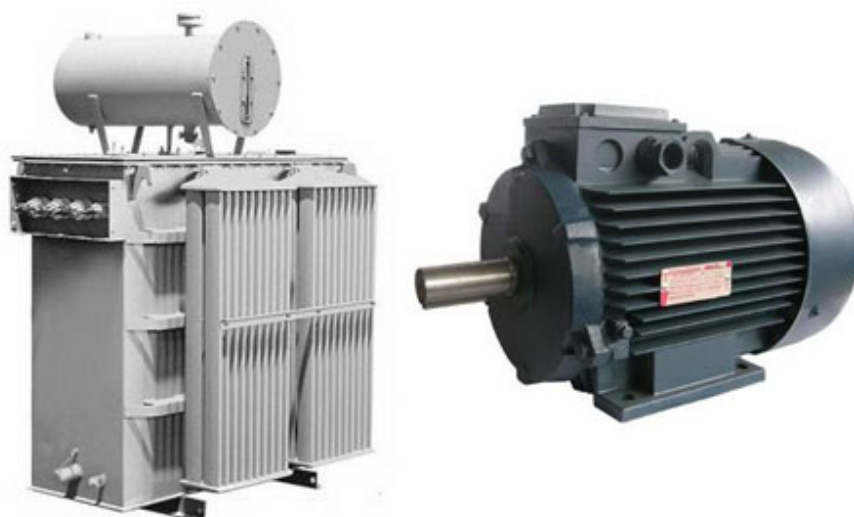


**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД»**



Волгоград 2013

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированный электропривод – это электрический привод, в котором регулирование режимов работы осуществляется при помощи устройств автоматического управления в соответствии с требованиями производственного процесса. Для управления автоматизированным электроприводом применяют силовые преобразователи, бесконтактные системы управления, микропроцессоры, программируемые контроллеры и другие средства автоматизации. Существующие типы автоматизированного электропривода выполняют самые разнообразные функции – от сравнительно простых (автоматический пуск, остановка, реверсирование механизма, поддержание или изменение с высокой точностью его скорости и т. п.) до управления сложными установками с комплексной автоматизацией технологических процессов.

При изучении дисциплины «Автоматизированный электропривод» рабочей программой предусмотрен лабораторный практикум, позволяющий студентам на реальных или лабораторных установках ознакомиться с принципом работы подобных устройств.

В данном пособии приведены общие теоретические положения, описание лабораторного стенда, моделирующего работу автоматизированного электропривода на базе двигателя постоянного тока и порядок выполнения лабораторных работ. Представлены рекомендации по оформлению и содержанию отчета по лабораторным работам и контрольные вопросы для проверки знаний на отчете.

Лабораторный практикум включает три лабораторные работы и позволяет студентам провести исследование двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, системы стабилизации скорости электропривода постоянного тока параллельного действия и системы подчиненного регулирования скорости электропривода постоянного тока.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

1.1. Цель работы

Исследование влияния параметров двигателя на статические и динамические характеристики электропривода.

1.2. Основные положения

Для двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения (рис. 1) при неизменной индуктивности цепи якоря, неизменном магнитном потоке и отсутствии реакции якоря, потоков рассеяния вихревых токов справедливы зависимости, приведенные в табл. 1.

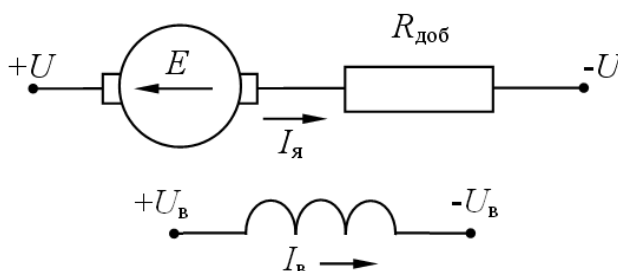


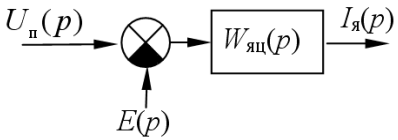
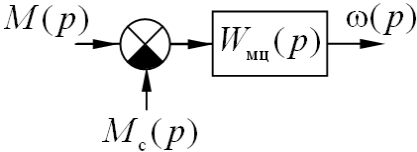
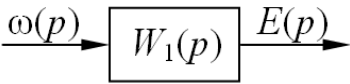
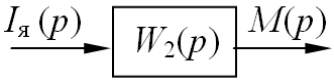
Рис. 1. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

В соответствии с уравнениями табл. 1 при $\Phi = \text{const}$ составляется структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Первый вариант структурной схемы двигателя постоянного тока с независимым возбуждением приведен на рис. 2, а второй – на рис. 3.

Для исследования механических характеристик электродвигателя постоянного тока необходимо найти передаточные функции двигателя при регулируемой координате – частота вращения ω по задающему $U_{\text{п}}$ и возмущающему $I_{\text{яс}}$ воздействиям.

Таблица 1

Уравнения двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Уравнение	Передаточная функция	Структурная схема
1. Уравнение электрического равновесия якорной цепи $U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt}$ $T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$	$W_{\text{яц}}(p) = \frac{I_{\text{я}}(p)}{U_{\text{п}}(p) - E(p)} = \frac{1}{\frac{R_{\text{я}}}{T_{\text{я}}(p) + 1}}$	
2. Уравнение механического равновесия (уравнение движения) $M = M_{\text{с}} + J \frac{d\omega}{dt}$	$W_{\text{мц}}(p) = \frac{\omega(p)}{M_{\text{с}}(p) - M(p)} = \frac{1}{Jp}$	
3. Уравнение связи по ЭДС $E = C \cdot \Phi \cdot \omega$	$W_1(p) = \frac{E(p)}{\omega(p)} = C \cdot \Phi$	
4. Уравнение по моменту $M = C\Phi I_{\text{я}}$ $M_{\text{с}} = C\Phi I_{\text{яс}}$	$W_2(p) = \frac{M(p)}{I_{\text{я}}(p)} = C \cdot \Phi$	

Передаточные функции двигателя при регулируемой координате – частота вращения ω по задающему воздействию (напряжение питания якорной цепи $U_{\text{п}}$):

$$W_{\omega-U_{\text{п}}}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\text{п}}(p)} = \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{эм}} p (T_{\text{я}} p + 1) + 1}, \quad (1)$$

где $U_{\text{п}}$ – напряжение питания якорной цепи электродвигателя;

ω – частота вращения вала электродвигателя;

$K_{\text{дв}}$ – коэффициент передачи двигателя;

$T_{\text{эм}}$ – электромагнитная постоянная времени;

$T_{\text{я}}$ – электромагнитная постоянная времени.

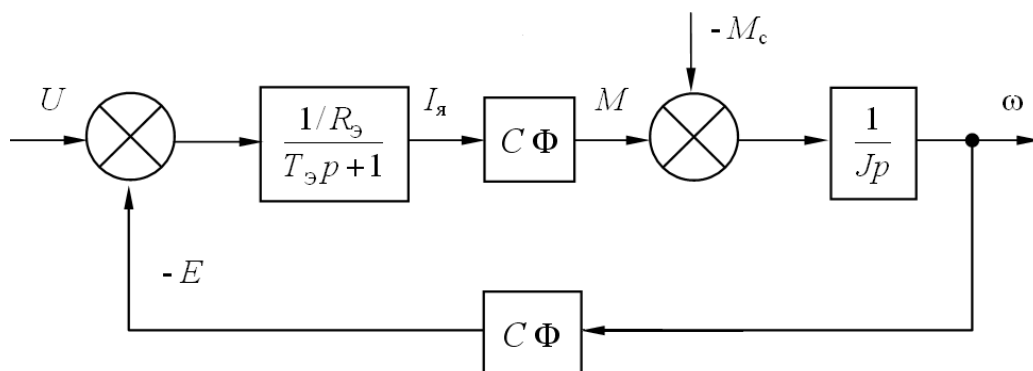


Рис. 2. Структурная схема двигателя постоянного тока (Вариант № 1)

