

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД  
ОТРАСЛИ.**

***СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА***

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

**к лабораторным работам для студентов  
специальности 1-53 01 01 «Автоматизация технологических  
процессов и производств»**

ВИТЕБСК  
2014

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Витебский государственный технологический университет»

**УТВЕРЖДАЮ**

**Первый проректор УО  
«ВГТУ»**

**С.И. Малашенков**

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ОТРАСЛИ**

***СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА***

***МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ***

**к лабораторным работам для студентов  
специальности 1-53 01 01 «Автоматизация технологических  
процессов и производств»**

**РЕКОМЕНДОВАНО**

**Редакционно-издательским  
советом УО «ВГТУ»**

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

**протокол № \_\_\_\_\_**

ВИТЕБСК  
2014

УДК 621.3(07)

Автоматизированный электропривод отрасли. Силовые преобразователи и системы автоматизированного электропривода постоянного тока : методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств».

Витебск: Министерство образования Республики Беларусь, УО "ВГТУ", 2013.

Составители: доц. Попов Ю.В.,  
ст. преп. Куксевич В.Ф.

Методические указания составлены в соответствии с учебной программой курса «Автоматизированный электропривод отрасли» и содержат теоретический материал, необходимый для исследования схем электропривода постоянного тока, снятия экспериментальных характеристик, анализа способов регулирования параметров электропривода и их расчёта. Они включают в себя описание порядка выполнения лабораторных работ, контрольные вопросы и перечень используемой литературы.

Одобрено кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» УО "ВГТУ" 24.10.2013, протокол № 3.

Рецензент: ст. преп. Ринейский К.Н.  
Редактор: доц. Новиков Ю.В.

Рекомендовано к опубликованию редакционно-издательским советом УО "ВГТУ" 4 декабря 2013 г., протокол № 8.

Ответственный за выпуск: Букин Ю.А.

Учреждение образования "Витебский государственный технологический университет"

---

Подписано к печати\_\_\_\_\_. Формат\_\_\_\_\_. Уч.-изд. лист.\_\_\_\_\_.  
Печать ризографическая. Тираж\_\_\_\_\_ экз. Заказ №\_\_\_\_\_

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».  
Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.  
210035, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

## Содержание

Лабораторная работа № 1 <i>Исследование статических характеристик электропривода с ДПТ НВ</i>	4
Лабораторная работа № 2 <i>Исследование разомкнутой системы УВ – ДПТ</i>	11
Лабораторная работа № 3 <i>Исследование разомкнутой системы ШИП – ДПТ</i>	19
Лабораторная работа № 4 <i>Исследование характеристик одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по току</i>	25
Лабораторная работа № 5 <i>Исследование характеристик одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости</i>	30
Лабораторная работа № 6 <i>Исследование характеристик двухконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости и по току</i>	35
Литература	42

# Лабораторная работа № 1

## *Исследование статических характеристик электропривода с ДПТ НВ*

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

### Теоретические сведения

К статическим характеристикам относятся зависимости, характеризующие работу привода в установившемся режиме:

–  $\omega(M)$  – механическая характеристика;

–  $\omega(I_a)$  – электромеханическая (скоростная) характеристика.

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

$$U_a = I_a R_{яц} + E, \quad (1.1)$$

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

$$M = K\Phi I_a, \quad (1.3)$$

где  $K$  – конструктивный коэффициент двигателя,

$E$  – противоЭДС двигателя,

$R_{яц}$  – сопротивление якорной цепи двигателя,

$\Phi$  – магнитный поток в двигателе.

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

$$\omega = \frac{U_a}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{K\Phi} I_a, \quad (1.4)$$

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

Рассмотрим характеристики для двигателя с независимым возбуждением. 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 нормальной, указанной заводом-изготовителем в 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:

- изменением напряжения якоря  $U_{я}$ ,
- изменением магнитного потока  $\Phi$ ;
- изменением сопротивления цепи якоря  $R_{яц}$ .

Регулирование изменением напряжения якоря (якорное регулирование).

