

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

**Методические указания по выполнению лабораторных работ для
студентов специальности
6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств»**

Витебск
2025

УДК 621.3.07

Составитель

В. Ф. Куксевич

Одобрено кафедрой «Автоматизация производственных процессов»
УО «ВГТУ», протокол № 8 от 20.02.2025.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 7 от 26.02.2025.

Автоматизированный электропривод. Системы автоматизированного электропривода постоянного тока : методические указания по выполнению лабораторных работ / сост. В. Ф. Куксевич, – Витебск : УО «ВГТУ», 2025. – 55 с.

Методические указания являются руководством к лабораторным работам по разделу «Системы автоматизированного электропривода постоянного тока» дисциплины «Автоматизированный электропривод» для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и содержат общие требования, предъявляемые к выполнению лабораторных работ, теоретические вопросы подготовки к ним; приводят подробное описание порядка выполнения лабораторных работ, получения статических характеристик исследуемых систем электропривода.

УДК 621.3.07

© УО «ВГТУ», 2025

Содержание

Общие требования к выполнению лабораторных работ	4
Лабораторная работа 1 <i>Исследование статических характеристик электропривода с ДПТ НВ</i>	5
Лабораторная работа 2 <i>Исследование разомкнутой системы УВ – ДПТ</i>	15
Лабораторная работа 3 <i>Исследование разомкнутой системы ШИП – ДПТ</i>	23
Лабораторная работа 4 <i>Исследование одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току</i>	30
Лабораторная работа 5 <i>Исследование одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости</i>	37
Лабораторная работа 6 <i>Исследование двухконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости и по току</i>	45
Литература	54

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Перед выполнением лабораторной работы обучающийся должен изучить описание предстоящей работы, соответствующий ей теоретический материал.

Отчет по выполненной лабораторной работе составляется каждым обучающимся индивидуально. При оформлении отчета обязательно соблюдение ГОСТа на буквенные и графические обозначения физических величин и элементов схем.

Графики изображаются в прямоугольной системе координат с указанием масштабов по осям координат.

Расчетные формулы приводятся сначала в общем виде, затем с подставленными числовыми значениями и ответом с указанием единиц измерения рассчитанной величины.

Если преподавателем будет предложено переделать какую-либо часть отчета, то в этом случае исправления вносятся в текст при помощи корректирующих материалов, с тем расчетом, чтобы исправленная работа представляла единое целое. Листы с большим числом исправлений следует переделать полностью.

В данном цикле работ исследуемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения является машина $M1 - 2ПБ90М$, в качестве нагрузочного устройства используется электромагнитная муфта $УВ1$.

При проведении эксперимента ток якоря исследуемого двигателя не должен превышать $2I_H = 2 \cdot 3,29 = 6,58 \text{ А}$. Следует избегать продолжительной работы при токах якоря, превышающих $I_H = 3,29 \text{ А}$, чтобы избежать перегрева двигателя.

Лабораторная работа 1

Исследование статических характеристик электропривода с ДПТ НВ

Цель работы: экспериментальное определение статических характеристик электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) при различных способах регулирования частоты вращения.

Теоретические сведения

К статическим характеристикам относятся зависимости, характеризующие работу электропривода в установившемся режиме: $\omega(M)$ – механическая характеристика и $\omega(I_{я})$ – электромеханическая характеристика.

Они могут быть получены из уравнений, описывающих процессы в двигателе.

$$U_{я} = I_{я}R_{яц} + E, \quad (1.1)$$

$$E = K\Phi\omega, \quad (1.2)$$

$$M = K\Phi I_{я}, \quad (1.3)$$

где K – конструктивный коэффициент двигателя, E – противоЭДС двигателя, $R_{яц}$ – сопротивление якорной цепи двигателя, Φ – магнитный поток в двигателе.

Из (1.1)–(1.3) получают уравнения электромеханической (1.4) и механической (1.5) характеристик:

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{K\Phi} I_{я}, \quad (1.4)$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2} M. \quad (1.5)$$

Рассмотрим характеристики для ДПТ НВ. Из выражений (1.4) и (1.5) следует, что электромеханическая и механическая характеристики такого электродвигателя представляют собой прямые линии. Снятые при номинальных параметрах питающей сети и указанной заводом-изготовителем схеме соединения, они являются наиболее жёсткими. Такие характеристики относят к *естественным*.

Если же параметры сети отличаются от номинальных или в какую-либо цепь электродвигателя включен добавочный элемент (активный, реактивный), то такие характеристики называются *искусственными*.

Построение искусственных характеристик производится в случае использования схем регулируемого электропривода. Регулирование частоты

вращения двигателей постоянного тока осуществляется тремя основными электрическими методами:

1) Регулирование изменением напряжения якорной цепи (якорное регулирование).

Якорное регулирование осуществляют с помощью отдельного регулируемого источника питания, в качестве которого, как правило, используют управляемый выпрямитель (УВ), выполненный на мощных тиристорах. С уменьшением напряжения $U_{я}$, подводимого к якорной цепи, частота вращения двигателя уменьшается. Увеличение $U_{я}$ относительно номинального напряжения двигателя недопустимо. Статические характеристики жесткие (рис. 1.1), а регулирование осуществляется только вниз от номинальной частоты вращения.

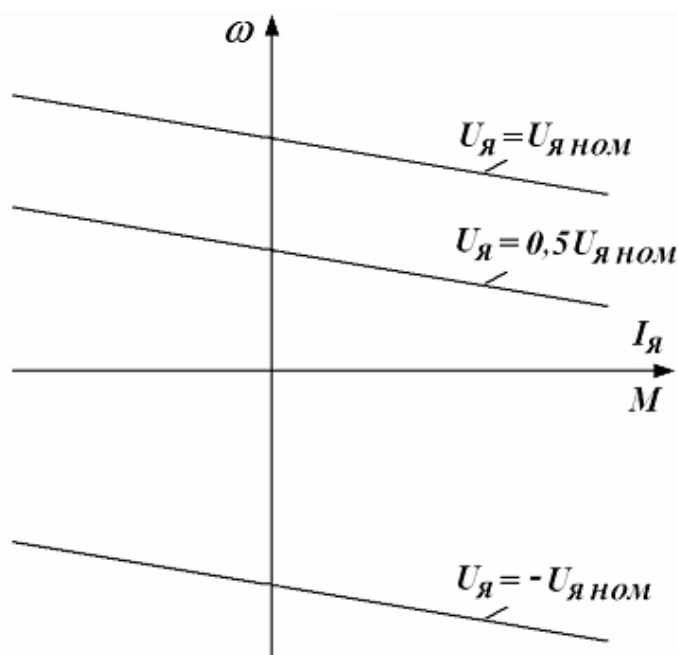


Рисунок 1.1 – Статические характеристики при якорном регулировании

2) Регулирование изменением магнитного потока (полюсное регулирование).

Осуществляется введением регулировочного реостата в цепь обмотки возбуждения двигателя или изменением напряжения, подводимого к обмотке возбуждения с помощью УВ. При увеличении сопротивления регулировочного реостата или уменьшении напряжения, подводимого от УВ, ток цепи возбуждения $I_{в}$ и магнитный поток возбуждения Φ уменьшатся, и согласно (1.4) частота вращения возрастет. Так как при больших значениях ω двигатель идет вразнос, увеличивается искрение под щетками, то уменьшение $I_{в}$ ограничивают минимальным пределом. Этот способ наиболее экономичен, поскольку ток возбуждения намного меньше тока якоря (для машин с

параллельным и смешанным возбуждением). Механические характеристики при разных значениях магнитного потока имеют вид:

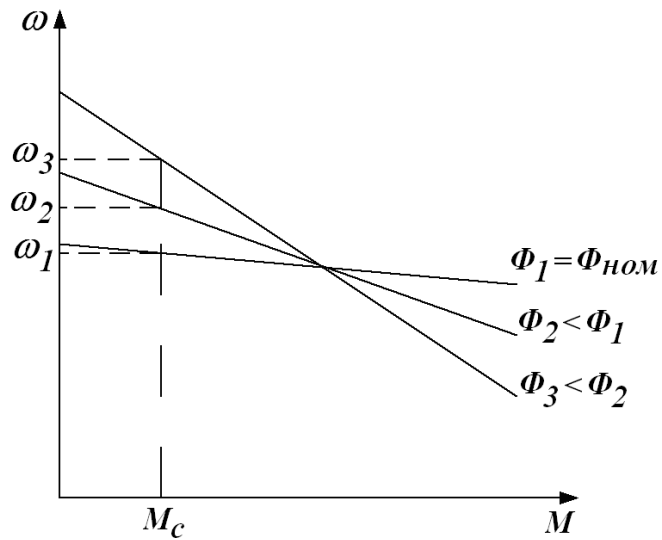


Рисунок 1.2 – Механические характеристики при полюсном регулировании

Электромеханические характеристики при регулировании магнитным потоком изображены на рисунке 1.3.

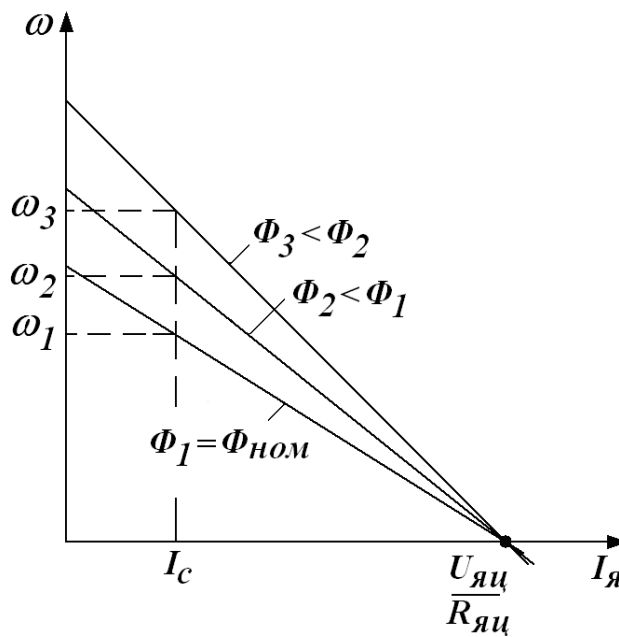


Рисунок 1.3 – Электромеханические характеристики при полюсном регулировании

3) Регулирование изменением сопротивления якорной цепи (реостатное регулирование).

Для изменения частоты вращения этим способом последовательно с обмоткой якоря включают регулировочный реостат, рассчитанный на длительную работу. Формулы для статических характеристик в этом случае имеют вид:

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{яц} + R_p}{K\Phi} I_{я}, \quad (1.6)$$

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi} - \frac{R_{яц} + R_p}{(K\Phi)^2} M. \quad (1.7)$$

где R_p – сопротивление реостата.

Из (1.6) и (1.7) видно, что введение дополнительного сопротивления в цепь якоря позволяет регулировать частоту вращения только вниз от номинальной частоты.

Механические характеристики для данного способа регулирования представлены на рисунке 1.4.

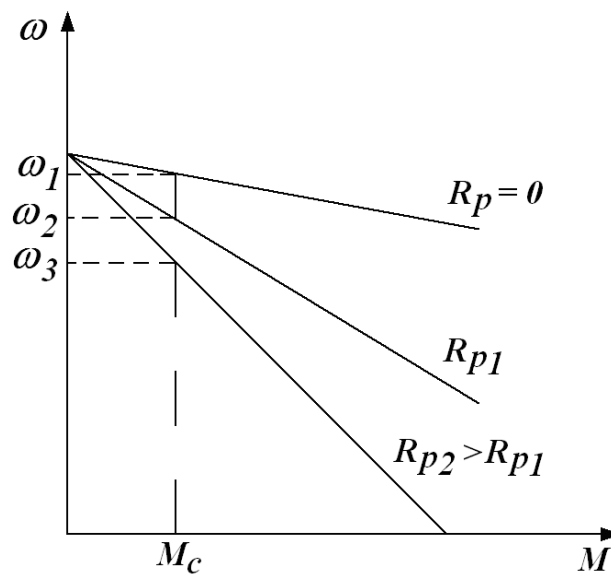


Рисунок 1.4 – Механические характеристики при реостатном регулировании

Данный метод регулирования имеет много недостатков:

- низкий КПД;
- небольшой диапазон регулирования (при уменьшении нагрузки диапазон регулирования будет уменьшаться, а при холостом ходе – вообще отсутствует);
- низкая жесткость статических характеристик (с увеличением R_p сильно изменяется наклон характеристик).

Поэтому на практике чаще этот способ применяют не для регулирования скорости, а для ограничения токов и моментов при пуске, торможении и реверсе двигателя постоянного тока.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему исследования статических характеристик электропривода с ДПТ НВ, представленную на рисунке 1.5.

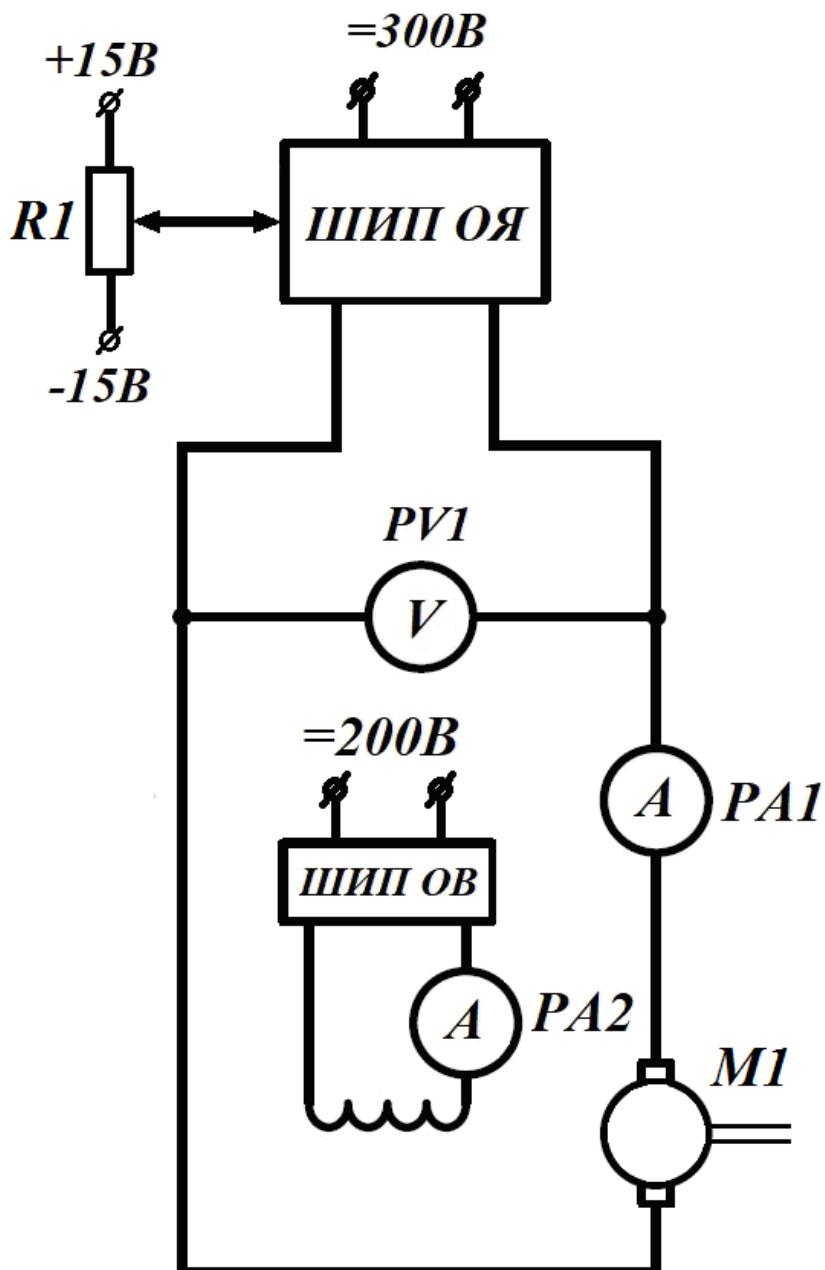


Рисунок 1.5 – Схема исследования статических характеристик электропривода с ДПТ НВ

2. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 1.6.