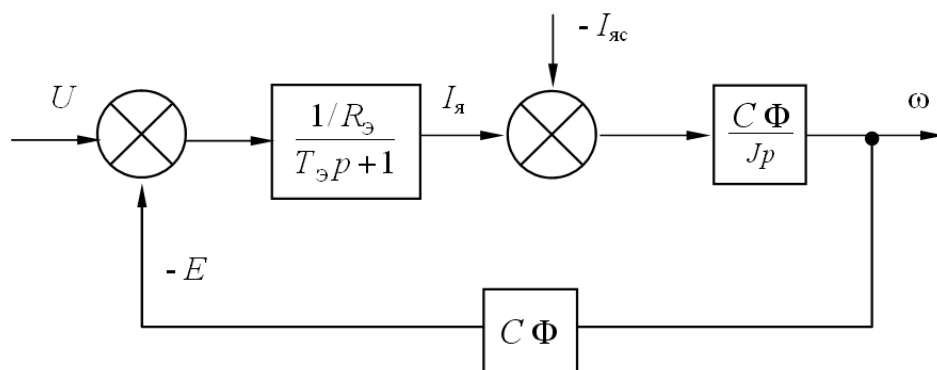


Рис. 3. Структурная схема двигателя постоянного тока (Вариант № 2)

Передаточные функции двигателя при регулируемой координате – частота вращения ω по возмущающему воздействию (статическому току якоря $I_{яc}$):

$$W_{\omega-I_{яc}}(p) = \frac{\omega(p)}{I_{яc}(p)} = (-1) \frac{R_{я} K_{дв} (T_{э} p + 1)}{T_{эм} p (T_{э} p + 1) + 1}, \quad (2)$$

где $R_{я}$ – сопротивление обмотки якорной цепи;

$I_{яc}$ – ток якорной цепи, пропорциональный моменту статического сопротивления M_c .

При $T_{э} \ll T_{эм}$ приведенные выше передаточные функции имеют вид:

$$W_{\omega-U_{п}}(p) = \frac{K_{дв}}{T_{эм} p + 1}, \quad (3)$$

$$W_{\omega-I_{яc}}(p) = \frac{-R_{я} K_{дв}}{T_{эм} p + 1}. \quad (4)$$

В таком случае структурная схема двигателя в упрощенном варианте может быть представлена в виде схемы на рис. 4.

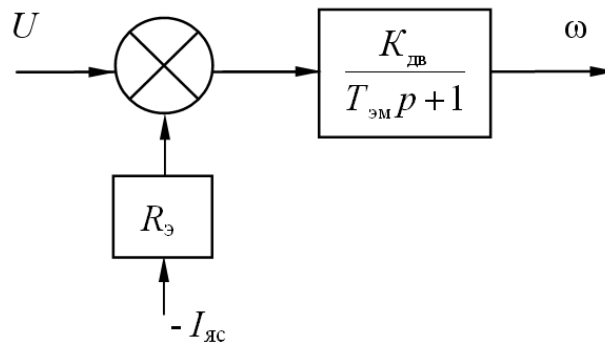


Рис. 4. Упрощенная структурная схема двигателя постоянного тока

Из уравнений, представленных в табл. 1 при $t \rightarrow \infty$, статические характеристики двигателя имеют вид:

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (5)$$

$$E = C\Phi\omega, \quad (6)$$

$$M = C\Phi I_{\text{я}}, \quad (7)$$

где Φ – магнитный поток;

C – конструктивная постоянная электродвигателя.

Из уравнений (5) и (6) при $p = 0$:

$$\omega(p) = W_{\omega-U}(p) \cdot U(p) + W_{\omega-I_{\text{яс}}}(p) \cdot I_{\text{яс}}(p). \quad (8)$$

Механическая характеристика двигателя имеет вид:

$$\omega = \frac{U}{C\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{C^2\Phi^2} M. \quad (9)$$

Если напряжение питания электродвигателя и магнитный поток принимают номинальные значения $U = U_{\text{ном}}$, $\Phi = \Phi_{\text{ном}}$, а добавочное сопротивление якорной цепи $R_{\text{доб}} = 0$ Ом, то такая характеристика называется *естественной*, в противном случае – *искусственной* (рис. 5).

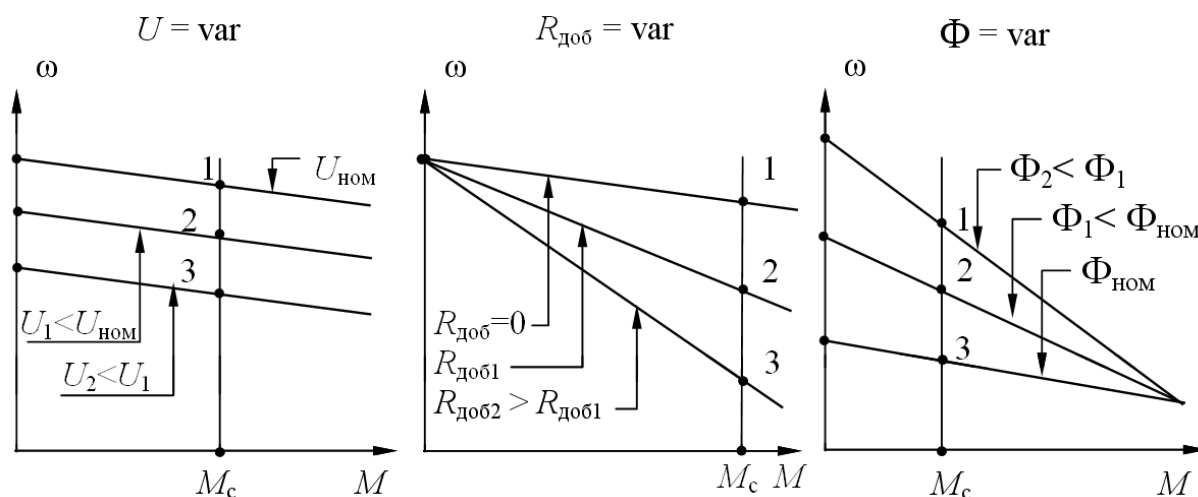


Рис. 5. Механические характеристики двигателя постоянного тока

1.3 Описание лабораторной установки

Данная лабораторная работа выполняется на установке для исследования электроприводов постоянного тока методом математического моделирования. Она представляет собой совокупность типовых звеньев системы автоматического регулирования (САР) с дискретной или плавной регулировкой параметров, выполненных на интегральных операционных усилителях.

Ряд операционных усилителей работает в инвертирующем режиме. Это необходимо учитывать при оценке результатов эксперимента.

При этом не исключается выполнение лабораторной работы с помощью моделирования работы двигателя на компьютере. Следует использовать пакеты прикладных программ типа *Siam*, *Electronic Work Bench* и др.

1.4. Порядок выполнения лабораторной работы

1.4.1. Собрать схему модели двигателя постоянного тока независимого возбуждения по варианту № 2 структурной схемы (рис. 3). Рекомендуется использовать 4-е, 5-е и 6-е звенья наборного поля. Задающее и воз-

мушающее воздействия взять от источника напряжения, они обозначены переменными X и Z .

1.4.2. Настроить схему модели двигателя, обращая внимание на недопустимость работы звеньев в нелинейном режиме и, прежде всего, в области насыщения. Наладку производить с помощью осциллографа при очередном многократном нажатии кнопок «ПУСК» – «СБРОС» на лабораторной стенде во всем предполагаемом диапазоне изменения переменных X и Z . При обнаружении нелинейного режима следует изменить параметры настройки звеньев.

1.4.3. Воспроизвести процесс, соответствующий ступенчатому пуску двигателя вхолостую, подаче и сбросу нагрузки, зафиксировав кривые переходных процессов тока якорной цепи и частоты вращения вала электродвигателя. На осциллограммах указать масштаб переменных и времени.

1.4.4. Воспроизвести процесс, соответствующий ступенчатому пуску двигателя под нагрузкой, фиксируя величины, указанные в п. 1.4.3.