Регулирование частоты вращения путем изменения подводимого к якорной цепи напряжения осуществляют с помощью отдельного регулируемого источника питания. В качестве источников питания, как правило, используют регулируемые выпрямители, выполненные на мощных управляемых вентилях – тиристорах. С уменьшением  $U_{я}$  частота вращения двигателя уменьшается. Механические характеристики жесткие (рисунок 1.1), а регулирование осуществляется только вниз от номинальной скорости.

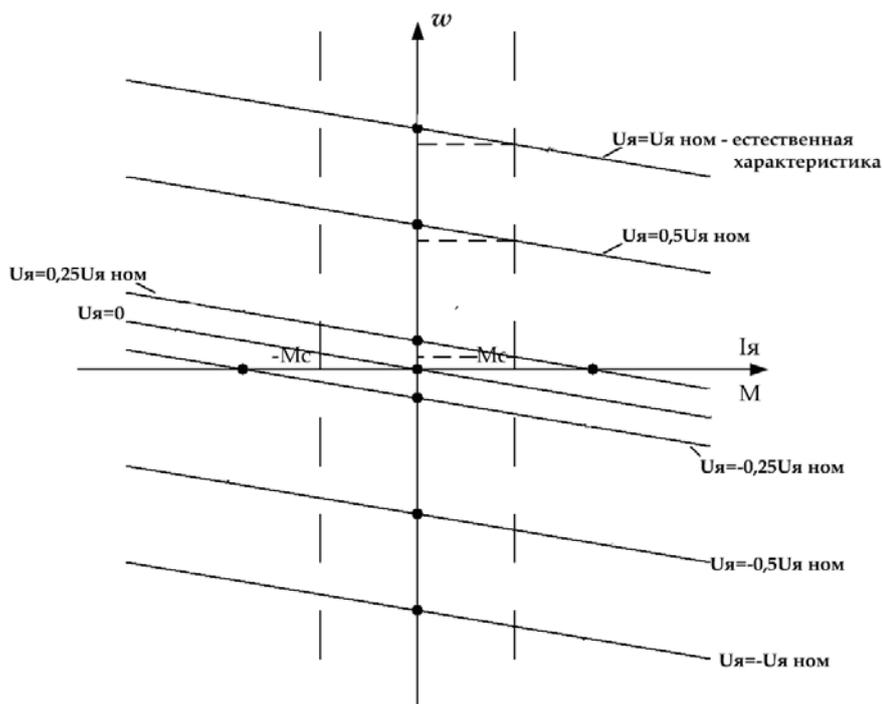


Рисунок 1.1 – Статические характеристики при разных напряжениях на обмотке якоря

Регулирование изменением магнитного потока (полюсное регулирование).

Осуществляется введением регулировочного реостата в цепь обмотки возбуждения двигателя. При увеличении сопротивления цепи возбуждения ток  $I_{\hat{a}}$  и магнитный поток  $\hat{O}$  возбуждения уменьшатся, и согласно (1.4) частота

вращения возрастет. Так как при больших значениях  $\omega$  двигатель идет вразнос, увеличивается искрение под щетками, уменьшение  $I_a$  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:

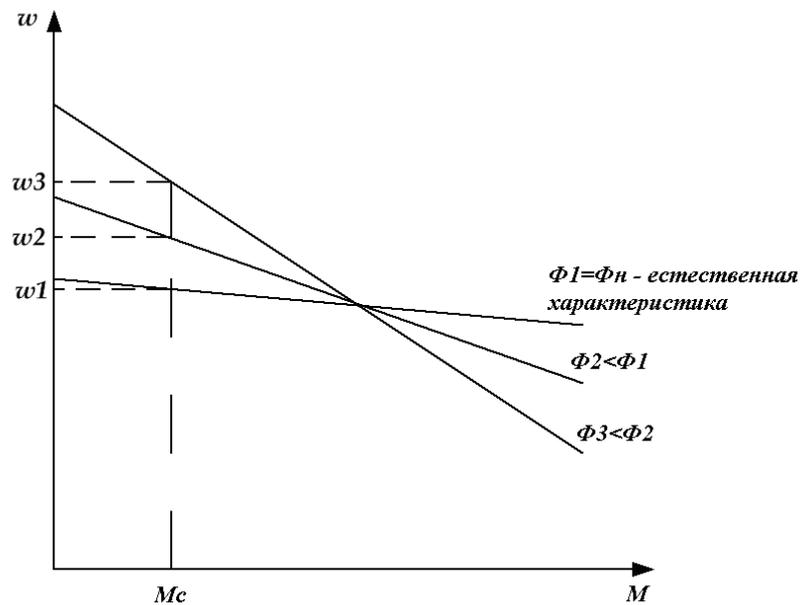


Рисунок 1.2 – Механические характеристики при регулировании скорости изменением магнитного потока