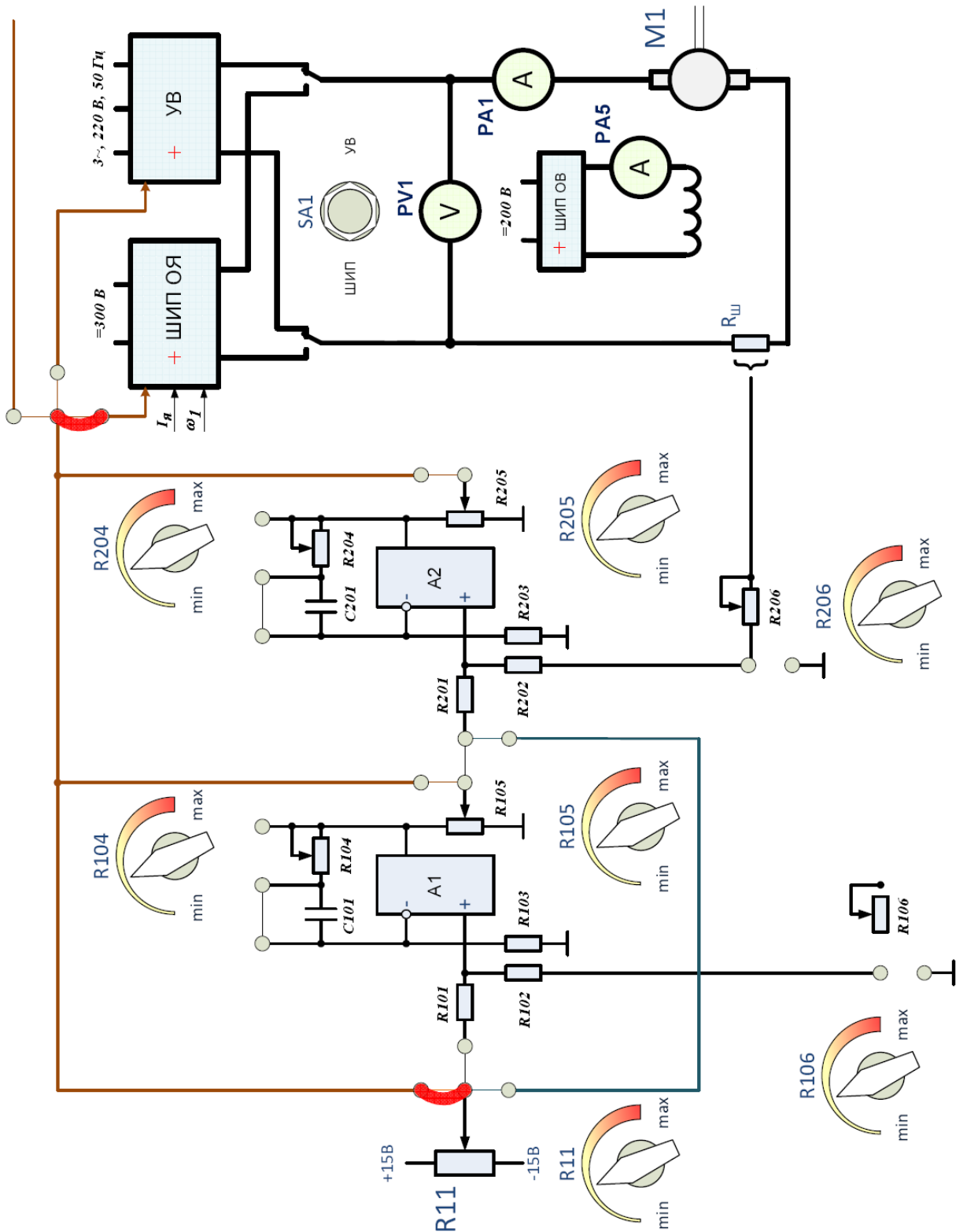


Рисунок 1.6 – Схема лабораторного стенда для исследования статических характеристик электропривода с ДПТ НВ

3. Перед включением стенда убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (*SA11, SA13, SA14, SA15, SA17, SA31, SA41*), находятся в положении «*Выключено*», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (*R13, R17, R31, R32, R41*) находятся в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки. Тумблер *SA1* перевести в положение «*ШИП*», тумблер *SA3* перевести в положение «*M1-M2*».

4. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «*Сеть*», расположенный в левой нижней части стенда).

5. Тумблером *SA13* включить *ШИП ОВ*.

6. Плавно увеличивая регулятором *R13* задание *ШИП ОВ*, установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя *0,18 А* (контролировать по амперметру *РА5*).

7. Регулятор *R11* установить в такое положение, при котором скважность *ШИП ОЯ* (контролировать по индикатору «*Скважность, %*») будет *50 %*.

8. Тумблером *SA11* включить *ШИП ОЯ*.

9. Плавно увеличивая регулятором *R11* задание *ШИП ОЯ*, установить номинальное значение напряжения якоря исследуемого двигателя *220 В* (контролировать по вольтметру *PV1*).

10. Для получения естественных механической и электромеханической характеристик тумблером *SA17* включить *ШИП1*.

11. Устанавливая регулятором *R17* момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору *M_{YB1}*) согласно значениям *M* таблицы 1.1, занести в таблицу 1.1 значения тока якоря (амперметр *РА1*) и скорости вращения двигателя (датчик скорости *EP1*).

Таблица 1.1 – Данные эксперимента

Вид статической характеристики	Устанавливаемые параметры			Экспериментальные и расчетные данные		
	$U_{\text{я}}, В$ (<i>PV1</i>)	$I_{\text{в}}, А$ (<i>PA2</i>)	$M, Нм$ (<i>M_{YB1}</i>)	$I_{\text{я}}, А$ (<i>PA1</i>)	$\omega, \text{рад/с}$ (<i>EP1</i>)	$n,$ <i>об/мин</i>
Естественная	220	0,18	0			
			1,5			
			2,5			
Искусственная при изменении напряжения якоря	150	0,18	0			
			1,5			
			2,5			
Искусственная при изменении тока возбуждения	220	0,14	0			
			1,5			
			2,5			

12. Плавно снижая регулятором $R17$ задание ШИП1, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0.

13. Для получения искусственных механической и электромеханической характеристик при изменении напряжения якоря установить с помощью регулятора $R11$ значение напряжения якоря $150 В$ (контролировать по вольтметру $PV1$) и повторить п.п. 11, 12.

14. Для получения искусственных механической и электромеханической характеристик при изменении тока возбуждения установить с помощью регулятора $R11$ значение напряжения якоря $220 В$ (контролировать по вольтметру $PV1$), а с помощью регулятора $R13$ – значение тока возбуждения $0,14 А$ (контролировать по амперметру $PA5$), и повторить п.п. 11, 12.

15. Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно снижая регулятором $R17$ задание ШИП1, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA17$ отключить ШИП1;
- плавно снижая регулятором $R11$ задание ШИП ОЯ, уменьшить напряжение на якоре исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA11$ отключить ШИП ОЯ;
- плавно снижая регулятором $R13$ задание ШИП ОВ, уменьшить ток возбуждения исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA13$ отключить ШИП ОВ;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

16. По формуле $n = \frac{60\omega}{2\pi}$ рассчитать и занести в таблицу 1.1 значения частоты вращения двигателя.

17. По данным таблицы 1.1 построить естественные и искусственные механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(Iя)$ характеристики электропривода с ДПТ НВ.

18. Используя технические данные, представленные в таблице 1.2, произвести расчет параметров двигателя исследуемого электропривода:

Таблица 1.2 – Технические данные двигателя 2ПБ90М

Мощность, кВт	Напряжение, В		Частота вращения, об/мин		КПД, %	Сопротивление обмотки при 15 °С, Ом			Индуктивность цепи якоря, мГн
	цепи якоря	обмотки возбуждения	номинальная	максимальная		якоря	добавочных полюсов	возбуждения	
0,55	220	110	3000	4000	71	3,99	2,55	222	82

1) номинальная скорость вращения якоря двигателя:

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60},$$

где n_n – номинальная частота вращения;

2) номинальный ток обмотки возбуждения:

$$I_{вн} = \frac{U_{вн}}{k_t R_{вн}},$$

где k_t – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления при нагреве,

$k_t = 1,28$, $R_{вн}$ – сопротивление обмотки возбуждения при температуре 15°C ;

3) номинальный ток якоря:

$$I_{ян} = \frac{P_n - \eta_n \cdot I_{вн} \cdot U_{вн}}{\eta_n U_{ян}};$$

4) сопротивление щеток:

$$R_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{ян}},$$

где $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щетках (принимают равным $2 \dots 2,7 \text{ В}$);

5) сопротивление якорной цепи:

$$R_{яц} = k_t (R_{я} + R_{дп}) + R_{щ},$$

где $R_{яц}$, $R_{дп}$ – сопротивление обмоток якоря и дополнительных полюсов при температуре 15°C ;

б) произведение $K\Phi_n$ для номинального режима работы двигателя:

$$K\Phi_n = \frac{U_{ян} - R_{яц} I_{ян}}{\omega_n}.$$

19. Используя рассчитанные в п. 18 параметры, определить расчетное значение жесткости естественных статических характеристик двигателя исследуемого электропривода:

$$\beta_{расч} = -\frac{(K\Phi_n)^2}{R_{яц}}.$$

20. Используя данные таблицы 1.1, определить экспериментальное значение жесткости естественных статических характеристик двигателя исследуемого электропривода:

$$\beta_{эксп} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_2 - M_0}{\omega_2 - \omega_0},$$

где $M_0 = 0$, $M_2 = 2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – значения момента нагрузки на валу двигателя исследуемого электропривода; ω_0 , ω_2 – значения скорости вращения якоря двигателя исследуемого электропривода, соответствующие значениям M_0 и M_2 в таблице 1.1.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема исследования статических характеристик электропривода с ДПТ НВ на рисунке 1.5.
3. Таблица 1.1 с данными эксперимента.
4. Расчет параметров двигателя исследуемого электропривода.
5. Естественные и искусственные механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(I_{я})$ характеристики электропривода с ДПТ НВ по данным таблицы 1.1.

Контрольные вопросы

1. Построить графики и написать выражения для электромеханической и механической характеристик электропривода постоянного тока.
2. Пояснить методы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока.
3. Объяснить принцип действия схемы лабораторного стенда.
4. Пояснить мягкость реостатных характеристик.

Лабораторная работа 2

Исследование разомкнутой системы УВ – ДПТ

Цель работы: экспериментальное определение статических характеристик разомкнутой системы УВ – ДПТ; определение влияния тиристорного преобразователя на характеристики электропривода.

Теоретические сведения

В различных областях техники в настоящее время широко применяются регулируемые электроприводы постоянного тока с управляемыми выпрямителями (УВ). В однозонных электроприводах выход УВ подключается к якорной цепи двигателя, и регулирование скорости осуществляется за счет изменения напряжения на якоре ДПТ. В двухзонных электроприводах используется два УВ: один работает на обмотку якоря, а второй – на обмотку возбуждения, и регулирование скорости осуществляется как изменением напряжения на обмотке якоря, так и за счет изменения потока возбуждения.

Функционально в УВ можно выделить два блока (рис. 2.1): систему импульсно-фазового управления (СИФУ) и блок вентилей (БВ).

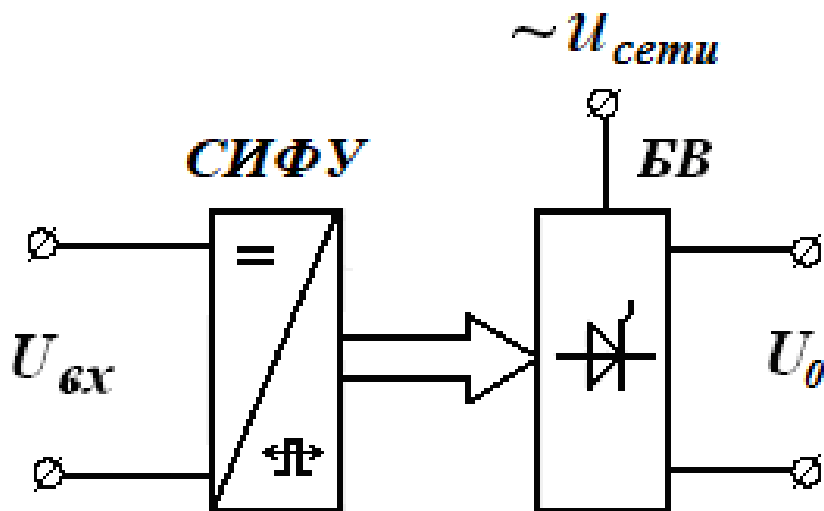


Рисунок 2.1 – Функциональная схема УВ

На вход СИФУ поступает напряжение $U_{вх}$ постоянного тока, условно показанное в верхней части прямоугольника. Выходной сигнал СИФУ представляет собой последовательность управляющих импульсов. Эти импульсы сдвигаются по фазе в зависимости от $U_{вх}$, что условно показано в нижней части прямоугольника, и подаются на вход БВ. БВ преобразует переменное напряжение сети в регулируемое напряжение постоянного тока U_0 .

БВ управляемого выпрямителя можно получить из неуправляемого заменой в нем неуправляемых вентилей (диодов) управляемыми вентилями – тиристорами. Для переключения тиристора в открытое состояние необходимо при прямой полярности приложенного к его выводам напряжения подать на управляющий электрод управляющий импульс. Для запираания тиристора необходимо приложить к его выводам обратное напряжение. Схема БВ однофазного УВ представлена на рисунке 2.2.

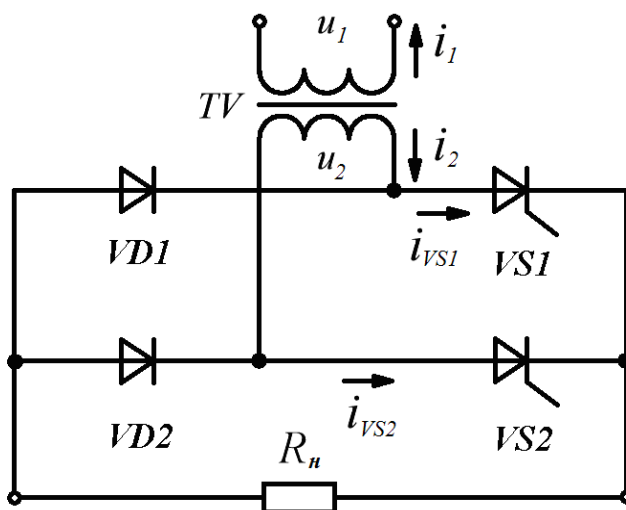


Рисунок 2.2 – Схема БВ однофазного УВ

Регулирование выпрямленного напряжения в УВ осуществляется *фазовым способом*. Он основан на управлении моментом отпирания тиристоров в пределах полупериода входного переменного напряжения.

Угол задержки отпирания тиристора (интервал между моментом приложения прямой полярности напряжения к выводам тиристора и моментом подачи на его управляющий электрод управляющего импульса) в формулах и диаграммах обозначают α и называют углом управления.

Рассмотрим работу УВ на активную нагрузку. На вход БВ со вторичной обмотки трансформатора поступает переменное напряжение u_2 . СИФУ вырабатывает импульсы подводимого к управляющим электродам тиристоров напряжения u_y , временное положение которых можно изменять в пределах полупериода напряжения u_2 . На временных диаграммах (рис. 2.3) угол управления α принят равным 90° . До прихода импульсов управления тиристоры закрыты и напряжение на нагрузке равно нулю. В момент прихода импульса управления открывается соответствующий тиристор, и с этого момента к нагрузке прикладывается u_2 . Изменяя α , можно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения U_0 на нагрузке. Очевидно, что при изменении α от 0 до 180° среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке уменьшается от U_0 до 0 .

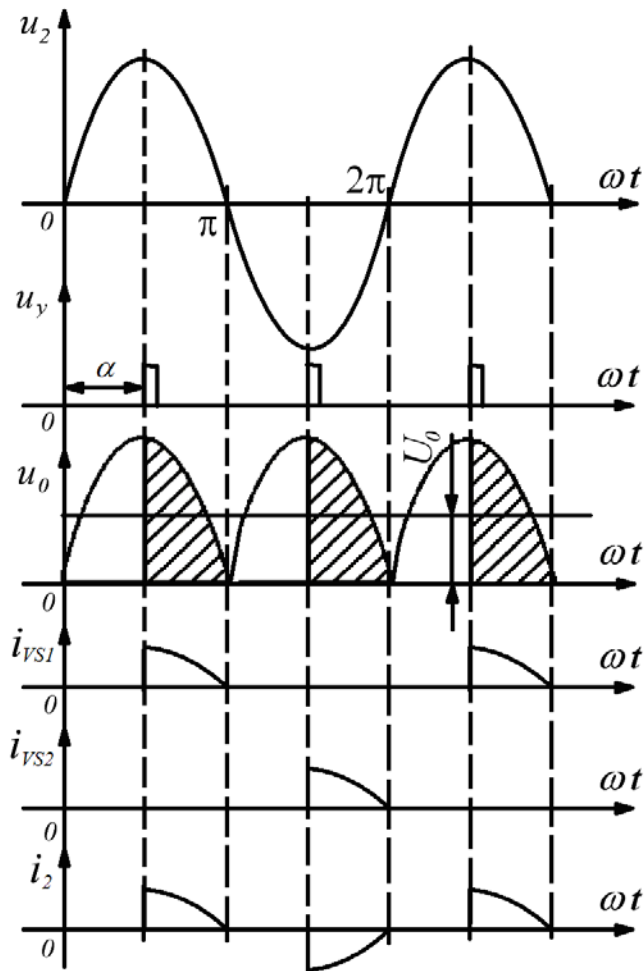


Рисунок 2.3 – Временные диаграммы однофазного УВ

Так как u_2 и i_2 смещены по фазе на угол α , то даже при чисто активной нагрузке УВ потребляет из сети реактивную мощность, что снижает его коэффициент мощности и способствует увеличению потерь в линии передачи электроэнергии.

