{k}{1 + 4T_\mu p(1 + 2T_\mu p)}$$
$$= \frac{1}{8T_\mu p^2 + 4T_\mu p + 1}$$

Характеристическое уравнение при этом будет

$$8T_\mu p^2 + 4T_\mu p + 1 = 0$$

Отсюда для всей системы имеем

$$\omega_{\text{собств}} = \frac{1}{2\sqrt{2}T_\mu}; \lambda = \frac{2\sqrt{2}T_M}{2 \cdot 2 \cdot T_M} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$$

При этом, как уже отмечалось, в системе будет перерегулирование  $\sigma \approx 5\%$ .

Система, при синтезе которой принимают соотношение



Система, при синтезе которой принимают соотношение постоянных времени

$$a = a_1 = a_2 = \dots = a_n = 2,$$

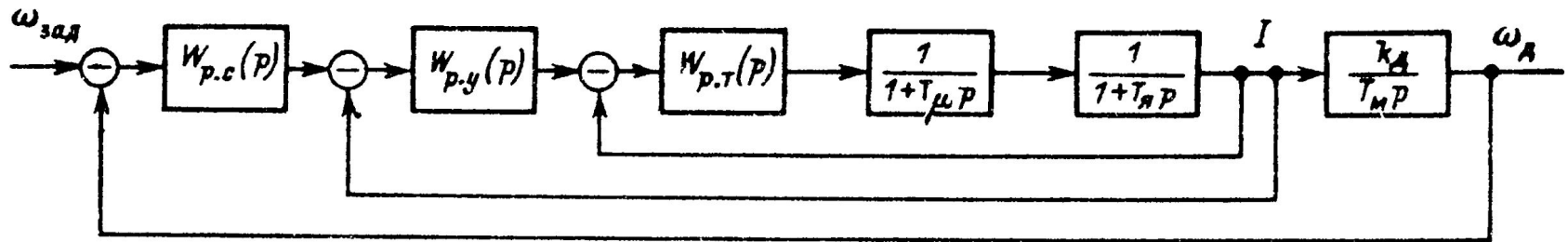
рассматривается как система, настроенная на модульный, или технический, оптимум. Эта настройка наиболее часто используется на практике. Принимая  $a > 2$ , получаем систему с меньшим быстродействием, поведение которой приближается к апериодическому закону.

- Рассмотренная система содержит только один регулятор типа интегратора. Соответственно она обладает свойствами астатической системы с астатизмом первого порядка и не должна иметь ошибку, обусловленную статизмом.



# Трехконтурная система

- Чтобы устранить скоростную ошибку, следует ввести второй интегратор. Для этого создается еще контур ускорения и структурная схема приобретает вид, представленный на рисунке.
- Цепь обратной связи контура ускорения подключена к датчику тока, так как при отсутствии статической нагрузки ускорение пропорционально току якорной цепи.



Используя ранее выполненные преобразования для замкнутого контура тока, получим передаточную функцию вида  $W_{з.т}(p) = \frac{1}{1+2T_{\mu}p}$ . Соответственно для контура ускорения регулятор должен быть интегральным с передаточной функцией

$$W_{р.у}(p) = 1/(T_y p)$$

При том же условии  $a = 2$  постоянная времени регулятора должна быть  $T_y = 4T_{\mu}$ .

После замыкания контура получим

$$W_{з.у}(p) = \frac{1}{1+4T_{\mu}p(1+2T_{\mu}p)} \approx \frac{1}{1+4T_{\mu}p}$$

Для разомкнутого контура скорости с введением регулятора

$$W_{рез}(p) = \frac{W_{р.с}(p)}{T_M p(1 + 4T_{\mu}p)}$$

Соответственно регулятор скорости по-прежнему будет статическим с передаточным коэффициентом  $T_M/(8T_\mu)$ .

Таким образом, после замыкания контура скорости передаточная функция системы

$$W_{з.с}(p) = \frac{1}{1 + 8T_\mu p(1 + 4T_\mu p)}$$

Соответствующее характеристическое уравнение

$$p^2 + \frac{1}{4T_\mu} p + \frac{1}{32T_\mu^2} = 0$$

$$\omega_{\text{собств}} = \frac{1}{4\sqrt{2}T_\mu}; \lambda = \frac{4\sqrt{2}T_M}{2 \cdot 4 \cdot T_M} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$$

В рассматриваемой системе за счет двух интегральных регуляторов скоростная ошибка практически будет устранена.

# Системы с подчиненным регулированием

Конец презентации