Электромеханические характеристики при регулировании потоком изображены на рисунке 1.3.

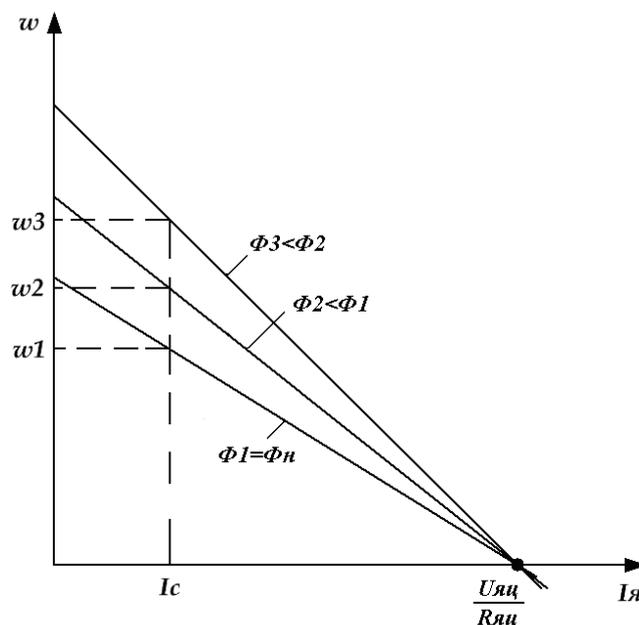


Рисунок 1.3 – Электромеханические характеристики при регулировании скорости изменением магнитного потока

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.

Введение сопротивления в цепь якоря позволяет регулировать частоту вращения только вниз от номинальной (чем больше сопротивление реостата, тем меньше частота вращения).

Механические характеристики для данного способа регулирования представлены на рисунке 1.4.

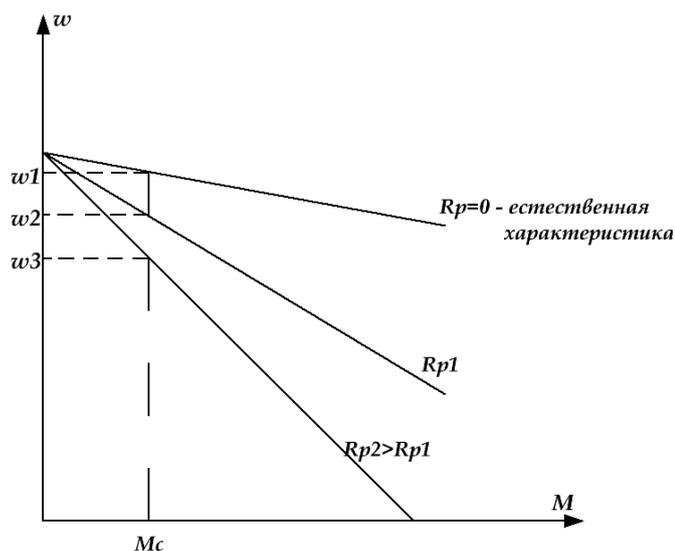


Рисунок 1.4 – Механические характеристики при реостатном регулировании

Данный метод имеет много недостатков:

- из-за наличия реостата уменьшается КПД;
- небольшой диапазон регулирования (при уменьшении нагрузки диапазон регулирования будет уменьшаться, а при холостом ходе – вообще отсутствует);
- с увеличением  $R_p$  наклон характеристик сильно изменяется.

Поэтому для регулирования на практике этот способ не применяют, но полученные при этом характеристики широко используются для ограничения токов и моментов при пуске, торможении и реверсе.