Поскольку в мостовой схеме выпрямления в течение каждого полупериода переменного напряжения работают два вентиля, то при построении УВ нет необходимости в использовании четырех тиристоров. Однако при работе на нагрузку активно-индуктивного характера (обмотки электродвигателей) такая схема не является оптимальной, поскольку требует включения параллельно нагрузке обратного диода. В противном случае ток, протекающий через открытый тиристор, будет поддерживаться на уровне, большем тока удержания, за счет энергии, накопленной в индуктивном элементе. А это, в свою очередь, сделает невозможным своевременное запирающее открытие тиристора, т. е. нарушит работу выпрямителя.

Уравнение механической характеристики двигателя при питании от тиристорного преобразователя будет иметь вид:

$$\omega = \frac{E_d}{K\Phi} - \frac{(R_{яц} + R_n)}{(K\Phi)^2} M. \quad (2.1)$$

При этом

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha,$$

$$E_{d0} = \frac{2m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} E_2,$$

где α – угол управления тиристора, E_{d0} – значение ЭДС преобразователя при угле управления, равном нулю, m – фазность выпрямления преобразователя, равная числу пульсаций за период (для однофазных схем, мостовой и с нулевым выводом, $m = 2$; для трехфазной схемы с нулевым выводом $m = 3$; для трехфазной мостовой схемы $m = 6$), E_2 – ЭДС вторичной обмотки трансформатора (для трехфазной схемы с нулевым выводом – это фазное значение, для трехфазной мостовой схемы – линейное значение), R_n – сопротивление тиристорного преобразователя.

Как следует из формулы (2.1), механические характеристики будут прямыми, но при работе тиристорного преобразователя возможны два режима: режим непрерывных токов, когда ток в цепи якоря протекает непрерывно, и режим прерывистых токов, когда в отдельных интервалах ток в обмотке якоря отсутствует. Режим прерывистых токов возникает при относительно небольших токах нагрузки. Формула (2.1) справедлива для режима непрерывных токов. В режиме прерывистых токов расчет сильно усложняется, и характеристики принимают вид, показанный на рисунке 2.4.

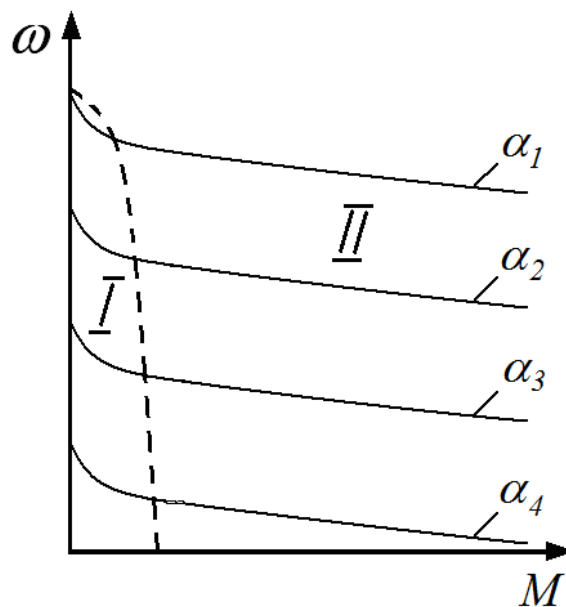


Рисунок 2.4 – Механические характеристики системы УВ – ДПТ

Область прерывистых токов обозначена на рисунке 2.4 цифрой *I*, а область непрерывных токов – цифрой *II*.

Ширина области прерывистых токов зависит: от схемы преобразователя (чем больше фазность выпрямления, тем ширина меньше), от угла управления (чем больше угол управления, тем ширина больше), от индуктивности якорной цепи.

Наличие области прерывистых токов неблагоприятно отражается на динамике электропривода, поэтому, чтобы сузить эту область, иногда в цепь якоря ДПТ включают дополнительный дроссель.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему исследования статических характеристик разомкнутой системы УВ – ДПТ, представленную на рисунке 2.5.

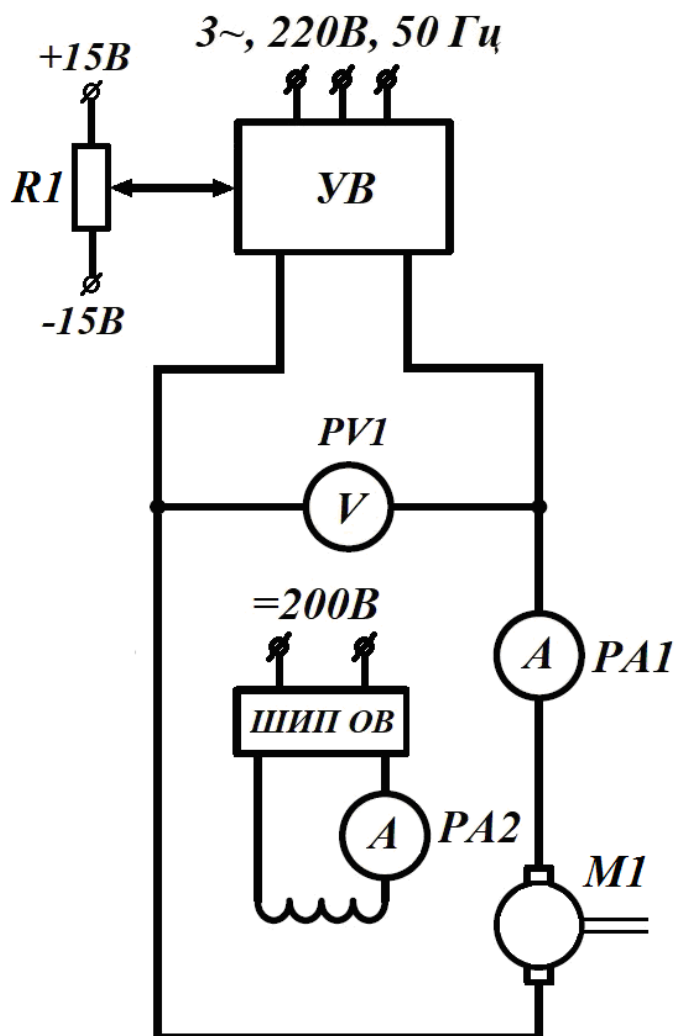


Рисунок 2.5 – Схема исследования статических характеристик разомкнутой системы УВ – ДПТ

2. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 2.6.

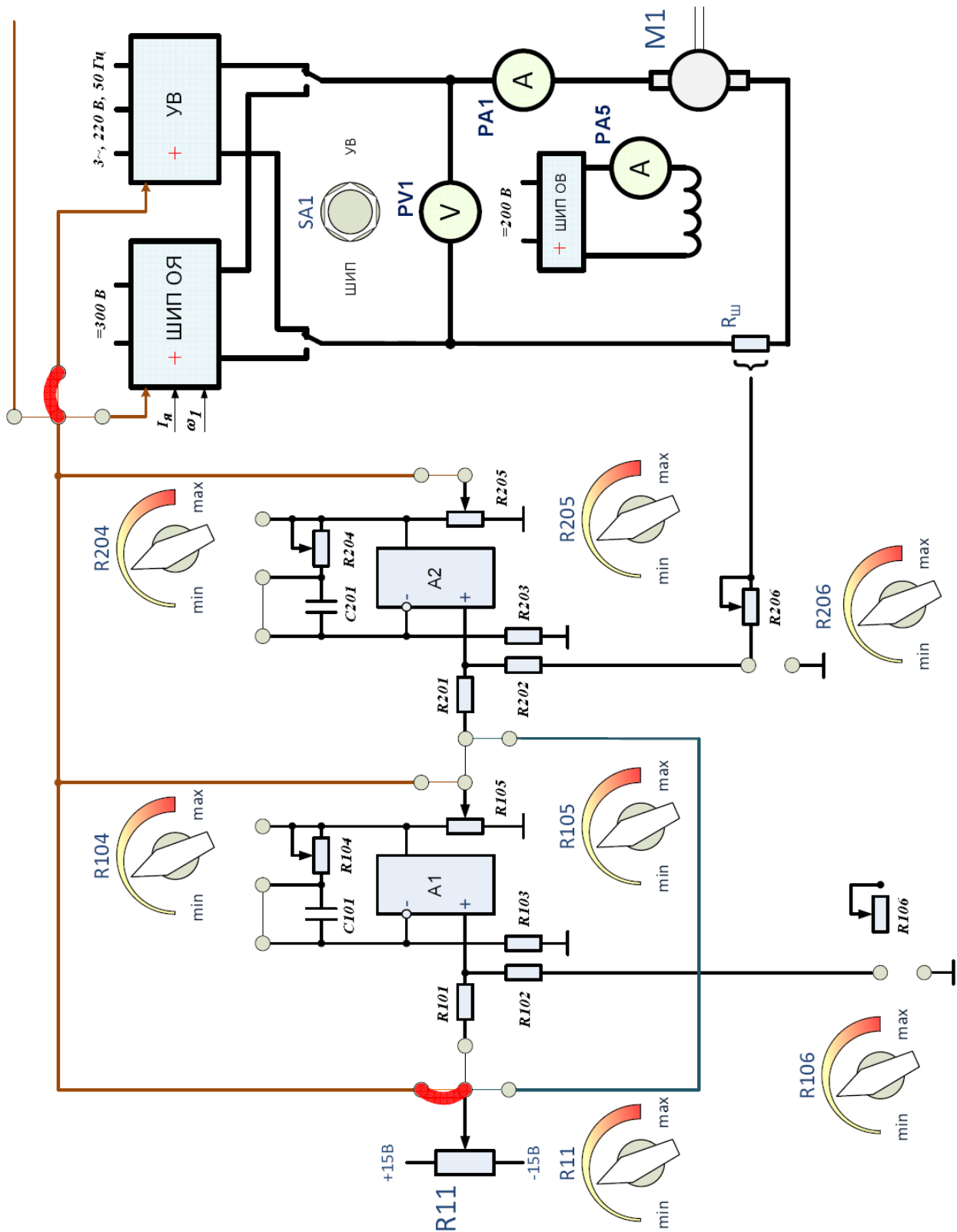


Рисунок 2.6 – Схема лабораторного стенда для исследования статических характеристик разомкнутой системы УВ – ДПТ

3. Перед включением стенда убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей ($SA11, SA13, SA14, SA15, SA17, SA31, SA41$), находятся в положении «Выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей ($R13, R17, R31, R32, R41$) находятся в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки. Тумблер $SA1$ перевести в положение «УВ», тумблер $SA3$ перевести в положение «M1-M2».

4. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть», расположенный в левой нижней части стенда).

5. Тумблером $SA13$ включить ШИП ОВ.

6. Плавно увеличивая регулятором $R13$ задание ШИП ОВ, установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя $0,18\text{ А}$ (контролировать по амперметру $PA5$).

7. Тумблером $SA16$ выбрать однофазный режим работы УВ.

8. Убедиться, что показанное прибором стенда значение угла открытия тиристорov является максимальным для однофазного режима работы УВ – 180° (при несоответствии – установить данное значение регулятором $R11$).

9. Тумблером $SA15$ включить УВ.

10. Плавно увеличивая регулятором $R11$ задание УВ, установить требуемое значение напряжения якоря исследуемого двигателя 220 В (контролировать по вольтметру $PV1$).

11. Занести в таблицу 2.1 показанное прибором стенда начальное значение угла открытия тиристорov α , значения напряжения якоря (вольтметр $PV1$) и скорости вращения двигателя (датчик скорости $EP1$).

Таблица 2.1 – Данные эксперимента

Режим работы УВ	Значение угла открытия тиристорov $\alpha, ^\circ$	Экспериментальные данные	
		$U_{я}, \text{В}$ ($PV1$)	$\omega, \text{рад/с}$ ($EP1$)
Однофазный	95		
	100		
	105		
	110		
Трехфазный	55		
	60		
	65		
	70		

12. Устанавливая регулятором $R11$ значения угла открытия тиристорov согласно значениям α таблицы 2.1, занести в таблицу 2.1 значения напряжения якоря (вольтметр $PV1$) и скорости вращения двигателя (датчик скорости EPI).

13. Плавно уменьшая регулятором $R11$ задание UB , уменьшить напряжение на якоре исследуемого двигателя до 0.

14. Тумблером $SA15$ отключить UB .

15. Тумблером $SA16$ выбрать трехфазный режим работы UB .

16. Убедиться, что показанное прибором стенда значение угла открытия тиристорov является максимальным для трехфазного режима работы $UB - 120^\circ$ (при несоответствии – установить данное значение регулятором $R11$).

17. Тумблером $SA15$ включить UB .

18. Плавно увеличивая регулятором $R11$ задание UB , установить требуемое значение напряжения якоря исследуемого двигателя 220 В (контролировать по вольтметру $PV1$).

19. Повторить п.п. 11 и 12.

20. Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно уменьшая регулятором $R11$ задание UB , уменьшить напряжение на якоре исследуемого двигателя до 0;

- тумблером $SA15$ отключить UB ;

- плавно уменьшая регулятором $R13$ задание $ШИП OB$, уменьшить ток возбуждения исследуемого двигателя до 0;

- тумблером $SA13$ отключить $ШИП OB$;

- выключить автоматический выключатель «Сеть».

21. По данным таблицы 2.1 построить для каждого из режимов работы УВ: характеристику управления УВ $U_{я}(\alpha)$, зависимость скорости ДПТ от угла открытия тиристорov $\omega(\alpha)$ и регулировочную характеристику ДПТ $U_{я}(\alpha)$.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.

2. Схема исследования статических характеристик разомкнутой системы УВ – ДПТ на рисунке 2.5.

3. Таблица 2.1 с данными эксперимента.

4. Характеристика управления УВ $U_{я}(\alpha)$, зависимость скорости ДПТ от угла открытия тиристорov $\omega(\alpha)$ и регулировочная характеристика ДПТ $U_{я}(\alpha)$ по данным таблицы 2.1 для однофазного режима работы УВ.

5. Характеристика управления УВ $U_{я}(\alpha)$, зависимость скорости ДПТ от угла открытия тиристорov $\omega(\alpha)$ и регулировочная характеристика ДПТ $U_{я}(\alpha)$ по данным таблицы 2.1 для трехфазного режима работы УВ.

Контрольные вопросы

1. Пояснить функциональную схему УВ.

2. Пояснить фазовый способ регулирования напряжения в УВ.

3. Объяснить принцип работы УВ на активную нагрузку.
4. Перечислить достоинства и недостатки УВ.
5. Пояснить особенности работы УВ на активно-индуктивную нагрузку.
6. Объяснить принцип действия схемы лабораторного стенда.

Лабораторная работа 3

Исследование разомкнутой системы ШИП – ДПТ

Цель работы: экспериментальное определение статических характеристик разомкнутой системы ШИП – ДПТ; определение влияния широтно-импульсного преобразователя на характеристики электропривода.

Теоретические сведения

Широтно-импульсный преобразователь (ШИП) – электронное устройство, преобразующее энергию постоянного тока с неизменным значением напряжения в энергию постоянного тока с регулируемой величиной напряжения.