1.4.5. Исследовать влияние индуктивности якорной цепи на характер переходных процессов.

1.4.6. Исследовать влияние момента инерции на характер переходных процессов.

1.4.7. Снять электромеханические характеристики двигателя для трех фиксированных значений напряжения питания путем регистрации установившихся значений частоты вращения вала двигателя и тока якорной цепи при плавном изменении нагрузки (переменная Z).

При обнаружении «дрейфа нуля» операционных усилителей нажать кнопку «СБРОС», затем «ПУСК», и по окончании переходного процесса зарегистрировать установившиеся значения переменных.

1.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- схему набора модели двигателя с указанием всех передаточных функций и переменных;
- осциллограммы переходных процессов по п. 1.4.3 – 1.4.6;
- электромеханические характеристики двигателя по п. 1.4.7;
- выводы.

Необходимо ответственно отнестись к формулировке выводов: выявить закономерности, оценить степень совпадения экспериментальных зависимостей с теоретическими, объяснить причину имеющихся расхождений.

1.6. Контрольные вопросы

1.6.1. Выведите передаточную функцию двигателя по каналу ток якоря – напряжение питания.

1.6.2. Выведите передаточную функцию двигателя по каналу ток якоря – момент статического сопротивления.

1.6.3. Определите порядок астатизма двигателя по задающему и возмущающему воздействиям, если регулируемой величиной является:

- а) частота вращения;
- б) ток якорной цепи.

1.6.4. Предложите способ экспериментального определения электромагнитной постоянной времени якорной цепи.

1.6.5. Двигатель включен по схеме, соответствующей рис. 1. Как изменятся установившиеся значения частоты вращения и тока якорной цепи, если добавочное сопротивление уменьшено в 2 раза, при условии:

- а) момент статического сопротивления на валу остается постоянным;
- б) момент статического сопротивления равен нулю?

1.6.6. Какими будут установившиеся значения частоты вращения и тока якоря при пуске двигателя с обрывом в цепи обмотки возбуждения?

1.6.7. На рис. 6 приведены естественная (1) и искусственные (2, 3) механические характеристики двигателя. Он может работать при M_{c1} и M_{c2} . В каком соотношении находятся токи якорной цепи при работе двигателя в рабочих точках a, b, c, d, e, f ? Ответ пояснить.

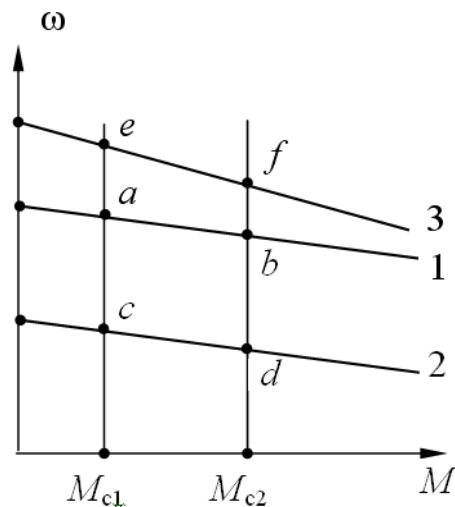


Рис. 6. Механические характеристики двигателя

1.6.8. На рис. 7 показана схема пуска ДПТ. Что на рисунке изображено неверно?

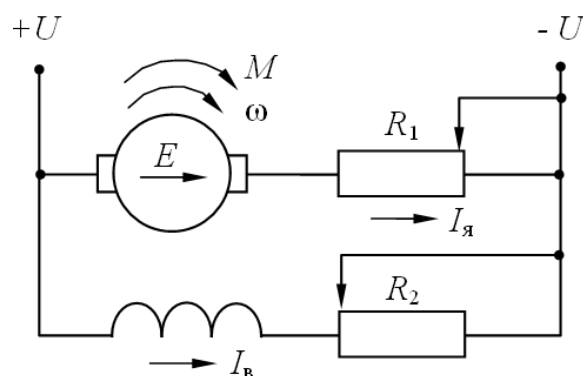


Рис. 7. Схема пуска двигателя постоянного тока

1.6.9. ДПТ с параллельным возбуждением работает в точке 1 естественной характеристики при $M_c = \text{Const}$ (рис. 8). В какой точке будет новый

установившийся режим работы, если напряжение в сети U уменьшилось в 2 раза? Магнитный поток двигателя считать пропорциональным току возбуждения.

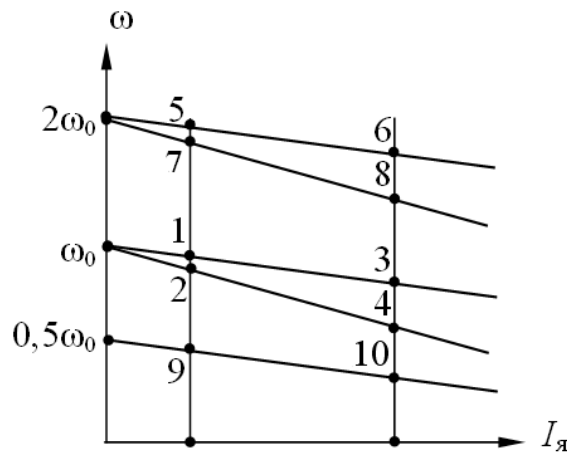


Рис. 8. Электромеханические характеристики двигателя

1.6.10. Обмотка якоря ДПТ питается от стабилизированного источника тока, а обмотка возбуждения – от источника напряжения. Определите:

- а) вид механической характеристики двигателя;
- б) закон изменения частоты вращения в функции времени ($M > M_c$).

1.6.11. Предложите принципиальную схему стенда для регистрации механических характеристик ДПТ в двигательном и тормозных режимах и подберите необходимые для этого измерительные приборы.

1.6.12. Изобразите естественные и искусственные механические характеристики двигателя при изменении напряжения питания, добавочного сопротивления и магнитного потока.

1.6.13. Опишите лабораторную установку и сформулируйте основные результаты выполненной лабораторной работы.

1.6.14. Опишите порядок выполнения лабораторной работы с указанием действий на лабораторном стенде. Порядок выполнения лабораторной работы следует пояснять в соответствии с п. 1.4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ**

2.1. Цель работы

Изучение статических и динамических характеристик системы автоматической стабилизации скорости вращения электродвигателя. Выявление влияния типовых обратных связей на характер переходных процессов.

2.2. Основные положения

В установившемся режиме основным показателем работы системы стабилизации скорости вращения электропривода служит относительный перепад скорости при известном изменении момента статического сопротивления, т. е. жесткость (статизм) статической характеристики системы.

Требования к величине статизма возрастают с увеличением диапазона регулирования $D = \frac{\omega_{\text{макс}}}{\omega_{\text{мин}}}$. Статизм замкнутой системы будет максимальным при минимальной скорости вращения:

$$S_{\text{макс}} = \frac{\Delta\omega_c}{\omega_0} \cdot D. \quad (11)$$

В переходных режимах качество системы стабилизации определяется быстродействием, перерегулированием и числом колебаний при ограничениях по току, моменту или ускорению по задающему воздействию и по возмущающему воздействию (подаче нагрузки и сбросе нагрузки). На рис. 9 показан примерный вид кривых изменения скорости и момента двигателя при ударном приложении нагрузки. Наибольшее отклоне-

ние скорости от ее начального значения называют *динамическим падением скорости* ($\Delta\omega_{\text{дин}}$), а отклонение скорости, соответствующее новому установившемуся режиму – *статическим падением скорости* ($\Delta\omega_{\text{с}}$).