### **Порядок выполнения работы**

*В данной работе исследуемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения является машина М1, в качестве нагрузочного устройства используется электромагнитная муфта УВ1.*

*При проведении эксперимента ток якоря исследуемого двигателя не должен превышать  $2I_f = 2 \cdot 3,29 = 6,58 \text{ А}$ .*

*Следует избегать продолжительной работы при токах якоря, превышающих  $I_f = 3,29 \text{ А}$ , чтобы избежать перегрева двигателя.*

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 1.5.
2. Перед включением стенда необходимо 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 SA3 перевести в положение «M1-M2».
3. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть», расположенный в левой нижней части стенда).
4. Тумблером SA13 включить ШИП ОВ.
5. Плавно увеличивая регулятором R13 задание ШИП ОВ, установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя 0,18 А (контролировать по амперметру PA5).
6. Тумблер SA1 перевести в положение «ШИП».
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 требуемое значение напряжения якоря исследуемого двигателя 220 В (контролировать по вольтметру PV1).
10. Для получения естественных механической и электромеханической характеристик тумблером SA17 включить ШИП1.
11. Данные тока якоря (амперметр PA1) и скорости вращения двигателя (датчик скорости EP1) занести в таблицу 1.1.
12. Повторить п. 11, устанавливая регулятором R17 момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору  $M_{YB1}$ ) согласно значениям  $M$  таблицы 1.1.
13. Плавно уменьшая регулятором R17 задание ШИП1, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0.