Для обеспечения работы электропривода в реверсивном режиме используют схему транзисторного ШИП, представленную на рисунке 3.1:

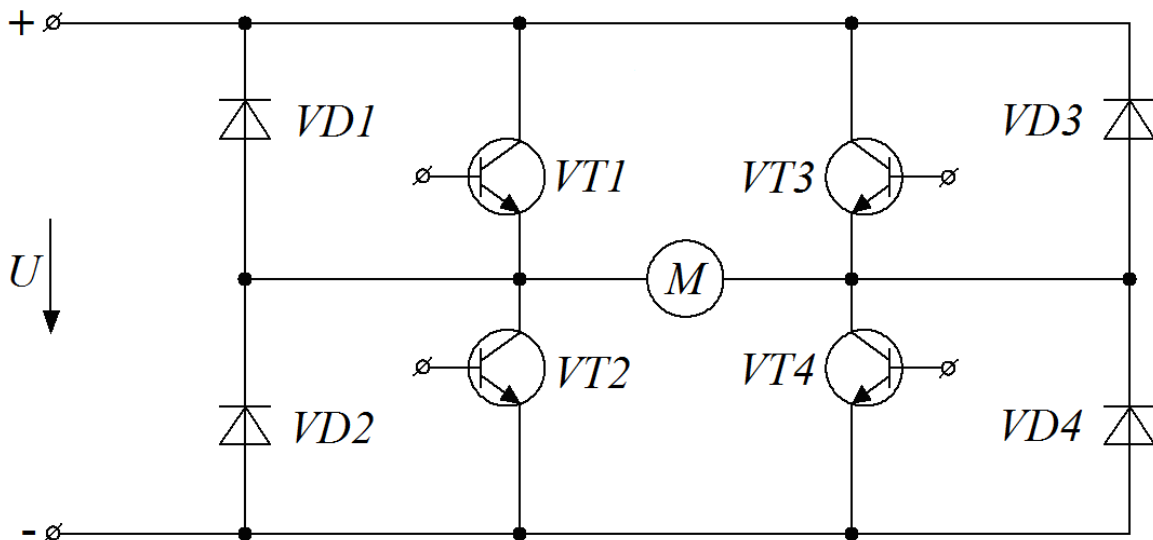


Рисунок 3.1 – Схема транзисторного ШИП

Используют различные алгоритмы управления транзисторами ШИП, работающими в ключевом режиме. Основным показателем всех алгоритмов является скважность:

$$\gamma = t_3 / T_k = t_3 / (t_3 + t_p), \quad (3.1)$$

где T_k – период коммутации транзисторного ключа, t_3 – время замкнутого состояния транзисторного ключа, t_p – время разомкнутого состояния транзисторного ключа.

Наиболее простой способ управления ШИП – *симметричный*. При симметричном способе управления в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста: часть периода открыты транзисторы $VT1$ и $VT4$, другую часть периода – $VT3$ и $VT2$. Напряжение на выходе ШИП (рис. 3.2) представляет собой разнополярные импульсы, длительность которых регулируется сигналами, поступающими со схемы управления на входы ключей.

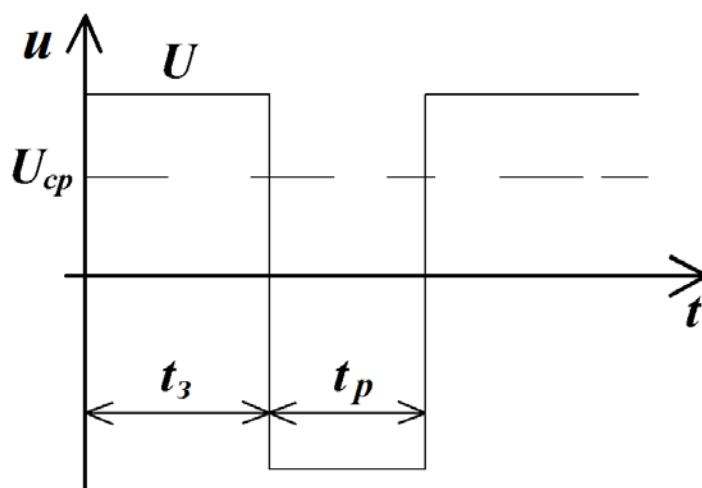


Рисунок 3.2 – Диаграмма напряжения на выходе ШИП

В ШИП с симметричным управлением среднее значение напряжения U_{cp} на выходе ШИП равно нулю, когда скважность $\gamma = 0,5$:

$$U_{cp} = (2\gamma - 1)U. \quad (3.2)$$

Симметричный способ управления обычно используется в маломощных электроприводах постоянного тока.

Уравнение механической характеристики такого электропривода:

$$\omega = \frac{(2\gamma - 1)U}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2}M. \quad (3.3)$$

Из формулы (3.3) видно, что, изменяя скважность, можно не только регулировать скорость, но и изменять направление вращения двигателя.

Преимуществом симметричного способа управления является простота реализации и отсутствие зоны нечувствительности в регулировочной характеристике. Недостатком ШИП с симметричным управлением является

двухполярное напряжение на выходе и, в связи с этим, повышенные пульсации тока в якорной обмотке двигателя.

Для исключения этого недостатка разработаны способы управления, обеспечивающие однополярное напряжение на выходе ШИП. Простейшим из них является *несимметричный* способ. В этом случае в работе участвуют только 2 транзистора, остальные два закрыты. Например, транзисторы $VT2$ и $VT3$ закрыты, $VT4$ постоянно открыт и насыщен, а скорость ДПТ регулируется изменением скважности импульсов напряжения транзистора $VT1$. При этом на выходе ШИП формируются однополярные импульсы и среднее напряжение на выходе равно нулю, когда скважность импульсов $VT1$ $\gamma = 0$.

Механические характеристики электропривода при питании двигателя от ШИП и работе в четырёх квадрантах показаны на рисунке 3.3:

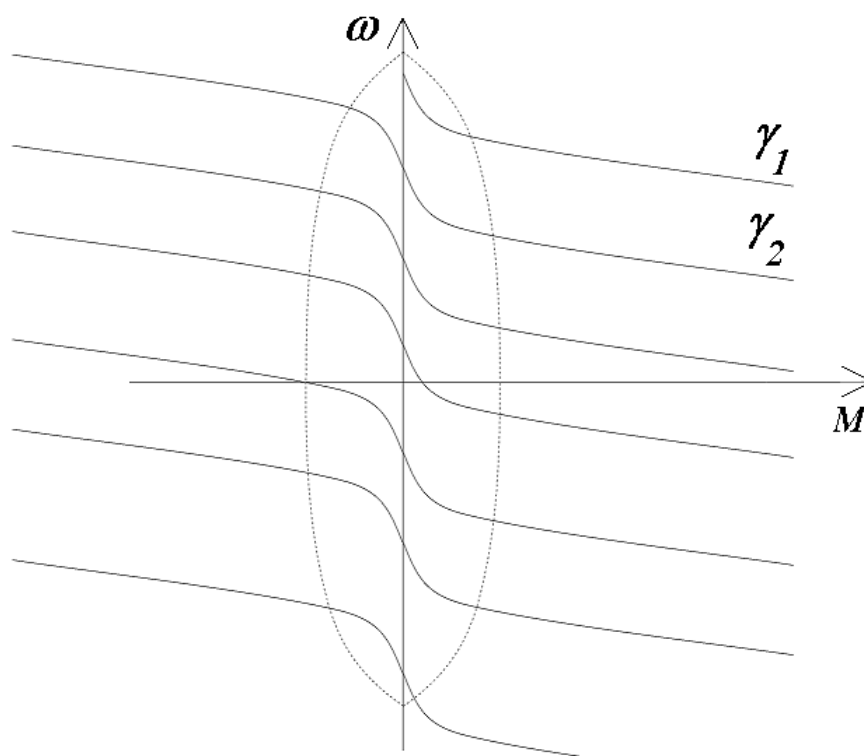


Рисунок 3.3 – Механические характеристики системы ШИП – ДПТ

Достоинства ШИП по сравнению с тиристорными преобразователями:

- 1) значительно большее быстродействие;
- 2) меньшие пульсации тока якорной цепи и более узкая область прерывистых токов;
- 3) лучшие массогабаритные показатели.

При использовании в схемах ШИП биполярных транзисторов с изолированным затвором, рассчитанных на большие токи, эти ШИП могут применяться и в электроприводах большой мощности.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему исследования статических характеристик разомкнутой системы ШИП – ДПТ, представленную на рисунке 3.4.

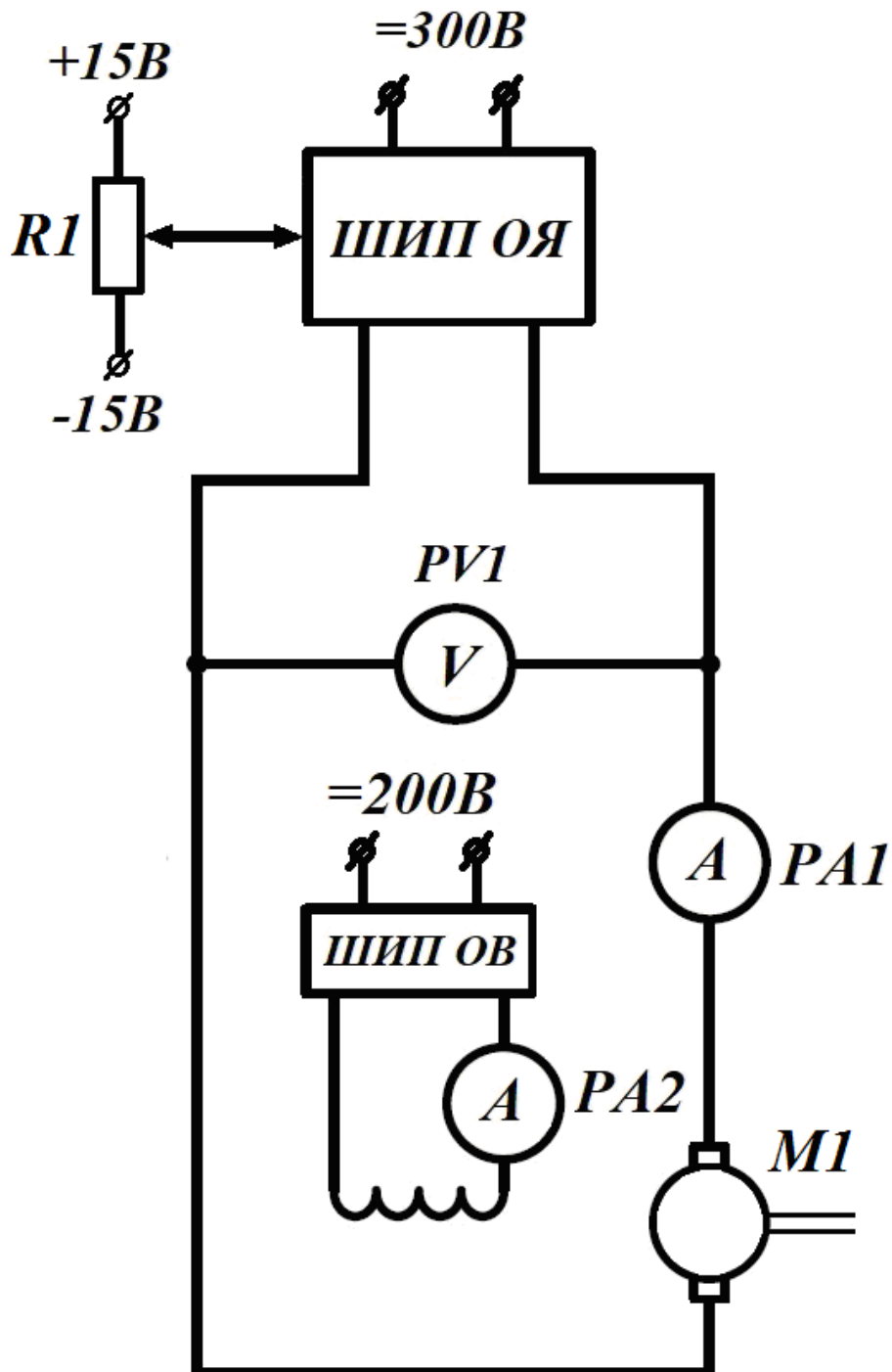


Рисунок 3.4 – Схема исследования статических характеристик разомкнутой системы ШИП – ДПТ

2. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 3.5.

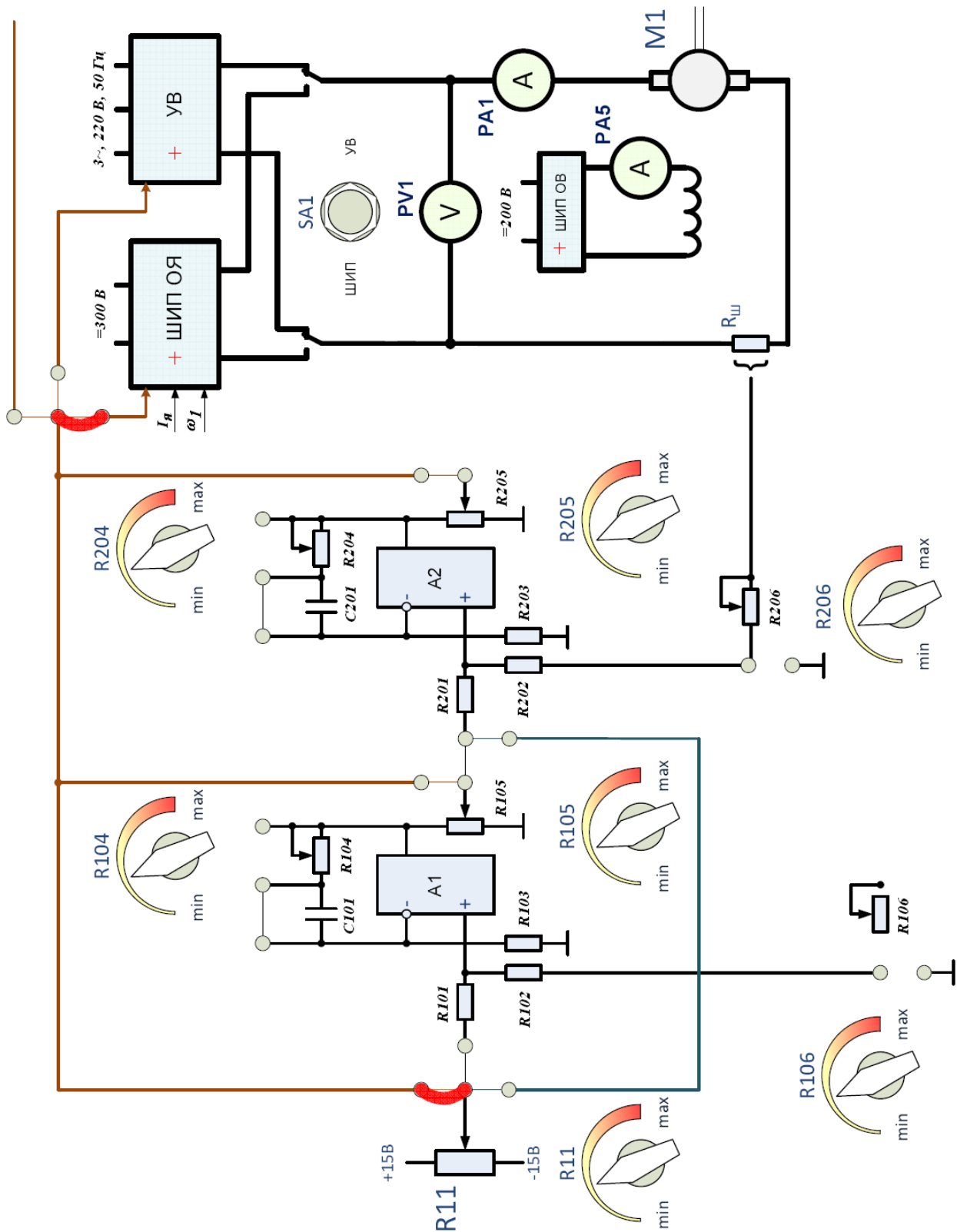


Рисунок 3.5 – Схема лабораторного стенда для исследования статических характеристик разомкнутой системы ШИП – ДПТ

3. Перед включением стенда убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей ($SA11$, $SA13$, $SA14$, $SA15$, $SA17$, $SA31$, $SA41$), находятся в положении «Выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей ($R13$, $R17$, $R31$, $R32$, $R41$) находятся в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки. Тумблер $SA1$ перевести в положение «ШИП», тумблер $SA3$ перевести в положение «M1-M2».

4. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть», расположенный в левой нижней части стенда).

5. Тумблером $SA13$ включить ШИП ОВ.

6. Плавно увеличивая регулятором $R13$ задание ШИП ОВ, установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя $0,18$ А (контролировать по амперметру $PA5$).

7. Регулятор $R11$ установить в такое положение, при котором скважность ШИП ОЯ (контролировать по индикатору «Скважность, %») будет 50 %.

8. Тумблером $SA11$ включить ШИП ОЯ, тумблером $SA17$ включить ШИП1.

9. Плавно изменяя регулятором $R11$ задание ШИП ОЯ, установить требуемое значение напряжения U на выходе ШИП ОЯ согласно данным таблицы 3.1. (контролировать по вольтметру $PV1$).