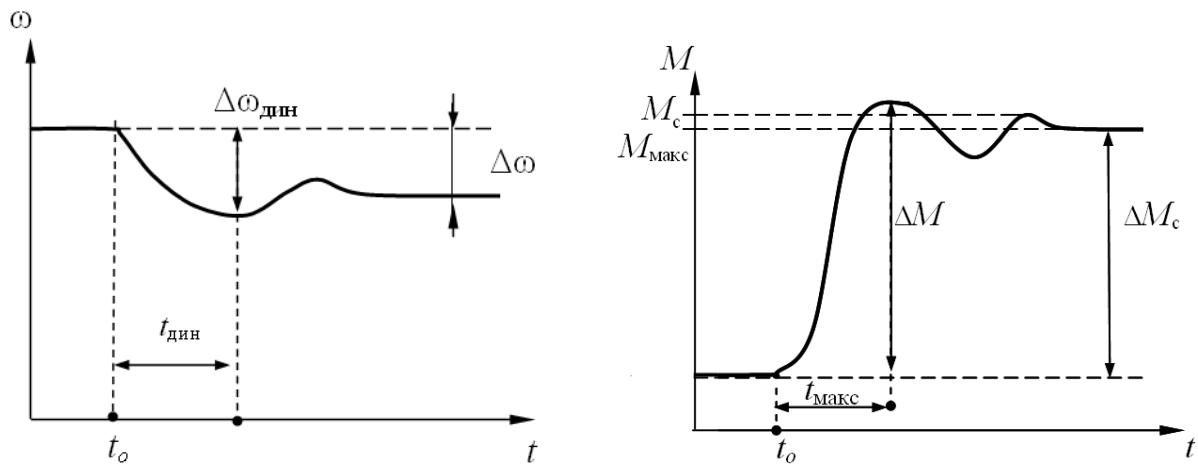


Рис. 9. Кривые изменения скорости и момента двигателя при ударном приложении нагрузки

Отношения $\frac{\Delta\omega_{\text{дин}}}{\Delta\omega_{\text{с}}}$ и $\frac{\Delta M_{\text{макс}}}{\Delta M_{\text{с}}}$ характеризуют перерегулирование по скорости и по моменту соответственно, время $t_{\text{макс}}$ или $t_{\text{дин}}$ – быстроедействие системы управления электропривода. В системах стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока параллельного действия применяют жесткие обратные связи по напряжению преобразователя, току якорной цепи, скорости; гибкие обратные связи по скорости и другим переменным. Для анализа в лабораторной работе принята система с отрицательной обратной связью по скорости и положительной (или отрицательной) связью по току нагрузки (рис. 10).

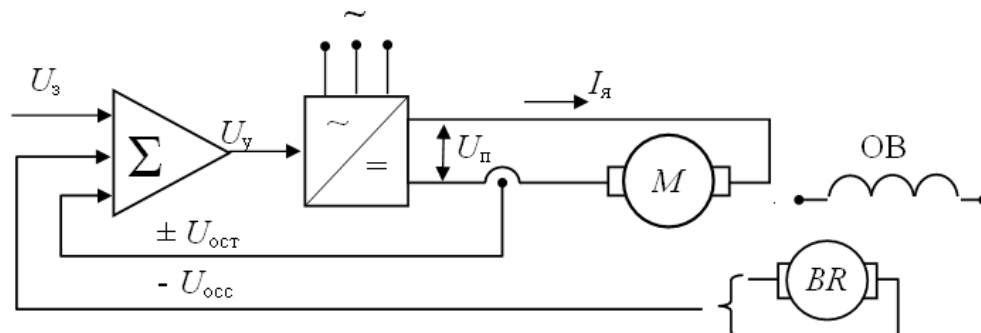


Рис. 10. Система стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока

Установившийся режим стабилизации скорости по цепи якоря двигателя

Структурная схема системы стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока параллельного действия приведена на рис. 11. Для получения жестких статических характеристик система применяет отрицательную обратную связь по скорости и положительную по току.

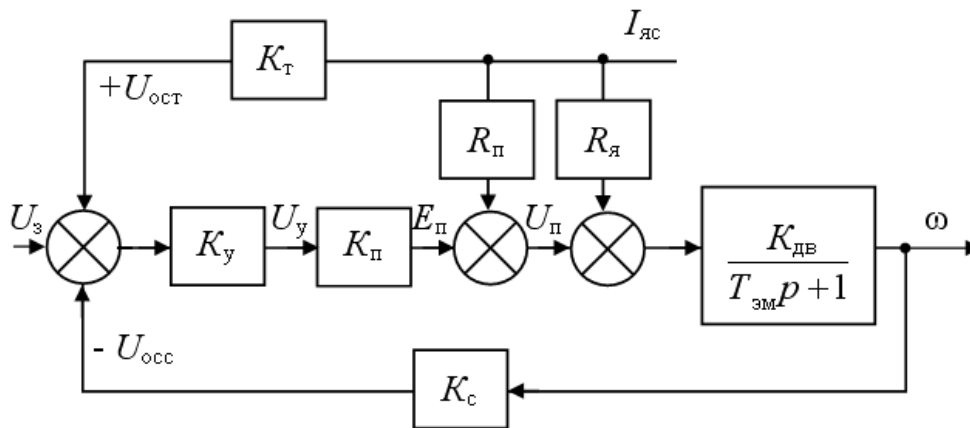


Рис. 11. Структурная схема системы стабилизации скорости вращения двигателя
постоянного тока параллельного действия

Этой схеме соответствует уравнение статической характеристики:

$$\omega = \frac{K_y K_p K_{дв}}{1 + K_y K_p K_{дв} K_c} \cdot U_3 \frac{(R_p + R_a) - K_y K_p K_t}{1 + K_y K_p K_{дв} K_c} K_{дв} I_{яс}. \quad (12)$$

Как следует из (12), при замыкании системы только отрицательной обратной связью по скорости (необходимо принять $K_t=0$) жесткость статической характеристики повышается по сравнению с разомкнутой системой в $(1 + K)$ раз, где $K = K_y K_p K_{дв} K_c$.

В системе с положительной обратной связью по току нагрузки (принять $K_c = 0$) теоретически может быть получена любая степень статизма привода. На практике необходимо иметь виду два явления:

- нелинейность регулировочной характеристики преобразователя;

– нестабильность параметров электродвигателя, в частности, зависимость сопротивления якорной обмотки от температуры.

Эти явления вызывают отклонение действительных параметров настройки системы от расчетных, поэтому положительная обратная связь по току применяется как дополнительная к основной связи по скорости, когда с одной обратной связью по скорости не удастся обеспечить необходимую жесткость статической характеристики.

Динамика системы параллельного действия по задающему воздействию

Структурная схема системы параллельного действия по задающему воздействию приведена на рис. 12.

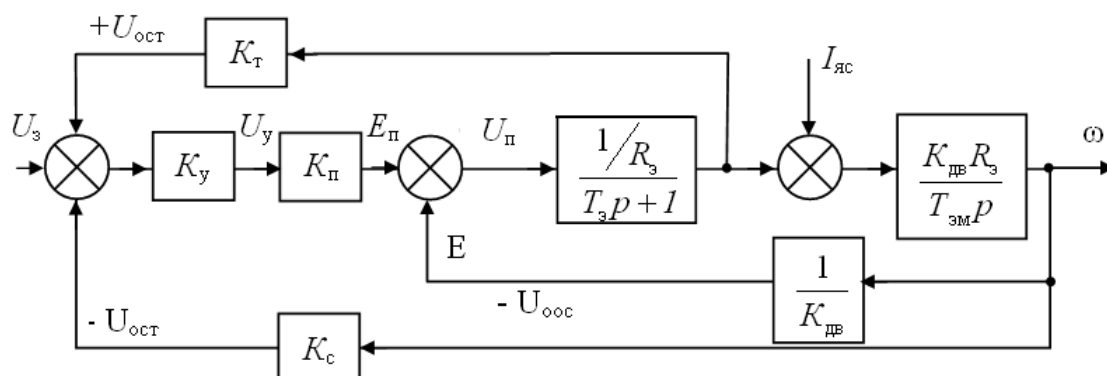


Рис. 12. Структурная схема системы параллельного действия по задающему воздействию

Система с отрицательной обратной связью по скорости

Пусть усилитель и преобразователь являются безынерционными звеньями. Передаточная функция системы по задающему воздействию:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_3(p)} = \frac{K_y K_{\pi} K_{\text{дв}}}{T_{\text{эм}} p (T_{\text{з}} p + 1) + 1 + K_y K_{\pi} K_{\text{дв}} K_{\text{с}}}. \quad (13)$$

Разделив числитель и знаменатель правой части формулы (13) на $(1 + K_y K_{\pi} K_{\text{дв}} K_{\text{с}})$ получаем:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_3(p)} = \frac{K_y K_{\pi 1} K_{дв}}{T_{эм1} T_э p^2 + T_{эм1} p + 1}, \quad (14)$$

где $T_{эм1} = \frac{T_{эм}}{1+K}$ – эквивалентная электромеханическая постоянная времени двигателя;

$K_{\pi 1} = \frac{K_{\pi}}{1+K}$ – эквивалентный коэффициент передачи преобразователя.