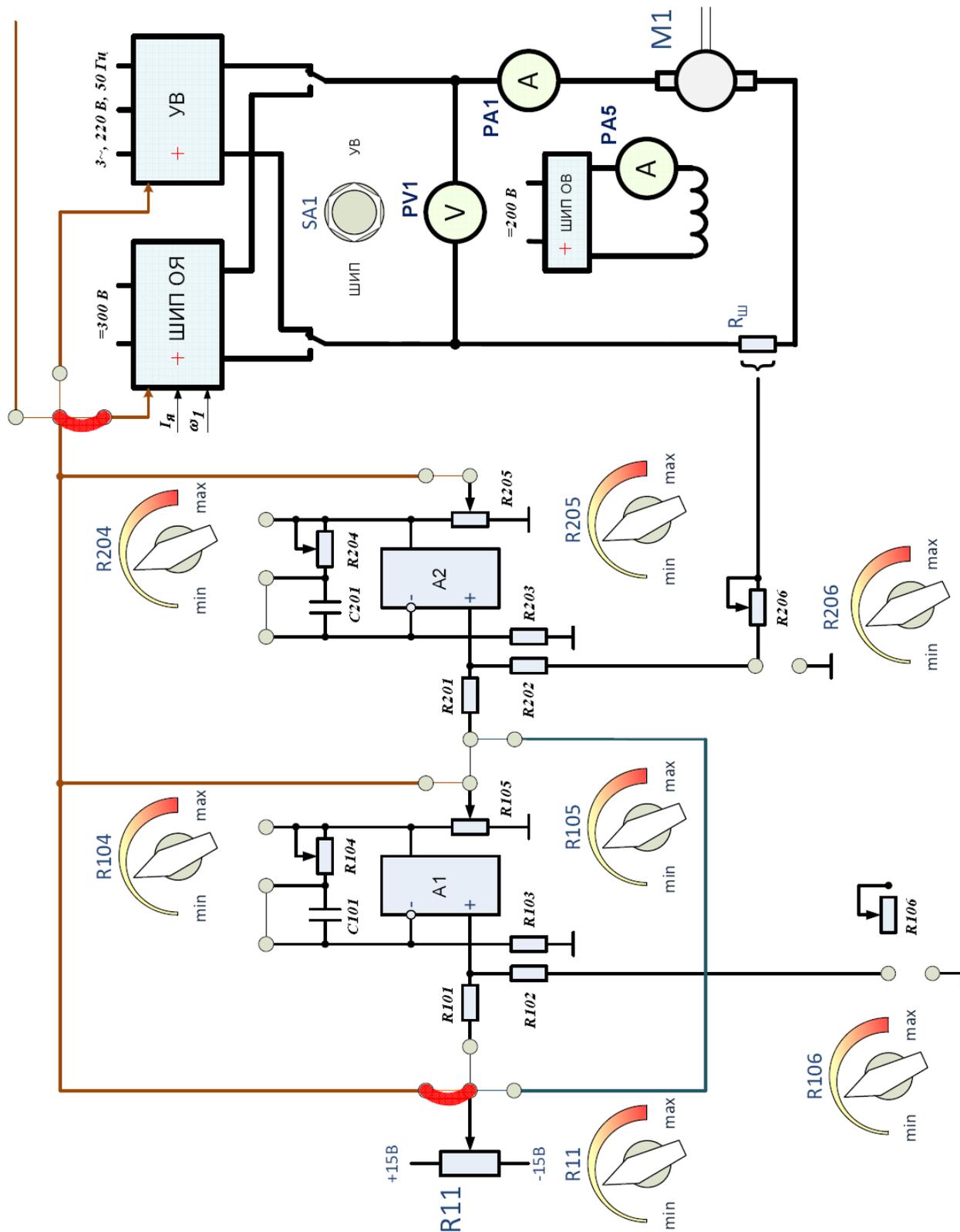


Рисунок 1.5 – Схема для исследования статических характеристик ДПТ НВ

14. Для получения искусственных механических и электромеханических характеристик при изменении напряжения якоря повторить п. 11-13, устанавливая значение напряжения якоря (контролировать по вольтметру *PV1*) равным сначала  $200\text{ В}$ , а затем  $180\text{ В}$ .

15. Для получения искусственных механических и электромеханических характеристик при изменении тока возбуждения установить с помощью регулятора *R11* значение напряжения якоря  $220\text{ В}$ .

16. Повторить п. 11-13, предварительно установив регулятором *R13* значение тока возбуждения (контролировать по амперметру *PA5*) сначала равным  $0,16\text{ А}$ , а затем  $0,14\text{ А}$ .

Таблица 1.1 – Экспериментальные данные

Характеристика двигателя	Неизменяемые параметры	№ п/п	Экспериментальные данные		
			$M, \text{ Нм}$ ( $M_{YB1}$ )	$I_{\text{я}}, \text{ А}$ ( $PA1$ )	$\omega, \text{ рад/с}$ ( $EP1$ )
Естественная	$U = U_H = 220\text{ В}$ $I_B = I_{BH} = 0,18\text{ А}$	1	0		
		2	0,5		
		3	1,0		
		4	1,5		
		5	2,0		
Искусственная при изменении напряжения якоря	$U = 200\text{ В}$ $I_B = I_{BH} = 0,18\text{ А}$	1	0		
		2	0,5		
		3	1,0		
		4	1,5		
		5	2,0		
	$U = 180\text{ В}$ $I_B = I_{BH} = 0,18\text{ А}$	1	0		
		2	0,5		
		3	1,0		
		4	1,5		
		5	2,0		
Искусственная при изменении тока возбуждения	$U = U_H = 220\text{ В}$ $I_B = 0,16\text{ А}$	1	0		
		2	0,5		
		3	1,0		
		4	1,5		
		5	2,0		
	$U = U_H = 220\text{ В}$ $I_B = 0,14\text{ А}$	1	0		
		2	0,5		
		3	1,0		
		4	1,5		
		5	2,0		

17. 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  $ШИП ОБ$ , уменьшить ток возбуждения исследуемого двигателя до 0;
  - тумблером  $SA13$  отключить  $ШИП ОБ$ ;
  - выключить автоматический выключатель «Сеть».
18. По экспериментальным данным (таблица 1.1) построить механические  $\omega(M)$  и электромеханические  $\omega(I_{я})$  характеристики двигателя для всех случаев.

### 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 лабораторной установки.
4. Пояснить мягкость реостатных характеристик.

## Лабораторная работа № 2

### *Исследование разомкнутой системы УВ – ДПТ*

**Цель работы:** экспериментальное определение механических характеристик разомкнутой системы УВ – ДПТ; определение влияния преобразователя на механическую характеристику двигателя.