10. Занести в таблицу 3.1 значение скважности ШИП ОЯ (индикатор «Скважность, %»).

11. Устанавливая регулятором $R17$ момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору M_{YB1}) согласно значениям M таблицы 3.1, занести в таблицу 3.1 значения тока якоря (амперметр $PA1$) и скорости вращения двигателя (датчик скорости $EP1$).

Таблица 3.1 – Данные эксперимента

Устанавливаемые параметры		Экспериментальные и расчетные данные			
$U_{я}, В$ ($PV1$)	$M, Нм$ (M_{YB1})	$Q, \%$ (Скважность)	$I_{я}, А$ ($PA1$)	$\omega, рад/с$ ($EP1$)	$U_{ср}, В$
200	0				
	1,5				
	2,5				
150	0				
	1,5				
	2,5				
100	0				
	1,5				
	2,5				

12. Повторить п.п. 9–11, устанавливая регулятором $R11$ требуемые значения напряжения U на выходе ШИП ОЯ согласно данным таблицы 3.1. (контролировать по вольтметру $PV1$).

13. Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно уменьшая регулятором $R17$ задание ШИП1, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA17$ отключить ШИП1;
- плавно уменьшая регулятором $R11$ задание ШИП ОЯ, уменьшить напряжение на якоре исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA11$ отключить ШИП ОЯ;
- плавно уменьшая регулятором $R13$ задание ШИП ОВ, уменьшить ток возбуждения исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA13$ отключить ШИП ОВ;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

14. Для значений скважности из таблицы 3.1 рассчитать по (3.2) средние значения напряжения U_{cp} на выходе ШИП ОЯ с учетом значения напряжения на входе ШИП ОЯ $U = 300 В$. Полученные значения U_{cp} занести в таблицу 3.1.

15. По данным таблицы 3.1 построить механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(I_{я})$ характеристики разомкнутой системы ШИП – ДПТ для различных значений скважности ШИП ОЯ.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема исследования статических характеристик разомкнутой системы ШИП – ДПТ на рисунке 3.4.
3. Таблица 3.1 с данными эксперимента.
4. Расчет по формуле (3.2) средних значений напряжения U_{cp} на выходе ШИП ОЯ с учетом значения напряжения на входе ШИП ОЯ $U = 300 В$.
5. Механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(I_{я})$ характеристики разомкнутой системы ШИП – ДПТ для различных значений скважности ШИП ОЯ по данным таблицы 3.1.

Контрольные вопросы

1. Пояснить необходимость использования ШИП в схемах электроприводов постоянного тока.
2. Пояснить схему транзисторного ШИП.
3. Объяснить, используя диаграммы напряжения, принцип работы ШИП с симметричным управлением.
4. Объяснить принцип работы ШИП с несимметричным управлением.
5. Перечислить достоинства ШИП по сравнению с тиристорными преобразователями.
6. Объяснить принцип действия схемы лабораторного стенда.

Лабораторная работа 4

Исследование одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току

Цель работы: получение практических навыков в построении и настройке одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току; экспериментальное определение статических характеристик данной системы.

Теоретические сведения

Характеристики разомкнутых систем электропривода не обеспечивают необходимого регулирования или ограничения тока и момента в различных режимах работы электропривода. Поэтому на практике широко применяют замкнутые системы регулирования координат электропривода с использованием различных обратных связей (ОС).

Так как в разомкнутых системах электропривода при питании двигателя от идеального источника электромеханическая характеристика определяется выражением:

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi_n} - \frac{R_{яц}}{K\Phi_n} I_{я} = K_{\partial} U_{я} - R_{яц} K_{\partial} I_{я} = \omega_0 - \Delta\omega,$$

то статическая ошибка, обусловленная изменением нагрузки, будет равна:

$$\delta_e = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{R_{яц} K_{\partial} I_{ян}}{\omega_0}.$$

При питании двигателя от реального силового преобразователя электромеханическая характеристика определяется выражением:

$$\omega = E_n K_{\partial} - (R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{я} = K_n K_{\partial} U_{yn} - (R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{я},$$

где U_{yn} – напряжение управления на входе силового преобразователя.

Так как статическая ошибка при этом увеличивается:

$$\delta_n = \frac{(R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{ян}}{\omega_0},$$

то точность регулирования в системе уменьшается.

Если сигнал управления на вход силового преобразователя подавать через усилитель, то:

$$\omega = E_n K_\partial - (R_{яц} + R_n) K_\partial I_я = K_n K_\partial K_y U_y - (R_{яц} + R_n) K_\partial I_я, \quad (4.1)$$

где U_y – сигнал на входе усилителя.

Точность регулирования в системе при этом не изменяется:

$$\delta_n = \frac{(R_{яц} + R_n) K_\partial I_{ян}}{\omega_0}.$$

Если использовать положительную ОС по току, то:

$$U_y = U_{зс} + K_m I_я, \quad (4.2)$$

где $U_{зс}$ – сигнал задания скорости, K_m – коэффициент ОС по току.

Подставляя (4.2) в (4.1), получают уравнение электромеханической характеристики привода с ОС по току:

$$\omega = K_n K_\partial K_y U_{зс} - (R - K_m K_n K_y) K_\partial I_я, \quad (4.3)$$

где $R = (R_{яц} + R_n)$.

Статическая ошибка при этом:

$$\delta_m = \frac{(R - K_m K_y K_n) K_\partial I_{ян}}{\omega_0}.$$

Если $R = K_m K_y K_n$, то $\delta = 0$ и характеристика будет горизонтальная (абсолютно жесткая).

Однако, обеспечив такое равенство в одном режиме, из-за непостоянства K_n можно получить высокую погрешность в других режимах. Кроме того при изменении K_n будет меняться и первое слагаемое в выражении (4.3) Поэтому электроприводы только с ОС по току не применяются.

Регулирование (ограничение) тока и момента в замкнутых системах электропривода можно осуществлять с помощью нелинейной отрицательной ОС (ООС) по току.

Структурная схема замкнутой системы электропривода с нелинейной ООС по току приведена на рисунке 4.1.

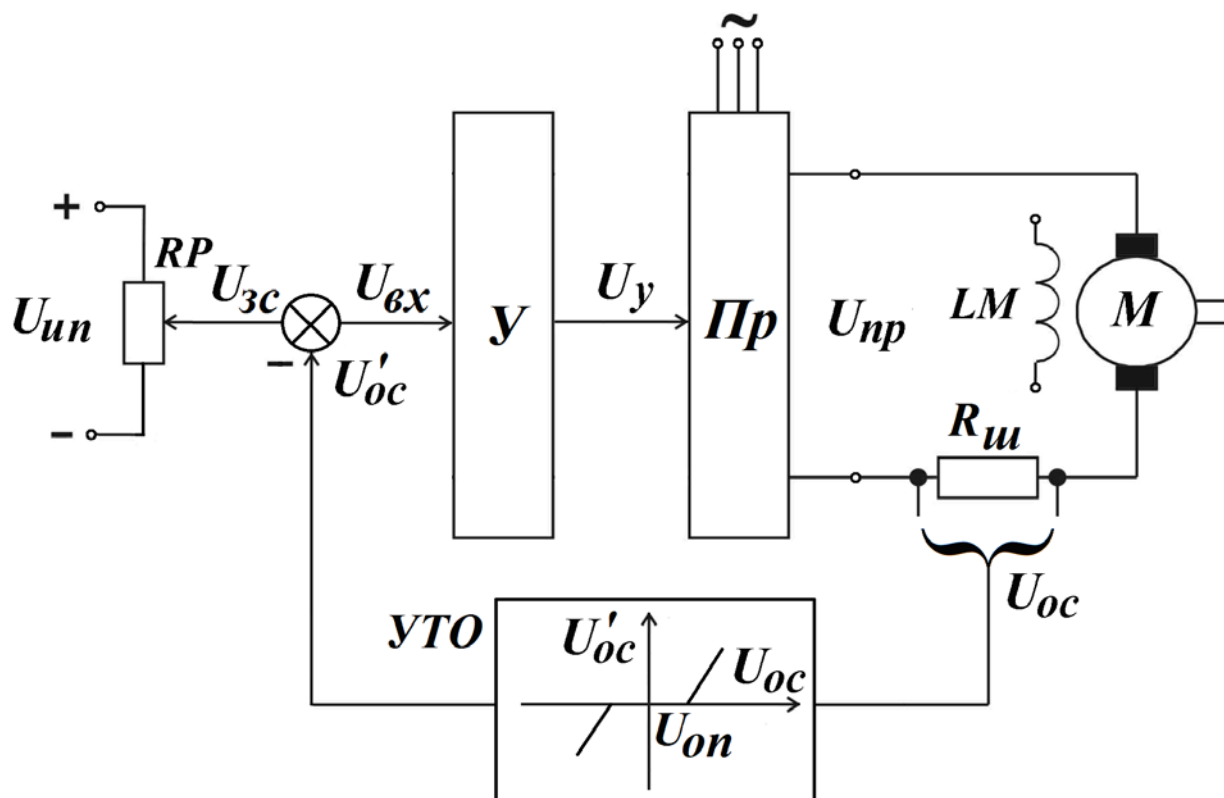


Рисунок 4.1 – Структурная схема замкнутой системы электропривода с нелинейной ООС по току

Сигнал нелинейной ООС по току U'_{oc} сравнивается с задающим сигналом скорости U_{zc} с датчика скорости RP , и их разность в виде сигнала рассогласования (ошибки) $U_{вх}$ подается на вход усилителя $У$. Формируемый на выходе $У$ сигнал управления U_y подается на вход преобразователя $Пр$, преобразующего переменное напряжение сети в регулируемое напряжение постоянного тока $U_{нр}$, подводимое к якорной цепи ДПТ $М$.

Основным элементом нелинейной ООС по току в данной схеме является узел токовой отсечки (УТО). Характеристика УТО $U'_{oc}(U_{oc})$ показана внутри изображающего его прямоугольника.

Работа УТО в соответствии с его характеристикой происходит следующим образом. До тех пор, пока сигнал ООС $U_{oc} = \beta I$, снимаемый с резистора $R_{ш}$, не превосходит некоторого заданного опорного напряжения U_{on} сигнал U'_{oc} равен нулю. При $U_{oc} > U_{on}$ на выходе УТО появляется сигнал U'_{oc} , поступающий на вход системы. Значение U_{on} определяется заданным током, с которого должно начаться его регулирование. Этот ток получил название тока отсечки $I_{омс}$. Электромеханические характеристики такого электропривода имеют два характерных участка: I и II (рис. 4.2).

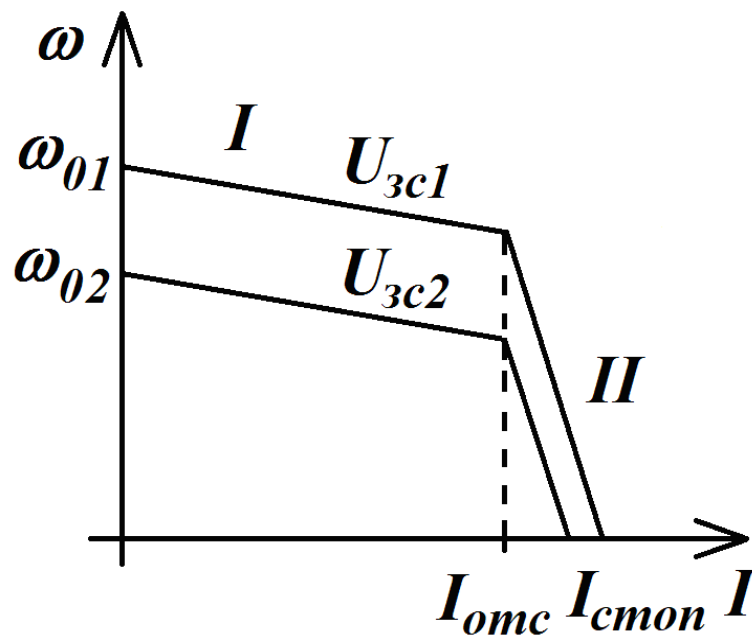


Рисунок 4.2 – Электромеханические характеристики электропривода с нелинейной ООС по току

На участке *I* при $I \leq I_{омс}$ система разомкнута и $U'_{oc} = 0$; на участке *II* при $I > I_{омс}$ система становится замкнутой, $U'_{oc} \neq 0$ и осуществляется регулирование (ограничение) тока и момента одновременно со снижением скорости электропривода. Ток при нулевой скорости электропривода получил название тока стопорения $I_{стоп}$.

Физическая сторона получения мягких характеристик ДПТ на участке *II* при $I > I_{омс}$ состоит в том, что при росте тока увеличивается сигнал U'_{oc} и уменьшаются сигналы $U_{вх}$ и U_y , так как $U_{вх} = U_{зс} - U'_{oc}$. По этой причине уменьшается ЭДС преобразователя, за счет чего и происходит ограничение тока и момента электропривода.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току, представленную на рисунке 4.3.

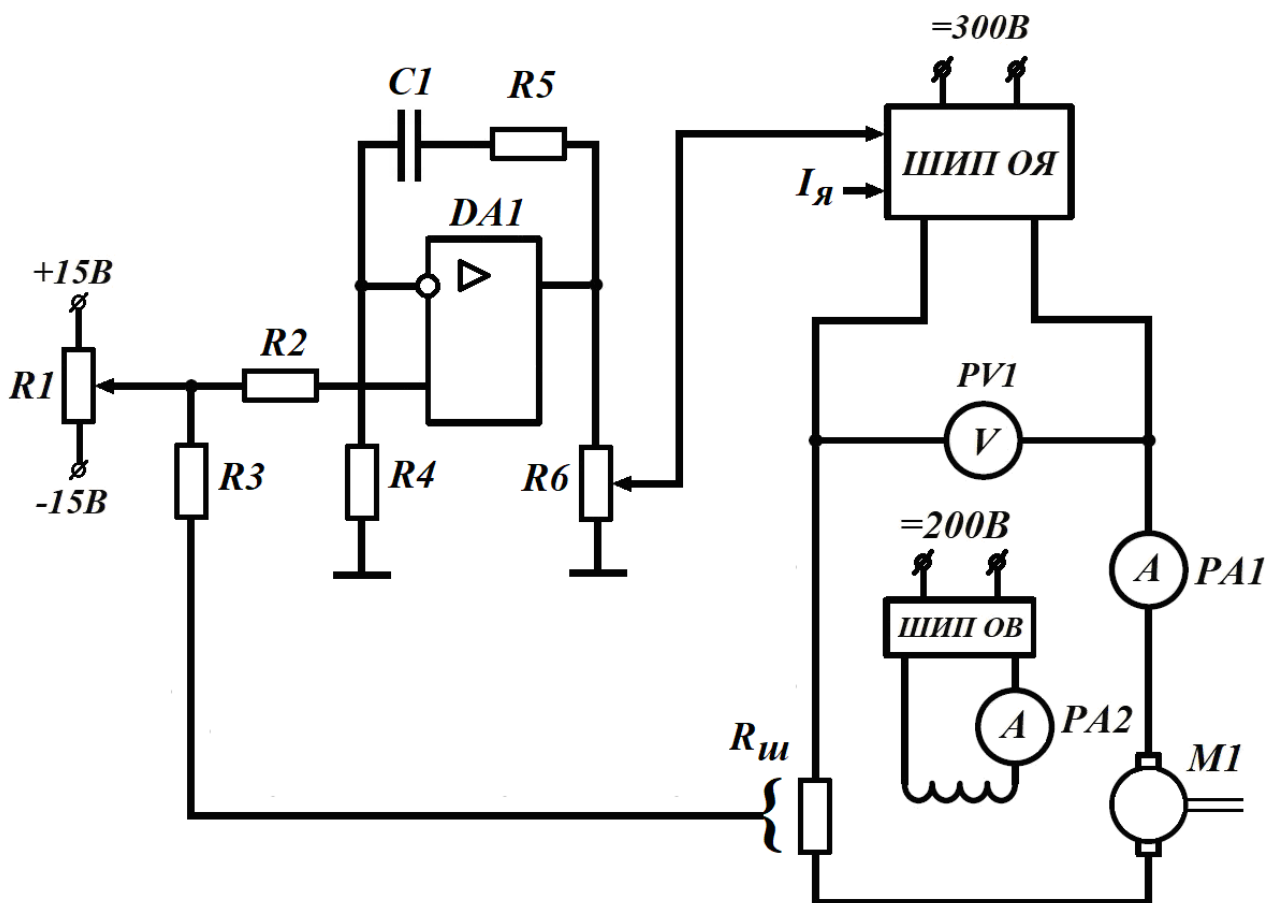


Рисунок 4.3 – Схема исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току

2. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 4.4.