K – коэффициент передачи разомкнутой системы ($K = K_y K_{\pi} \times \times K_{д} K_{с}$).

Из выражения (14) следует, что отрицательная обратная связь по скорости ухудшает демпфирование системы.

Система с отрицательными обратными связями по скорости и току

Для анализа данной системы методами теории автоматического управления (ТАУ) рекомендуется выполнить ее структурное преобразование, например так, как показано на рис. 13, где точка ввода сигнала обратной связи по току перенесена на выход преобразователя, а точка ввода сигнала внутренней обратной связи по ЭДС – на вход усилителя.

Передаточная функция системы с двумя обратными связями по задающему воздействию:

$$W(p) = \frac{\omega(p)}{U_3(p)} = \frac{K_y K_{\pi 1} K_{дв}}{T_{эм2} p (T_э p + 1) + 1}, \quad (15)$$

$$T_{эм2} = \frac{T_{эм} (K_y K_{\pi 1} K_{дв} + R_э)}{R_э (1+K)},$$

где $T_{эм2}$ – эквивалентная электромеханическая постоянная времени двигателя при наличии обратных связей по скорости и току.

Из выражения (15) следует, что введение отрицательной обратной связи по току уменьшает колебательность системы.

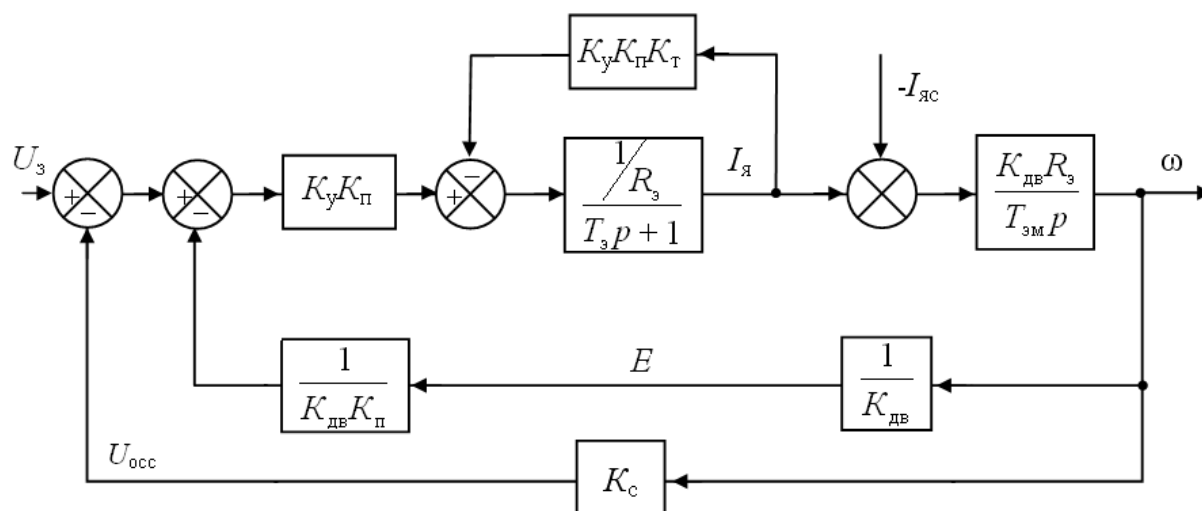


Рис. 13. Структурное преобразование системы с отрицательными обратными связями

Динамика системы параллельного действия по возмущающему воздействию

Ограничимся здесь напоминанием того, что при анализе системы по возмущающему воздействию методами ТАУ в качестве выходной переменной может рассматриваться как скорость вращения двигателя, так и движущий момент (текущее значение тока якорной цепи). Тогда для получения передаточной функции системы по возмущающему воздействию рекомендуется выполнить необходимые структурные преобразования.

2.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная работа проводится на универсальном стенде путем исследования модели системы стабилизации скорости вращения двигателя (рис. 14).

Звенья 7, 8, 9 стенда, выполняющие роль датчиков напряжения преобразователя тока якорной цепи и скорости вращения, имеют регулируемые коэффициенты передач и от -10 до $+10$. Этим можно воспользоваться для формирования необходимого знака обратной связи.

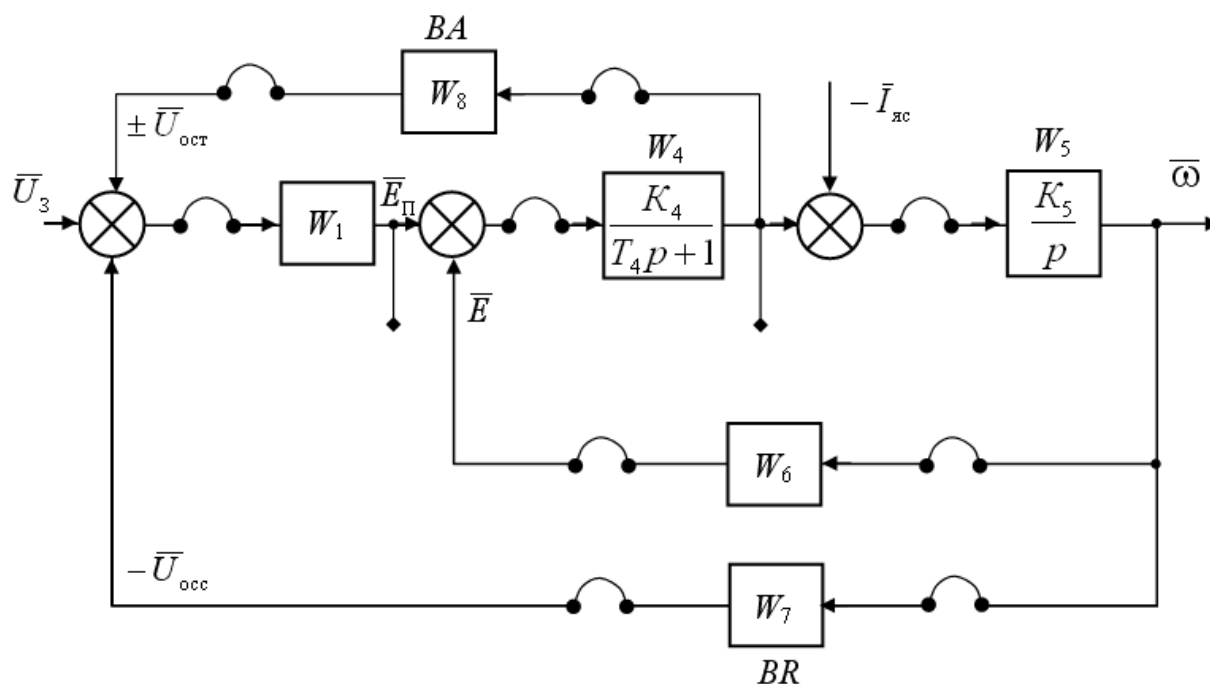


Рис. 14. Лабораторная установка для исследования системы стабилизации скорости вращения двигателя

2.4. Порядок выполнения лабораторной работы

2.4.1. Набрать на стенде схему модели двигателя (аналогичную лабораторной работе № 1) и убедиться в её работоспособности, обращая внимание, прежде всего, на отсутствие ограничений выходных сигналов элементов. В дальнейшем параметры модели двигателя не изменять.