### Теоретические сведения

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

Функционально в УВ можно выделить два блока (рисунок 2.1): систему импульсно-фазового управления (СИФУ) и блок вентилях (БВ). 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. Выходным сигналом БВ в системах электропривода является среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{ср}$ .

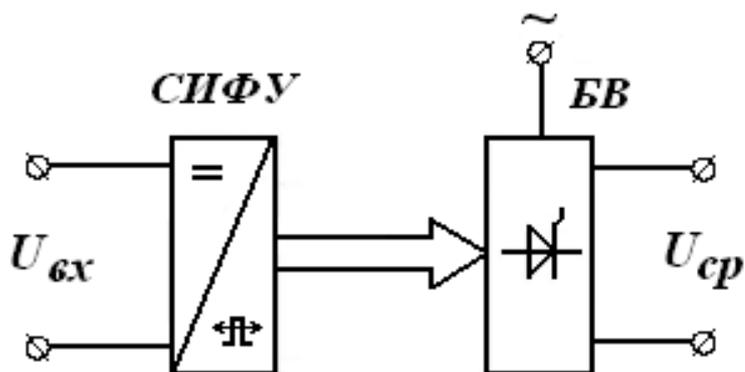


Рисунок 2.1 – Функциональная схема УВ

БВ управляемого выпрямителя можно получить из обычного заменой в нем неуправляемых вентилях (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.

Регулирование выпрямленного напряжения в УВ осуществляется фазовым способом. Он основан на управлении моментом отпирания тиристорov, включенных между источником переменного напряжения и нагрузкой в пределах полупериода входного переменного напряжения. Угол задержки отпирания тиристора обозначают  $\alpha$  и называют углом управления.

Схема БВ управляемого выпрямителя и временные диаграммы, поясняющие его работу, представлены на рисунке 2.2.

Рассмотрим работу УВ на активную нагрузку. На вход БВ со вторичной обмотки трансформатора поступает переменное напряжение  $U_2$ . СИФУ вырабатывает импульсы напряжения  $U_y$ , которые подводятся к управляющим электродам тиристорov и временное положение которых можно изменять в пределах полупериода напряжения  $U_2$ . На временных диаграммах (рисунок 2.2) угол управления принят равным  $90^\circ$ . 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 напряжение  $U_2$ . Изменяя угол управления  $\alpha$ , можно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения  $U_0$ .

Очевидно, что при изменении угла управления от  $0$  до  $180^\circ$  среднее значение выпрямленного напряжения уменьшается от  $U_0$  до  $0$ .