3. Перед включением стенда убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей ($SA11$, $SA13$, $SA14$, $SA15$, $SA17$, $SA31$, $SA41$), находятся в положении «Выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей ($R13$, $R17$, $R31$, $R32$, $R41$) находятся в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки. Тумблер $SA1$ перевести в положение «ШИП», тумблер $SA3$ перевести в положение «M1-M2».

4. В соответствии с технической документацией стенда настроить контур тока при помощи регуляторов $R204$, $R205$ и $R206$ (при отсутствии возможности цифровой настройки контура тока, значения $R204$ и $R206$ установить максимальными, значение $R205$ – в середине диапазона изменения).

5. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть», расположенный в левой нижней части стенда).

6. Тумблером $SA13$ включить ШИП ОВ.

7. Плавно увеличивая регулятором $R13$ задание ШИП ОВ, установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя $0,18\text{ A}$ (контролировать по амперметру $PA5$).

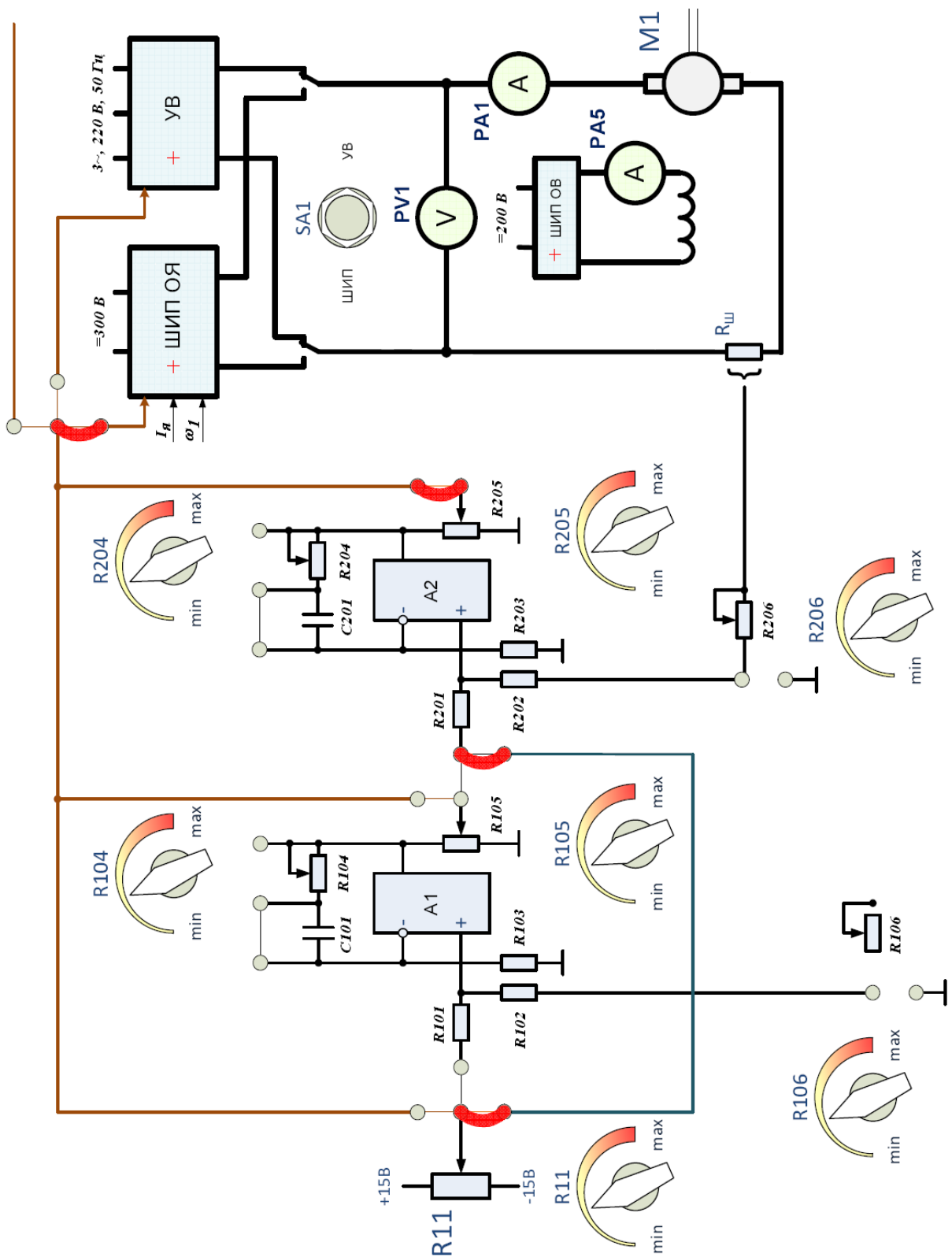


Рисунок 4.4 – Схема лабораторного стенда для исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току

8. Тумблером SA17 включить ШИП1.

9. Плавно увеличивая регулятором R17 задание ШИП1, увеличить момент нагрузки на валу двигателя до максимального значения.

10. Регулятор R11 установить в положение, при котором скважность ШИП ОЯ (контролировать по индикатору «Скважность, %») будет 50 %.

11. Тумблером SA11 включить ШИП ОЯ.

12. Плавно увеличивать регулятором R11 задание для системы регулирования до тех пор, пока значение тока якоря не достигнет требуемой величины (контролировать по амперметру PA1) (например, 1 А). Если двигатель при этом начнёт вращение, необходимо регулятором R11 уменьшить задание для системы регулирования.

13. Данные момента нагрузки на валу (прибор M_{YB1}), тока якоря (амперметр PA1) и скорости вращения двигателя (датчик скорости EP1) занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Данные эксперимента

$M, Нм$ (M_{YB1})	$I_{я}, А$ (PA1)	$\omega, рад/с$ (EP1)
2,5		
2,0		
1,5		
1,0		
0,5		
0		

14. Повторить п. 13, уменьшая регулятором R17 момент нагрузки на валу исследуемого двигателя согласно значениям M таблицы 4.1.

15. Завершив эксперимент, необходимо:

- тумблером SA17 отключить ШИП1;
- плавно уменьшая регулятором R11 задание ШИП ОЯ, уменьшить напряжение на якоре исследуемого двигателя до 0;
- тумблером SA11 отключить ШИП ОЯ;
- плавно снижая регулятором R13 задание ШИП ОВ, уменьшить ток возбуждения исследуемого двигателя до 0;
- тумблером SA13 отключить ШИП ОВ;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

16. По данным таблицы 4.1 построить механическую $\omega(M)$ и электромеханическую $\omega(I_{я})$ характеристики одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току на рисунке 4.3.
3. Таблица 4.1 с данными эксперимента.
4. Механическая $\omega(M)$ и электромеханическая $\omega(I_A)$ характеристики одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по току по данным таблицы 4.1.

Контрольные вопросы

1. Пояснить особенности разомкнутых и замкнутых систем регулирования электропривода.
2. Пояснить влияние ОС в замкнутых системах электропривода на точность регулирования координат.
3. Пояснить необходимость использования замкнутой системы регулирования электропривода с ОС по току.
4. Объяснить, используя структурную схему и графики электромеханических характеристик, принцип работы замкнутой системы электропривода с нелинейной ООС по току.
5. Объяснить принцип действия схемы лабораторного стенда.

Лабораторная работа 5

Исследование одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости

Цель работы: получение практических навыков в построении и настройке одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости; экспериментальное определение статических характеристик данной системы.

Теоретические сведения

Характеристики разомкнутых систем электропривода имеют относительно невысокую жесткость из-за влияния внутреннего сопротивления силового преобразователя. Для получения больших диапазонов регулирования скорости (несколько десятков или сотен) требуется иметь более жесткие характеристики, которые можно получить лишь в замкнутой системе электропривода.

Так как в разомкнутых системах электропривода при питании двигателя от идеального источника электромеханическая характеристика определяется выражением:

$$\omega = \frac{U_{я}}{K\Phi_n} - \frac{R_{яц}}{K\Phi_n} I_{я} = K_{\partial} U_{я} - R_{яц} K_{\partial} I_{я} = \omega_0 - \Delta\omega,$$

то статическая ошибка, обусловленная изменением нагрузки, будет равна:

$$\delta_e = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = \frac{R_{яц} K_{\partial} I_{ян}}{\omega_0}.$$

При питании двигателя от реального силового преобразователя электромеханическая характеристика определяется выражением:

$$\omega = E_n K_{\partial} - (R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{я} = K_n K_{\partial} U_{yn} - (R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{я},$$

где U_{yn} – напряжение управления на входе силового преобразователя.

Так как статическая ошибка при этом увеличивается:

$$\delta_n = \frac{(R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{ян}}{\omega_0},$$

то точность регулирования в системе уменьшается.

Если сигнал управления на вход силового преобразователя подавать через усилитель, то:

$$\omega = E_n K_{\partial} - (R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{я} = K_n K_{\partial} K_y U_y - (R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{я}, \quad (5.1)$$

где U_y – сигнал на входе усилителя.

Точность регулирования в системе при этом не изменяется:

$$\delta_n = \frac{(R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{ян}}{\omega_0}.$$

Если использовать ООС по скорости, то

$$U_y = U_{зс} - K_c \omega, \quad (5.2)$$

где $U_{зс}$ – сигнал задания скорости, K_c – коэффициент ОС по скорости.

Подставляя (5.2) в (5.1), получают:

$$\omega = K_n K_{\partial} K_y (U_{зс} - K_c \omega) - (R_{яц} + R_n) K_{\partial} I_{я}.$$

Откуда

$$\omega = \frac{K_n K_\delta K_y U_{zc} - (R_{яц} + R_n) K_\delta I_{я}}{1 + K_n K_\delta K_y K_c}.$$

Введя $K = K_n K_\delta K_y$ – коэффициент прямой передачи, получают

$$\omega = \frac{KU_{zc} - (R_{яц} + R_n) K_\delta I_{я}}{1 + KK_c} = \frac{K}{1 + KK_c} U_{zc} - \frac{R}{1 + KK_c} K_\delta I_{я}.$$

Статическая ошибка при этом

$$\delta_\omega = \frac{\frac{R}{1 + KK_c} K_\delta I_{ян}}{\omega_0}.$$

В сравнении с δ_n становится меньше, а точность регулирования и жесткость статических характеристик возрастают в $1 + KK_c$ раз.

В качестве суммирующего усилителя в данном электроприводе, возможно использование пропорционального регулятора (П-регулятора). Если K_y увеличивать, то при $K_y \rightarrow \infty$ параметры системы: $\delta_\omega \rightarrow 0$, $\omega \rightarrow \frac{U_{zc}}{K_c}$, и статические характеристики будут абсолютно жесткими.

Но, как известно из курса «Теория автоматического управления», при большом значении коэффициента усиления возникают проблемы в динамике (неустойчивость, автоколебания). Этого можно избежать, если применить пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор). Он обеспечивает хорошую динамику электропривода и абсолютно жесткую механическую характеристику в статике, так как у ПИ-регулятора в установившемся режиме:

$$K_y \rightarrow \infty \quad \text{и} \quad \omega = \frac{U_{zc}}{K_c}.$$

Электропривод с ООС по скорости применяется достаточно широко, так как позволяет получить высокую точность регулирования.

Структурная схема замкнутой системы электропривода с ООС по скорости приведена на рисунке 5.1.

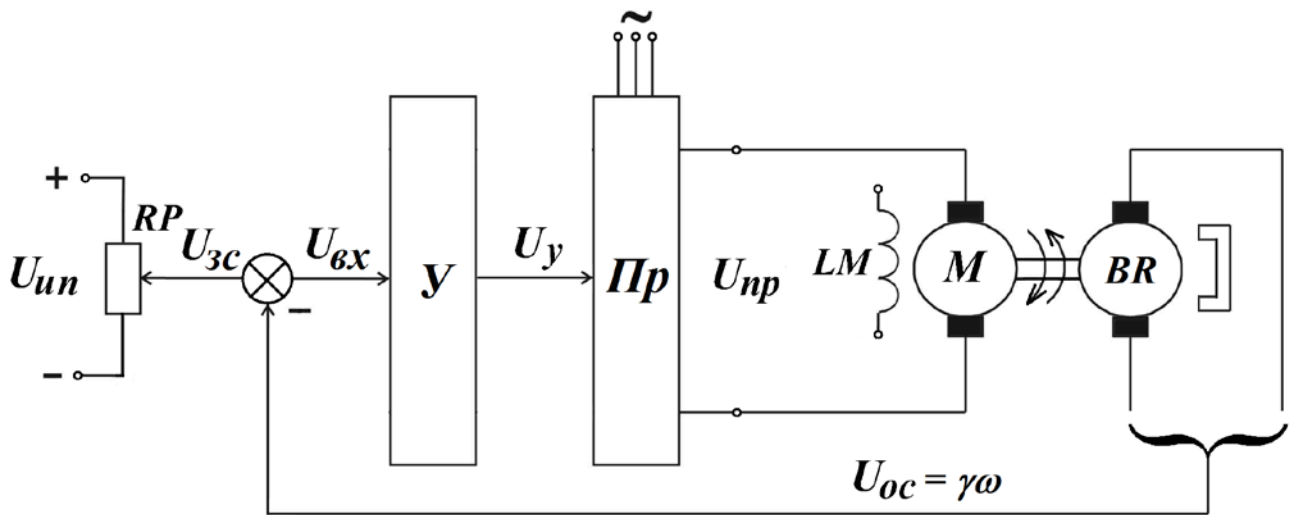


Рисунок 5.1 – Структурная схема замкнутой системы электропривода с ООС по скорости

На валу ДПТ находится датчик скорости – тахогенератор BR , выходное напряжение $U_{oc} = \gamma\omega$ которого, пропорциональное скорости ДПТ, является сигналом ОС. Коэффициент пропорциональности γ называется коэффициентом ОС по скорости и определяется данными тахогенератора.

U_{oc} сравнивается с задающим сигналом скорости U_{zc} , и их разность в виде сигнала рассогласования (ошибки) U_{vx} подается на вход усилителя U , который с коэффициентом K_y усиливает U_{vx} и подает его в виде сигнала управления U_y на вход преобразователя Pr .

Предположим, что ДПТ работает в установившемся режиме с некоторой скоростью, но по каким-то причинам увеличился момент нагрузки M_c . Так как развиваемый ДПТ момент M становится меньше M_c , скорость ДПТ начнет снижаться и соответственно будет снижаться U_{oc} . Это, в свою очередь, вызовет увеличение U_{vx} и U_y , и приведет к повышению напряжения U_{np} на выходе преобразователя Pr , а следовательно, и скорости ДПТ.

При уменьшении M_c ОС действует в другом направлении, приводя к снижению U_{np} . Таким образом, благодаря наличию ОС осуществляется автоматическое регулирование U_{np} и тем самым скорости ДПТ, за счет чего получаются более жесткие характеристики электропривода. В разомкнутой системе при изменении M_c значение U_{np} не изменится, в результате чего снизится жесткость статических характеристик.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости, представленную на рисунке 5.2.