2.4.2. Добавить в схему звено 1 в режиме безынерционного звена, установить его коэффициент передачи по заданию преподавателя и снять статическую характеристику разомкнутой системы. Отметить значение напряжения задания, при котором система переходит в нелинейный режим.

2.4.3. Настроить звено 8 для выполнения положительной обратной связи по току и звено 7 – отрицательной обратной связи по скорости.

2.4.4. Снять 2-3 статические характеристики замкнутых систем при следующих видах обратных связей:

- отрицательной по скорости;

- положительной по току якоря;

изменяя и измеряя коэффициенты связей.

При исследовании системы с положительной обратной связью по току необходимо, прежде всего, экспериментально подобрать такой коэффициент передачи датчика тока, при котором характеристика становится абсолютно жесткой. Две другие статические характеристики получить при меньшем и большем значениях коэффициента передачи датчика.

2.4.5. Исследовать динамику системы по задающему и возмущающему воздействиям при следующих видах обратных связей:

- отрицательной по скорости;
- отрицательной по скорости и положительной по току;
- отрицательных по скорости и току.

Перестройте звено 8 для реализации отрицательной обратной связи.

2.4.6. Исследовать статические и динамические свойства системы с отрицательной обратной связью по скорости при пропорционально-интегральном регуляторе (звено 1).

Установить и в дальнейшем не изменять коэффициент передачи датчика скорости (звено 7). Выявить влияние коэффициента передачи и постоянной времени интегрирования ПИ-регулятора.

2.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- схему набора модели системы стабилизации скорости вращения;
- статические характеристики;
- графики переходных процессов;
- выводы.

2.6. Контрольные вопросы

2.6.1. Выведите уравнения статической характеристики:

- разомкнутой системы;
- замкнутой системы с отрицательной обратной связью по напряжению преобразователя.

Проанализируйте полученные уравнения.

2.6.2. В ТАУ различают понятия ошибки регулирования и сигнала ошибки регулирования по задающему и возмущающему воздействиям. Напишите уравнение связи ошибки регулирования и сигнала ошибки регулирования для системы с отрицательной обратной связью по скорости.

2.6.3. Каковы методы получения астатической системы стабилизации скорости?

2.6.4. Определите по экспериментальным данным коэффициенты передачи замкнутой системы по задающему и возмущающему воздействиям.

2.6.5. Как записывается в общем виде уравнение динамики системы с одним выходом и двумя входами?

2.6.6. Для чего в систему стабилизации скорости вводится гибкая обратная связь? В виде какого типового звена она выполняется?

2.6.7. Как влияет коэффициент передачи разомкнутого контура или его составляющих на вид переходного процесса и устойчивость системы?

2.6.8. При каких допущениях двигатель постоянного тока имеет структурную схему, приведенную на рис. 12?

2.6.9. Как изменятся результаты экспериментов, если принять преобразователь инерционным звеном?

2.6.10. Как изменятся частота вращения и ток якорной цепи двигателя в статической и астатической системах стабилизации частоты вращения, если нарушена механическая связь тахогенератора с двигателем (рис. 11)?

2.6.11. Статизм замкнутой системы стабилизации частоты вращения, определенный при номинальных значения U_z и M_c , равен 0,04. Необходимо, чтобы статическая ошибка во всем диапазоне регулирования не превышала 15 %. Выполняется ли это требование при диапазоне регулирования $D = 100$?

2.6.12. Приведите примеры систем стабилизации скорости электропривода постоянного тока, используемых в промышленности.

2.6.13. Приведите структурную схему системы параллельного действия по задающему воздействию и опишите ее.

2.6.14. Поясните систему стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока параллельного действия в общем виде.

2.6.15. Опишите лабораторную установку и сформулируйте основные результаты выполненной лабораторной работы.

2.6.16. Опишите порядок выполнения лабораторной работы с указанием действий на лабораторном стенде. Порядок выполнения лабораторной работы следует пояснять в соответствии с п. 2.4.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. Цель работы

Изучение экспериментальной методики синтеза двухконтурной системы подчиненного регулирования скорости вращения электропривода постоянного тока.

3.2. Основные положения

Принципиальная схема типовой двухконтурной системы подчиненного регулирования электропривода приведена на рис. 15.

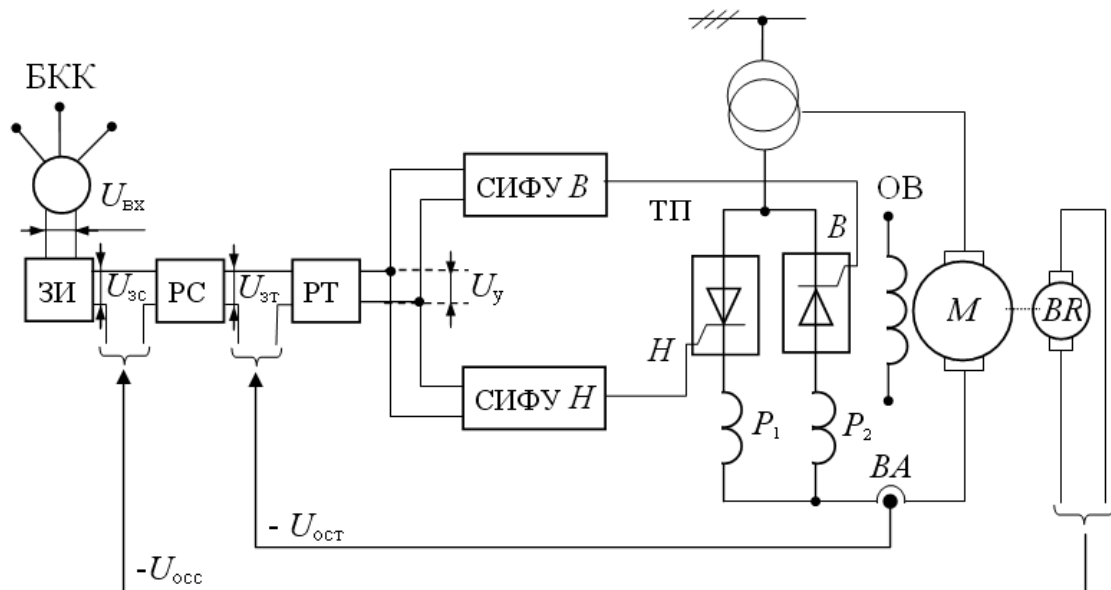


Рис. 15. Принципиальная схема типовой двухконтурной системы подчиненного регулирования электропривода

Система содержит реверсивный тиристорный преобразователь ТП с двумя комплектами тиристоров В и Н, включенных встречно-параллельно, и с соответствующими системами импульсно-фазового управления СИФУ В и СИФУ Н.

Для ограничения уравнительного тока включены реакторы P_1 и P_2 ; для формирования благоприятных переходных процессов при пуске и реверсе – задатчик интенсивности ЗИ и бесконтактный командоаппарат БКК.

В системе подчиненного регулирования i -й контур представляется в виде объекта регулирования и регулятора. В передаточную функцию объекта включают кроме непосредственно объекта регулирования датчик регулируемой величины и преобразователь энергии. Это позволяет представить i -й контур регулирования структурной схемой с единичной отрицательной обратной связью.

В большинстве случаев объект регулирования задан и необходимо создать регулятор, соответствующий данному объекту. От регулятора требуется высокое быстродействие и точность поддержания регулируемой величины на требуемом уровне, т. е. чтобы в установившемся режиме ошибка регулирования была минимальной или отсутствовала. В замкнутых системах нулевая статическая ошибка означает, что коэффициент передачи этой системы равен 1.

Быстродействие регулятора оценивается минимальным временем реакции регулятора на ступенчатое управляющее воздействие.