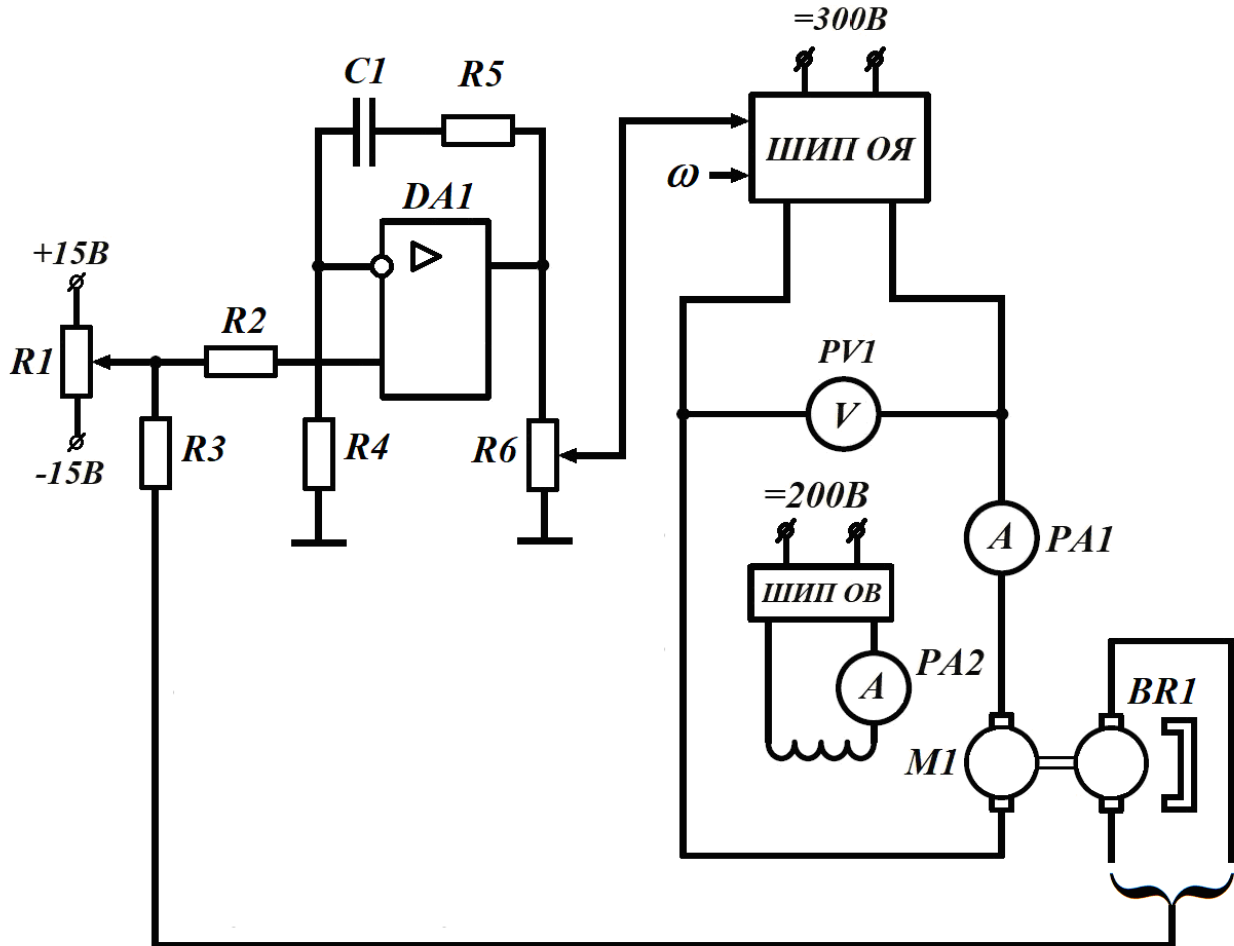


Рисунок 5.2 – Схема исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости

2. Для получения статических характеристик одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости при использовании ПИ-регулятора собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 5.3.

3. Перед включением стенда убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA11, SA13, SA14, SA15, SA17, SA31, SA41), находятся в положении «Выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (R13, R17, R31, R32, R41) находятся в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки. Тумблер SA1 перевести в положение «ШИП», тумблер SA3 перевести в положение «M1-M2».

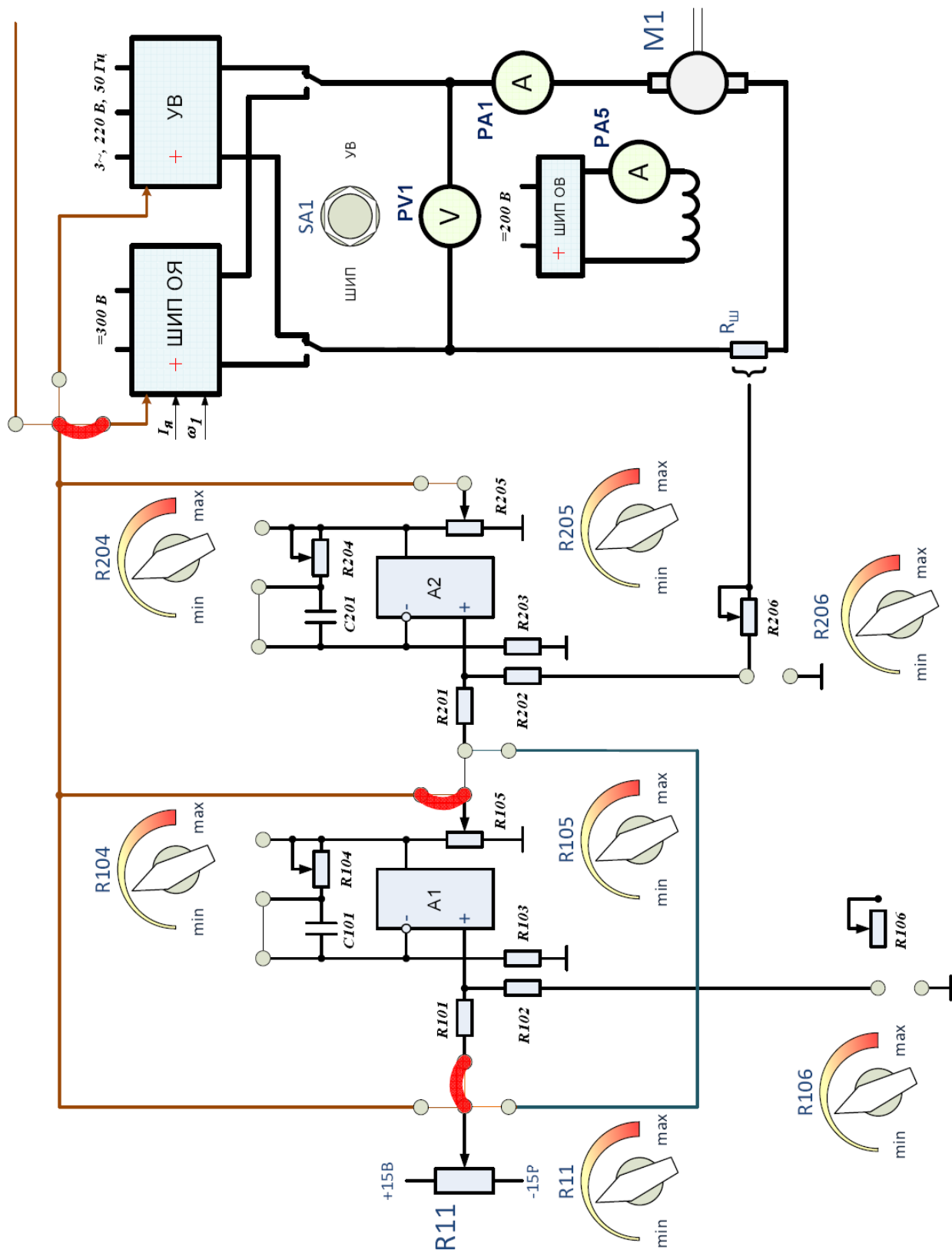


Рисунок 5.3 – Схема лабораторного стенда для исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости

4. В соответствии с технической документацией стенда настроить контур скорости при помощи регуляторов $R104$, $R105$ и $R106$ (при отсутствии возможности цифровой настройки контура скорости, значение $R104$ установить максимальным, значения $R105$ и $R106$ – минимальными).

5. Регулятор $R11$ установить в положение, соответствующее середине диапазона изменения.

6. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть», расположенный в левой нижней части стенда).

7. Тумблером $SA13$ включить ШИП OB .

8. Плавно увеличивая регулятором $R13$ задание ШИП OB , установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя $0,18$ А (контролировать по амперметру $PA5$).

9. Тумблером $SA11$ включить ШИП $OЯ$.

10. Перевести регулятор $R105$ в положение, соответствующее середине диапазона изменения.

11. Плавно увеличивая регулятором $R11$ задание для системы регулирования, установить требуемую скорость вращения двигателя (контролировать по датчику скорости $EP1$), например, 150 рад/с. Занести данное значение $\omega_{зад}$ в таблицу 5.1.

12. Тумблером $SA17$ включить ШИП I .

13. Данные тока якоря (амперметр $PA1$) и скорости вращения двигателя (датчик скорости $EP1$) занести в таблицу 5.1.

14. Повторить п. 13, устанавливая регулятором $R17$ момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору M_{YB1}) согласно значениям M таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Данные эксперимента

Тип регулятора	$\omega_{зад}, \text{рад/с}$	$M, \text{Нм}$ (M_{YB1})	$I_{я}, \text{А}$ ($PA1$)	$\omega, \text{рад/с}$ ($EP1$)
ПИ-регулятор		0		
		1		
		2		
		3		
П-регулятор		0		
		1		
		2		
		3		

15. Плавно уменьшая регулятором $R17$ задание ШИП I , уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0.

16. Плавно уменьшая регулятором $R11$ задание ШИП $OЯ$, уменьшить скорость вращения исследуемого двигателя до 0.

17. Для получения статических характеристик одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости при использовании П-регулятора в схеме лабораторного стенда замкнуть накоротко перемычкой конденсатор $C101$.

18. Установить с помощью регулятора $R11$ значение $\omega_{зад}$, например, 150 рад/с . Занести данное значение в таблицу 5.1.

19. Повторить п.п. 13 и 14.

20. Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно уменьшая регулятором $R17$ задание ШИП1, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0;

- тумблером $SA17$ отключить ШИП1;

- плавно уменьшая регулятором $R11$ задание ШИП ОЯ, уменьшить скорость вращения исследуемого двигателя до 0;

- тумблером $SA11$ отключить ШИП ОЯ;

- плавно уменьшая регулятором $R13$ задание ШИП ОБ, уменьшить ток возбуждения исследуемого двигателя до 0;

- тумблером $SA13$ отключить ШИП ОБ;

- выключить автоматический выключатель «Сеть».

21. По данным таблицы 5.1 построить механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(I_{я})$ характеристики одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости для разных типов регуляторов.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.

2. Схема исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости на рисунке 5.2.

3. Таблица 5.1 с данными эксперимента.

4. Механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(I_{я})$ характеристики одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости для разных типов регуляторов по данным таблицы 5.1.

Контрольные вопросы

1. Пояснить особенности разомкнутых и замкнутых систем регулирования электропривода.

2. Пояснить необходимость использования замкнутой системы регулирования с ОС по скорости.

3. Объяснить принцип работы одноконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости.

4. Описать типы регуляторов, используемых в схемах электропривода.

5. Указать параметры каждого из использованных в схеме лабораторного стенда регуляторов, вид преобразования сигнала, осуществляемого регулятором; изобразить график переходной функции.

6. Объяснить принцип действия схемы лабораторного стенда.

Лабораторная работа 6

Исследование двухконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости и по току

Цель работы: получение практических навыков в построении и настройке двухконтурной системы ШИП-ДПТ с ОС по скорости и по току; экспериментальное определение статических характеристик данной системы.

Теоретические сведения

В замкнутых системах электропривода для получения жестких характеристик, необходимых для регулирования скорости, и мягких характеристик, требуемых для ограничения тока и момента, т. е. при регулировании двух координат, применяются соответствующие ОС.

В схеме электропривода с нелинейными ОС по скорости и току (рис. 6.1) для обеспечения нелинейности цепей ОС используют узел токоограничения (УТО) и узел ограничения скорости (УОС), характеристики которых показаны внутри соответствующих условных изображений этих узлов.

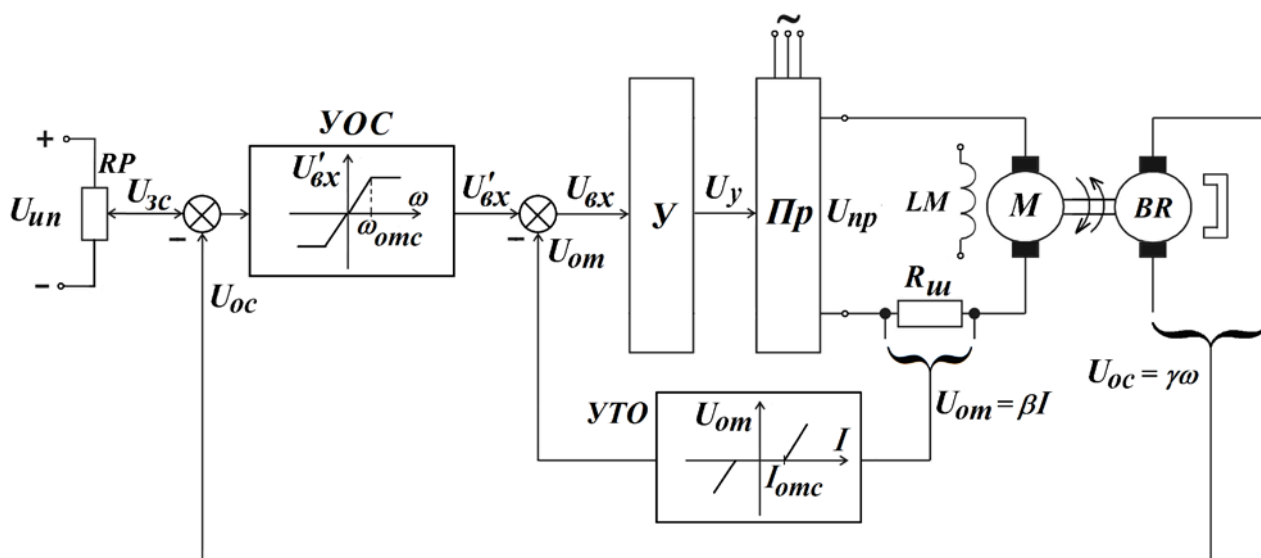


Рисунок 6.1 – Структурная схема замкнутой системы электропривода с нелинейными ОС по скорости и току

Приведенной схеме соответствуют электромеханические характеристики (рис. 6.2), разделенные на три зоны – I, II и III. В зоне I в диапазоне токов от 0 до $I_{омс}$ действует только ОС по скорости, обеспечивая жесткие характеристики электропривода. В зоне II при $I > I_{омс}$ вступает в действие ОС по току и характеристики становятся мягче. При дальнейшем увеличении тока и падении скорости ниже скорости отсечки $\omega_{омс}$ перестает действовать ОС по скорости, а

за счет действия оставшейся ОС по току характеристики становятся еще мягче (зона III), т. е. обеспечивается требуемое ограничение тока и момента.

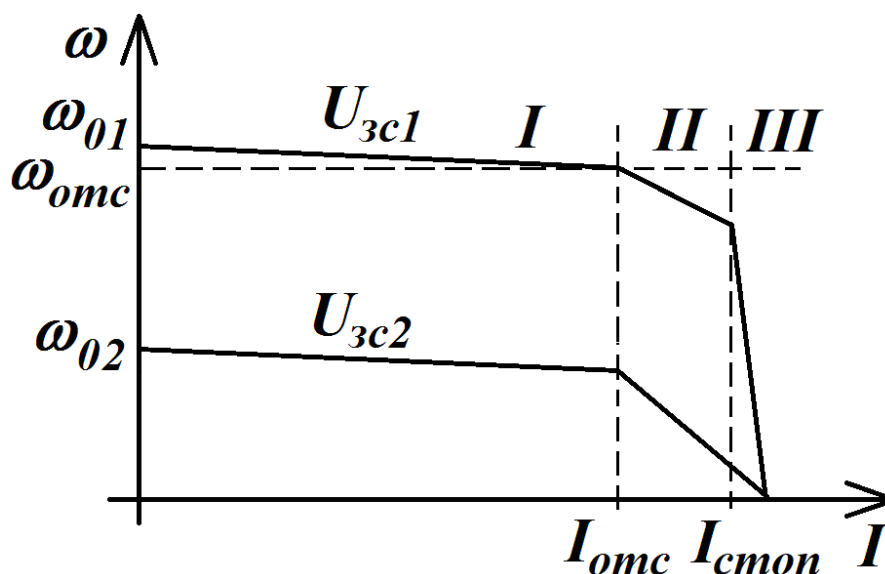


Рисунок 6.2 – Электромеханические характеристики электропривода с нелинейными ОС по скорости и току

Эффективное и качественное регулирование координат в замкнутых системах электропривода обеспечивает принцип подчиненного регулирования, предусматривающий регулирование каждой координаты с помощью отдельного регулятора и соответствующего канала ОС. Регулирование каждой координаты, таким образом, происходит в собственном замкнутом контуре и требуемые характеристики электропривода можно получить за счет выбора параметров регулятора этой координаты и цепи ее ОС.

Управление внутренним контуром с помощью выходного сигнала внешнего контура определяет еще одно важное свойство таких систем, заключающееся в возможности простыми средствами ограничивать любую регулируемую координату, например ток и момент, на заданном уровне. Для этого требуется всего лишь ограничить сигнал, поступающий с внешнего контура регулирования.

Значительно лучшие свойства в статике и динамике можно обеспечить, если использовать в электроприводе два регулятора: регулятор тока и регулятор скорости. При этом выходной сигнал регулятора скорости является задающим сигналом для регулятора тока, т. е. регулирование тока подчинено регулированию скорости. Поэтому такие системы электропривода получили название систем с подчиненным регулированием координат. Они используются в двух вариантах:

1. Однократно интегрирующая система, когда в качестве регулятора тока используется ПИ-регулятор, а в качестве регулятора скорости – П-регулятор.
2. Двукратно интегрирующая система, когда в качестве и регулятора тока, и регулятора скорости используется ПИ-регулятор.

В обоих случаях контур тока настраивается на технический оптимум (ТО), при котором он обладает астатизмом. Поэтому в установившемся режиме статическая ошибка при регулировании тока отсутствует, что является одним из достоинств настройки контура на ТО. Для обеспечения настройки контура на ТО необходимо выбрать постоянную времени регулятора тока $T_{pm} = C_{pm} R_{pm}$, равной электромагнитной постоянной якорной цепи электропривода T_y .

Коэффициент передачи регулятора:

$$K_{pm} = \frac{RT_{pm}}{2K_n T_n K_m},$$

где R – сопротивление якорной цепи электропривода, K_n – коэффициент передачи преобразователя, T_n – постоянная времени преобразователя, K_m – коэффициент ОС по току.

$$K_m = \frac{U_{zm\max}}{I_{ядоп}},$$

где $U_{zm\max}$ – максимальное значение задающего сигнала на входе регулятора тока, $I_{ядоп}$ – максимально допустимое значение тока якоря двигателя.

В однократно интегрирующей системе контур скорости тоже настраивается на ТО. Так как контур уже обладает астатизмом за счет механической части электропривода, то в качестве регулятора можно использовать П-регулятор, коэффициент передачи которого должен быть равен

$$K_{pc} = \frac{K_m T_m}{2T_\mu RK_\delta K_c}, \quad (6.1)$$

где T_μ – малая некомпенсируемая постоянная контура скорости, $T_\mu = 2T_n$, K_c – коэффициент ОС по скорости, T_m – электромеханическая постоянная электропривода:

$$T_m = JRK_\delta^2,$$

где J – момент инерции электропривода.

В данном случае контур скорости, обладая астатизмом по отношению к управляющему воздействию, будет статичен по отношению к возмущающему воздействию.

Поэтому электромеханическая и механическая характеристики будут иметь вид:

$$\omega = \frac{U_{zc}}{K_c} - \frac{K_m}{K_{pc} K_c} I_y,$$

$$\omega = \frac{U_{zc}}{K_c} - \frac{K_m}{K_{pc} K_c K_d} M.$$

То есть с увеличением нагрузки скорость будет уменьшаться, а статическая ошибка увеличиваться. Полагая $M = 0$, получают при $U_{zc \max}$:

$$\omega_{0 \max} = \frac{U_{zc \max}}{K_c}.$$

Отсюда

$$K_c = \frac{U_{zc \max}}{\omega_{0 \max}} \approx \frac{U_{zc \max}}{\omega_n}.$$

Для обеспечения высокой точности регулирования необходимо обеспечить астатизм контура скорости по возмущению. Для этого необходимо использовать и в контуре скорости ПИ-регулятор. В этом случае для контура скорости используется настройка на симметричный оптимум (СО), при которой постоянная времени регулятора скорости $T_{pc} = 4T_\mu$, а коэффициент передачи регулятора определяется выражением (6.1).

Тогда электромеханическая и механическая характеристики будут определяться выражением:

$$\omega = \frac{U_{zc}}{K_c}.$$

Таким образом, механическая характеристика будет абсолютно жесткой и статическая ошибка равна нулю. Стабильность скорости в этом случае зависит только от постоянства сигнала задания скорости и коэффициента ОС по скорости.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему исследования двухконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости и по току, представленную на рисунке 6.3.

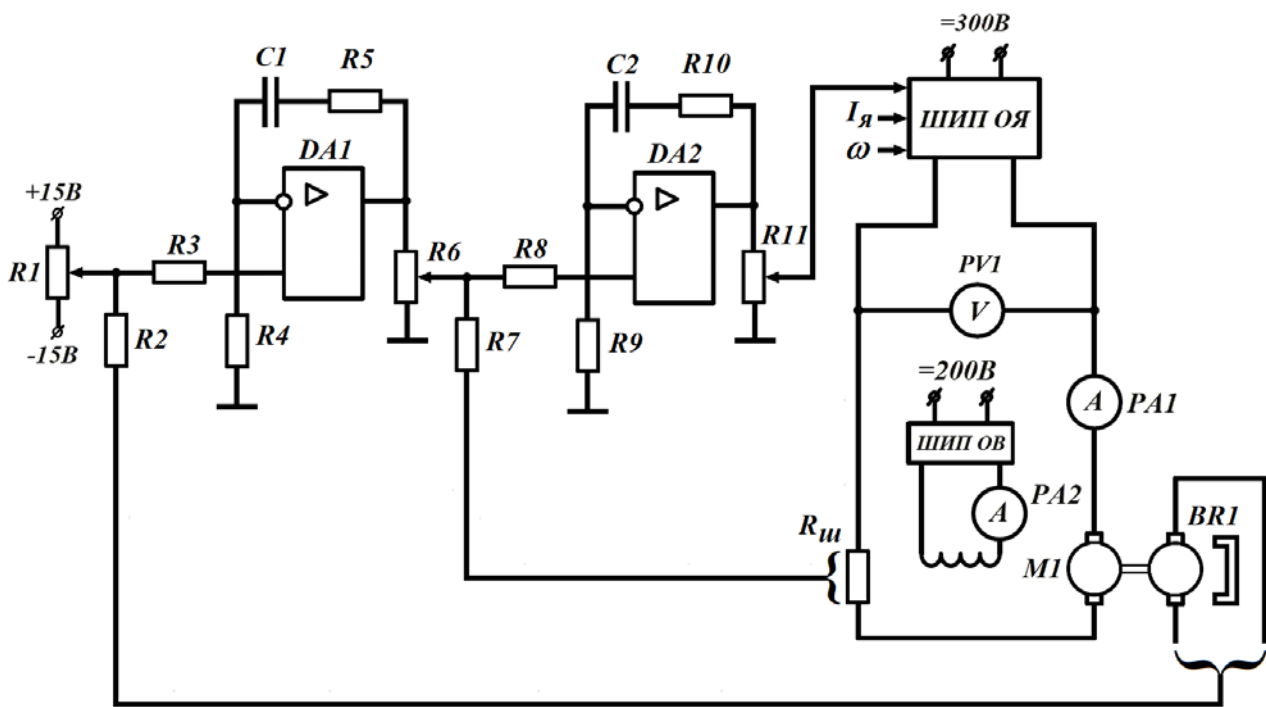


Рисунок 6.3 – Схема исследования двухконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости и по току

2. Для получения статических характеристик двухконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости и по току при использовании ПИ-регуляторов собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 6.4.

3. Перед включением стенда убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей ($SA11, SA13, SA14, SA15, SA17, SA31, SA41$), находятся в положении «Выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей ($R13, R17, R31, R32, R41$) находятся в крайнем левом положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки. Тумблер $SA1$ перевести в положение «ШИП», тумблер $SA3$ перевести в положение «M1-M2».

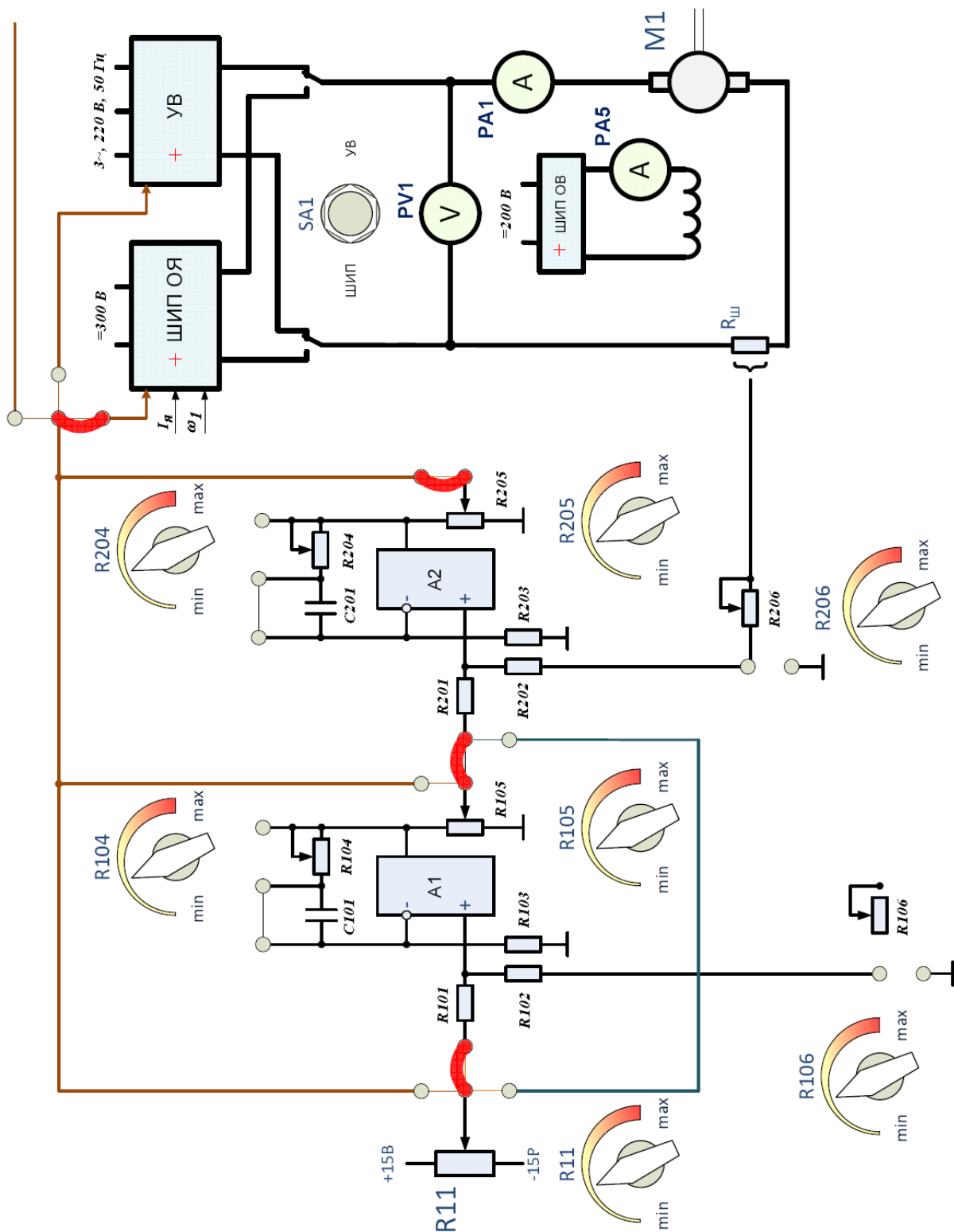


Рисунок 6.4 – Схема лабораторного стенда для исследования двухконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости и по току

4. В соответствии с технической документацией стенда настроить контур скорости при помощи регуляторов $R104$, $R105$, $R106$ и контур тока при помощи

регуляторов $R204$, $R205$, $R206$. При отсутствии возможности цифровой настройки контура скорости, значение $R104$ установить максимальным, значения $R105$ и $R106$ – минимальными. При отсутствии возможности цифровой настройки контура тока, значение $R204$ установить максимальным, значения $R205$ и $R206$ – минимальными.

5. Регулятор $R11$ установить в положение, соответствующее середине диапазона изменения.

6. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть», расположенный в левой нижней части стенда).

7. Тумблером $SA13$ включить ШИП ОВ.

8. Плавно увеличивая регулятором $R13$ задание ШИП ОВ, установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя $0,18\text{ А}$ (контролировать по амперметру $PA5$).

9. Тумблером $SA11$ включить ШИП ОЯ.

10. Регуляторы $R105$ и $R205$ перевести в положение, соответствующее середине диапазона изменения.

11. Плавно увеличивая регулятором $R11$ задание для системы регулирования, установить скорость вращения двигателя (контролировать по датчику скорости EPI), равную 0 рад/с .

12. Регулятор $R206$ перевести в положение, соответствующее максимальному значению диапазона изменения.

13. Плавно увеличивая регулятором $R11$ задание для системы регулирования, установить требуемую скорость вращения двигателя (контролировать по датчику скорости EPI), например, 100 рад/с . Занести данное значение $\omega_{зад}$ в таблицу 6.1.

14. Тумблером $SA17$ включить ШИП I.

15. Данные тока якоря (амперметр $PA1$) и скорости вращения двигателя (датчик скорости EPI) занести в таблицу 6.1.

16. Повторить п. 15, устанавливая регулятором $R17$ момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору M_{YB1}) согласно значениям M таблицы 6.1.

17. Плавно уменьшая регулятором $R17$ задание ШИП I, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0 .

18. Плавно уменьшая регулятором $R11$ задание ШИП ОЯ, уменьшить напряжение на якоре исследуемого двигателя до 0 .

19. Для получения статических характеристик двухконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости и по току при использовании П-регулятора скорости, в схеме лабораторного стенда замкнуть накоротко переключателем конденсатор $C101$.

20. Плавно увеличивая регулятором $R11$ задание для системы регулирования, установить требуемую скорость вращения двигателя (контролировать по датчику скорости EPI), например, 100 рад/с . Занести данное значение $\omega_{зад}$ в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Данные эксперимента

Тип регулятора	$\omega_{зад}, \text{ рад/с}$	$M, \text{ Нм}$ (M_{YB1})	$I_{я}, \text{ А}$ ($PA1$)	$\omega, \text{ рад/с}$ ($EP1$)
ПИ-регулятор		0		
		0,5		
		1		
		1,5		
		2		
		2,5		
		3		
П-регулятор		0		
		0,5		
		1		
		1,5		
		2		
		2,5		
		3		

20. Повторить п.п. 15 и 16.

21. Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно уменьшая регулятором $R17$ задание $ШИПП$, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA17$ отключить $ШИПП$;
- плавно уменьшая регулятором $R11$ задание $ШИП ОЯ$, уменьшить скорость исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA11$ отключить $ШИП ОЯ$;
- плавно уменьшая регулятором $R13$ задание $ШИП ОБ$, уменьшить ток возбуждения исследуемого двигателя до 0;
- тумблером $SA13$ отключить $ШИП ОБ$;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

22. По данным таблицы 6.1 построить механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(I_{я})$ характеристики двухконтурной системы $ШИП - ДПТ$ с ОС по скорости и по току для разных типов регуляторов.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема исследования двухконтурной системы $ШИП - ДПТ$ с ОС по скорости и по току на рисунке 6.3.
3. Таблица 6.1 с данными эксперимента.
4. Механические $\omega(M)$ и электромеханические $\omega(I_{я})$ характеристики двухконтурной системы $ШИП - ДПТ$ с ОС по скорости и по току для разных типов регуляторов по данным таблицы 6.1.

Контрольные вопросы

1. Пояснить необходимость использования двухконтурных систем регулирования координат электропривода.
2. Объяснить, используя графики электромеханических характеристик, принцип работы двухконтурной системы ШИП – ДПТ с ОС по скорости и по току.
3. Пояснить принцип подчиненного регулирования координат в двухконтурной системе ШИП – ДПТ.
4. Описать типы регуляторов, использованных в схеме лабораторного стенда.
5. Указать параметры каждого из использованных в схеме лабораторного стенда регуляторов, вид преобразования сигнала, осуществляемого регулятором; изобразить график переходной функции.
6. Объяснить особенности выбора параметров настройки регуляторов в схемах электропривода.
7. Что такое технический и симметричный оптимум?

Литература

1. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – Москва : Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
2. Гульков, Г. И. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г. И. Гульков. – Минск : Новое знание, 2007. – 394 с.
3. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. Н. Осипов. – Москва : Академия, 2006. – 304 с.
4. Ильинский, Н. Ф. Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
5. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин [и др.]. – Москва : Энергия, 1979. – 616 с.
6. Автоматизированный электропривод отрасли. Силовые преобразователи и системы автоматизированного электропривода постоянного тока: методические указания к лабораторным работам / Ю. В. Попов, В. Ф. Куксевич. – Витебск : УО «ВГТУ», 2014. – 42 с.
7. Руководство по выполнению работ на лабораторном стенде НТЦ-07.24.1 «Электропривод – МПСУ (М1)» / Могилев : НТП «Центр», 2012. – 48 с.

Учебное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Составители:
Куксевич Виталий Фёдорович

Редактор *Р.А. Никифорова*
Корректор *А.С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *В.Ф. Куксевич*

Подписано к печати 08.04.2025. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 3,4.
Уч.-изд. листов 3,6. Тираж 30 экз. Заказ № 83.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.