В случае, когда объект регулирования является апериодическим звеном с передаточной функцией $W(p) = \frac{K_0}{T_0 p + 1}$, для компенсации постоянной

времени объекта применяют ПИ-регулятор с передаточной функцией

$W_p(p) = \frac{T_{из} p + 1}{T_b p}$. Передаточная функций регулятора содержит в числителе

многочлен, соответствующий форсирующему звену, постоянная времени которого может быть выбрана равной постоянной времени объекта $T_{из} = T_0$.

Тогда передаточные функции разомкнутого и замкнутого контуров регулирования имеют вид:

$$\begin{cases} W_{\text{раз}}(p) = W_p(p) \cdot W_o(p) = \frac{K_o}{T_{\text{и}} p} = \frac{1}{\tau p}, \\ W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} = \frac{1}{\tau p + 1}. \end{cases} \quad (16)$$

Таким образом, применение ПИ-регулятора в замкнутой системе регулирования, где объект регулирования описывается простым апериодическим звеном, приводит к тому, что замкнутая система регулирования имеет передаточную функцию также апериодического звена, но с постоянной времени $\tau = \frac{T_{\text{и}}}{K_0}$, которая может быть получена любой малой величины за счет увеличения коэффициента передачи объекта регулирования K_0 или выбора таких параметров регулятора, при которых постоянная времени интегрирования $T_{\text{и}}$ станет малой величиной.

Принцип последовательной коррекции предусматривает деление объекта регулирования на последовательно соединенные звенья, которые, как правило, содержат одну постоянную времени, подлежащую компенсации. Выходные сигналы каждой части объекта являются регулируемыми переменными и для каждой регулируемой переменной строится свой замкнутый контур, содержащий соответствующую часть объекта регулирования и регулятор. На входе каждого регулятора сравниваются сигналы, пропорциональные заданному и действительному значениям регулируемой величины. Выходной сигнал регулятора является задающим воздействием последующего замкнутого контура.

Если в объекте регулирования есть обратная связь, то необходимо оценить ее влияние на показатели процесса регулирования и сделать вывод о необходимости ее компенсации структурными методами. В двигателе постоянного тока существует обратная связь по ЭДС вращения. Ее влиянием пренебрегают в случае, когда выполняется условие:

$$T_{\text{эм}} + 0,2 T_{\text{э}} > 5 T_{\text{тп}}.$$

В теории систем подчиненного регулирования рассматриваются случаи применения П-, ПД-, ПИ-, ПИД-регуляторов при оптимизации i -го контура в соответствии с условиями модульного или симметричного оптимумов.

Требования модульного оптимума

1. Точная компенсация действия больших инерционностей ($T_{из} = T_0$);
2. Выбор коэффициентов демпфирования $a_1 = a_2 = \dots = a_i = 2$;
3. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика разомкнутого контура имеет частоту среза $\omega_{ср} = 0,5\sigma$. Запас по амплитуде, на частоте сопряжения $\omega_c = 1/\sigma$ равен 6 дБ.

При выполнении этих условий максимальное перерегулирование при реакции системы на единичный скачок составляет 4,3 %, а время переходного процесса, определяемое моментом входа переходной характеристики в зону 5 % является минимальным и составляет 4,7 суммы малых постоянных времени контура σ .

Требования симметричного оптимума

1. Коэффициент пропорционального усиления регулятора выбирается из условия модульного оптимума.
2. Время изодрома (ПИ- или ПИД-регулятора) принимается равным учетверенной сумме малых постоянных времени контура.
3. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика имеет частоту среза $\omega_{ср} = 0,5\sigma$ и частоты сопряжения $\omega_{c1} = 0,25\sigma$ и $\omega_{c2} = 1/\sigma$. Запасы по амплитуде на частотах сопряжения соответственно равны +6 дБ и –6 дБ. При настройке контура в соответствии с указанными требованиями переходный процесс имеет перерегулирование 43,4 % и время достижения установленного значения $3,1 \sigma$.

Выше приведены показатели качества процесса регулирования замкнутого контура при ступенчатом задающем воздействии. Если при разработке системы регулирования основными являются показатели процесса

регулирования по возмущающему воздействию, то следует руководствоваться рекомендациями по применению различных типов регуляторов и их целесообразных настроек, представленных табл. 2.

Настройка многоконтурной системы подчиненного регулирования достигается последовательной оптимизацией контуров, начиная с внутреннего и заканчивая внешним.

Таблица 2

Рекомендациями по применению регуляторов и их настроек

Тип объекта $W_o(p)$	Соотношение постоянных времени	Тип регулятора	Условия настройки
$\frac{K}{(T_1 p + 1) \cdot (\sigma p + 1)}$	$4\sigma > T_1$	ПИ	МО
	$4\sigma < T_1$	ПИ	СО
	$4\sigma \ll T_1$	И	МО
$\frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(\sigma p + 1)}{T_1 > T_2}$	$4\sigma > T_1$	ПИД	МО
	$4\sigma < T_1$	ПИД	СО
	$4\sigma \ll T_1$	ПД	МО
$\frac{K}{p(\sigma p + 1)}$ $K = \frac{1}{T_o}$	$4\sigma > T_1$	ПИ	СО
	$4\sigma < T_1$	ПИ	СО
	$4\sigma \ll T_1$	П	МО
$\frac{K}{p(T_1 p + 1)(\sigma p + 1)}$ $K = \frac{1}{T_o}$	$4\sigma > T_1$	ПИД	СО
	$4\sigma < T_1$	ПИД	СО
	$4\sigma \ll T_1$	ПД	МО

В системе регулирования, приведенной на рис. 15, существует контур регулирования тока (внутренний), содержащий якорную цепь ДТП, тиристорный преобразователь ТП и датчик тока ВА, и контур регулирования скорости (внешний), содержащий звено механического равновесия ДТП,

замкнутый и оптимизированный контур тока, регулятор скорости РС и датчик скорости BR.

Компенсирруемыми постоянными времени являются электромагнитная $T_э$ и электромеханическая $T_{эм}$. Постоянную времени тиристорного преобразователя $T_{тп}$ принято считать малой некомпенсируемой постоянной времени (рис. 16).

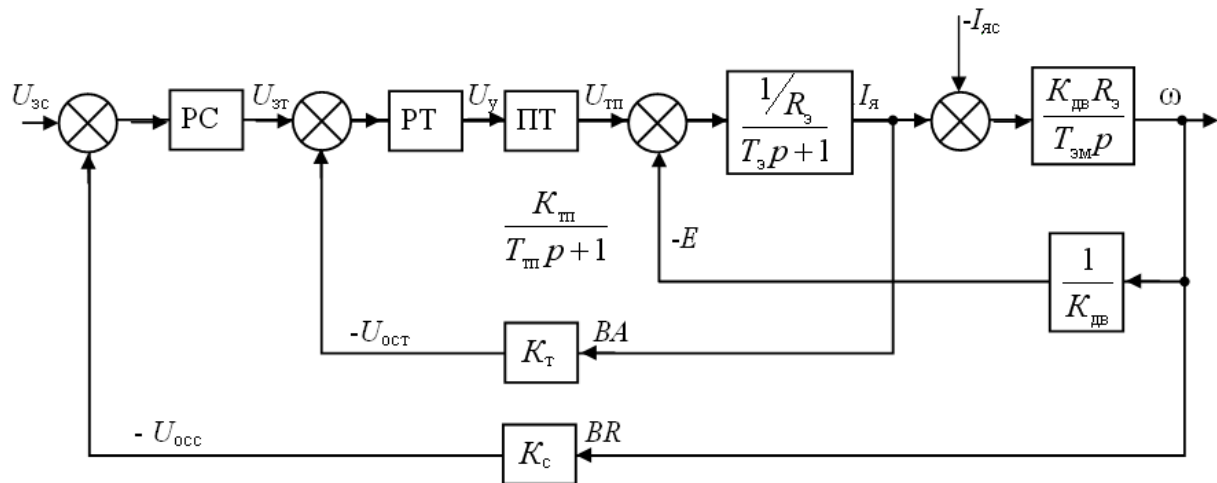


Рис. 16. Структурная схема САР

3.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная работа проводится на универсальном стенде путем исследования модели системы подчиненного регулирования (рис. 17). Звенья с передаточными функциями $W_1(p)$ и $W_2(p)$ выполняют функции регуляторов скорости и тока. Модель двигателя содержит звенья $W_4(p)$, $W_5(p)$ и $W_6(p)$. Датчики тока и скорости реализованы на звеньях $W_7(p)$, и $W_8(p)$. ПИ-регулятор выполняется на стенде путем параллельного соединения пропорционального (регулируется K) и интегрального (регулируется $T_{и}$) регуляторов, т. е. его передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = K + \frac{1}{T_{и} p} = \frac{KT_{и} p + 1}{T_{и} p} = \frac{T_{из} p + 1}{T_{и} p}. \quad (18)$$

Следовательно, постоянная времени изодрома ПИ-регулятора устанавливается на стенде совместными изменениями K и $T_{\text{и}}$.

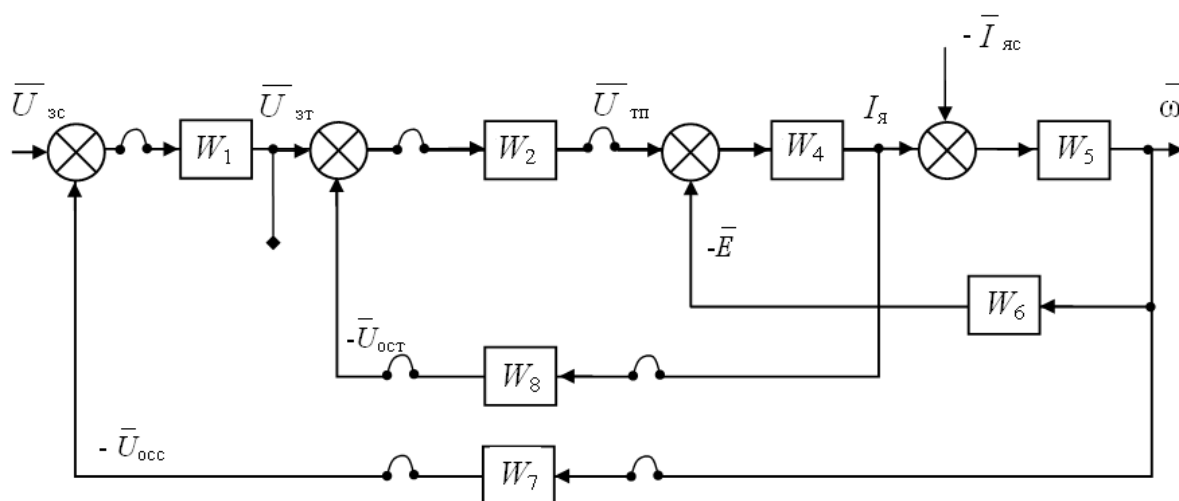


Рис. 17. Схема лабораторной работы

3.4. Порядок выполнения лабораторной работы

3.4.1. Набор на стенде системы подчиненного регулирования рекомендуется начать с модели двигателя постоянного тока. После проверки ее работоспособности разомкнуть цепь внутренней обратной связи по ЭДС двигателя и определить экспериментально параметры всех звеньев модели двигателя.

3.4.2. Включить регуляторы тока и скорости в режиме П-регуляторов и установить $K_{\text{рс}} = K_{\text{рт}} = 1$, после чего настроить звенья $W_7(p)$ и $W_8(p)$ для реализации отрицательных обратных связей.

3.4.3. Включить датчик тока и настроить контур тока в следующей последовательности:

- регулятор тока перевести в режим ПИ-регулятора;
- установить минимальное значение постоянной времени интегрирования;
- регистрируя графики $I_{\text{я}} = f(t)$ при различных значениях коэффициентов передачи регулятора K и, следовательно, $T_{\text{из}}$, получить оптимальный

переходный процесс по задающему воздействию.

3.4.4. Включить датчик скорости и настроить контур скорости для двух вариантов:

- регулятор скорости – пропорциональный (модульный оптимум);
- регулятор скорости – пропорционально-интегральный (симметричный оптимум).

Во всех случаях необходимо фиксировать графики $\omega = f(t)$ при скачке задающего воздействия. После оптимизации контура скорости по каждому варианту необходимо зарисовать переходные процессы $I_{\text{я}} = f(t)$ при пуске и набросе нагрузки.

3.4.5. Включить обратную связь по ЭДС двигателя и оценить ее влияние на показатели качества процесса регулирования по задающему и возмущающему воздействиям для каждого контура регулирования.

3.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- цель работы;
- схему набора модели системы подчиненного регулирования;
- графики переходных процессов;
- выводы.

3.6. Контрольные вопросы

3.6.1. В чем заключается физический смысл компенсации действия инерционности с помощью ПД- и ПИ-регуляторов?

3.6.2. Каков физический смысл постоянной времени интегрирования и постоянной времени изодрома ПИ-регулятора?

3.6.3. Приведите принципиальную схему ПИ-регулятора на основе интегрального операционного усилителя при инвертирующем и неинвертирующем включении.

3.6.4. Из каких соображений выбирается желаемая передаточная функция разомкнутого контура?

3.6.5. Почему оптимизированный контур тока можно принять за инерционное звено?

3.6.6. Определите по экспериментальным данным коэффициент передачи замкнутого контура тока по задающему воздействию. Является ли этот контур астатическим?

3.6.7. Настройка контура тока на модели производится без обратной связи по ЭДС вращения двигателя. Как выполнить это условие на практике?

3.6.8. Чему равен сигнал на входе П (ПИ)-регулятора скорости в установившемся режиме при следующих условиях:

а) $U_{zc} = l(t), I_{яc} = 0;$

б) $U_{zc} = K(t), I_{яc} = 0;$

в) $U_{zc} = l(t), I_{яc} \neq 0;$

г) $U_{zc} = K(t), I_{яc} \neq 0?$

3.6.9. В каких случаях целесообразна настройка контура скорости в соответствии с симметричным оптимумом?

3.6.10. Для i -го контура, имеющего одну компенсируемую и одну некомпенсируемую постоянные времени и оптимизированного по модульному оптимуму, постройте логарифмическую амплитудно-частотную характеристику.

3.6.11. Приведите принципиальную схему типовой двухконтурной системы подчиненного регулирования электропривода и поясните принцип ее работы.

3.6.12. В чем заключается принцип последовательной коррекции?

- 3.6.13. Сформулируйте требования модульного оптимума.
- 3.6.14. Сформулируйте требования симметричного оптимума.
- 3.6.15. Сравните качества процесса регулирования систем параллельного (лабораторная работа № 2) и последовательного (лабораторная работа № 3) действия и выявите их достоинства и области применения.
- 3.6.16. Приведите примеры применения систем подчиненного регулирования в станках и промышленных роботах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алиев, И. И.* Электрические машины : учеб. пособие / И. И. Алиев. – М.: ИД «РадиоСофт», 2011. – 446 с.
2. *Епифанов, А. П.* Основы электропривода : учеб. пособие / А. П. Епифанов. – СПб.: Лань, 2009. – 191 с.
3. *Желтогонов, А. П.* Электропривод в системах управления. Ч. 2 : Лабораторный практикум / А. П. Желтогонов, Л. Б. Иванов, Е. В. Коровина; ВолгГТУ. – Волгоград : РПК «Политехник», 2006. – 96 с.
4. *Ключев, В. И.* Теория электропривода : учеб. для вузов / В. И. Ключев. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 697 с.
5. *Михайлов, О. П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. Учебник для вузов / О. П. Михайлов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304с.
6. *Удут, Л.С.* Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 3. Электрические машины постоянного тока в системах автоматизированного электропривода: учебное пособие / Л. С. Удут, Н. В. Кояин, О. П. Мальцева. – 2-е изд. перераб. и доп. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 152 с.
7. *Терехов, В. М.* Системы управления электроприводов : учеб. для вузов / В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М.: Академия, 2005. – 304 с.