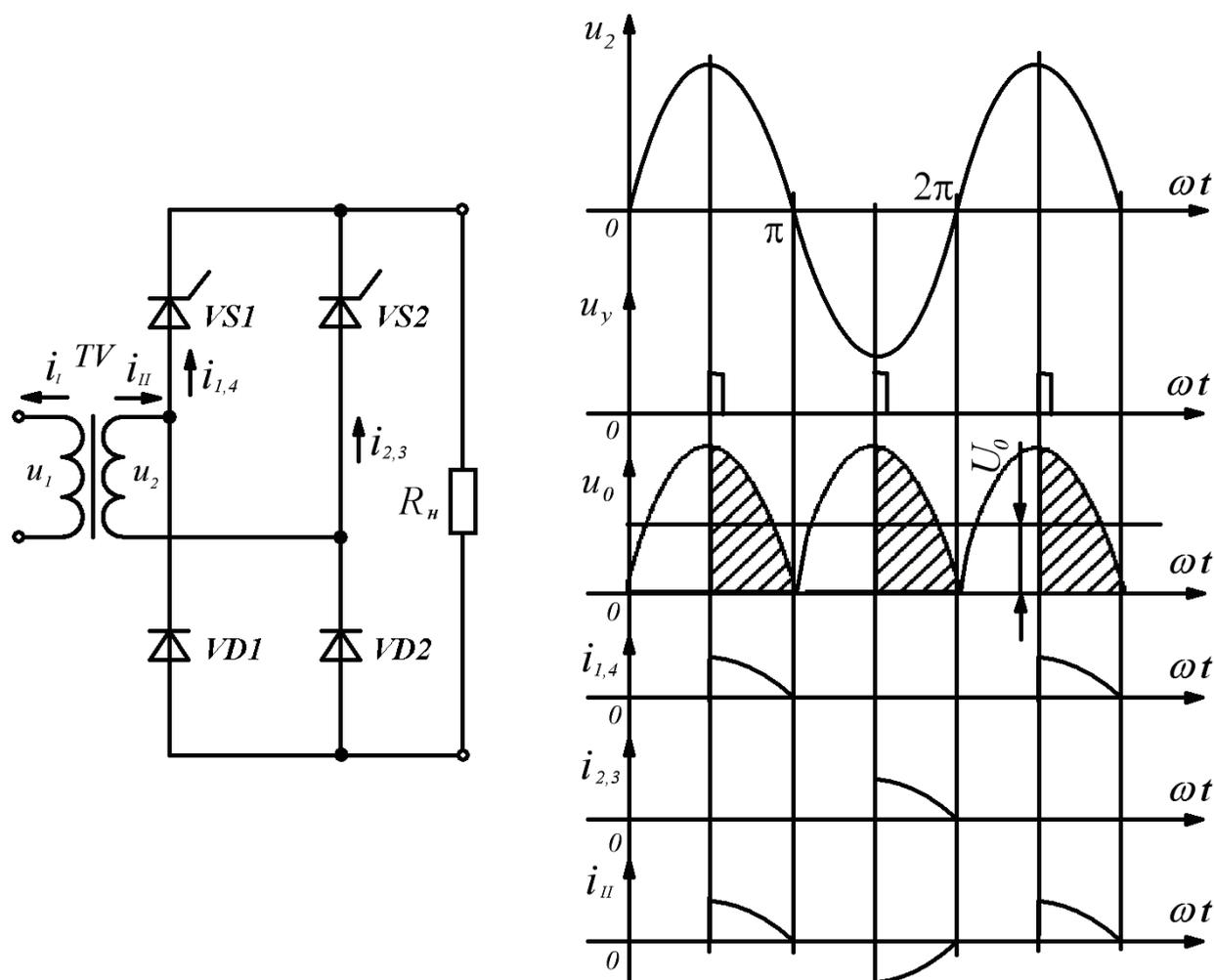


Рисунок 2.2 – Схема БВ управляемого выпрямителя и временные диаграммы

Возможность плавной регулировки выпрямленного напряжения является основным достоинством управляемого выпрямителя. В качестве его недостатков можно указать следующие:

- усложнение схемы, поскольку необходима система управления;
- увеличение коэффициента пульсации выпрямленного напряжения;
- появление сдвига по фазе между током и напряжением в первичной обмотке трансформатора. Из временных диаграмм (рисунок 2.2) видно, что  $u_2$  и  $i_{II}$  смещены по фазе на угол  $\alpha$ . На этот же угол будут отличаться по фазе  $u_1$  и  $i_1$ .

Таким образом, даже при чисто активной нагрузке управляемый выпрямитель 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 управляемого выпрямителя нет необходимости в использовании четырех тиристоров. Однако при работе на нагрузку индуктивного характера (обмотки двигателей) эта 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 действие открытого 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  $\alpha$  – угол управления тиристора,  $E_{d0}$  – значение ЭДС преобразователя при угле управления, равном нулю,  $m$  – фазность выпрямления преобразователя, равная числу пульсаций за период (для однофазных мостовых схем и схем с нулевым выводом  $m=2$ ; для трехфазных мостовых схем  $m=6$ , для схем с нулевым выводом  $m=3$ ),  $E_2$  – ЭДС вторичной обмотки трансформатора (для трехфазных схем с нулевым выводом – это фазное значение, для мостовых – линейное значение),  $R_n$  – сопротивление преобразователя.

Как следует из (2.1), характеристики будут прямыми, но при работе 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. Этот режим 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 на рисунке 2.3.

Область прерывистых токов обозначена на рисунке 2.3 цифрой I, а область непрерывных токов – цифрой II.

Ширина области прерывистых токов зависит:

- 1) от схемы преобразователя – чем больше фазность выпрямления, тем ширина меньше;
- 2) от угла управления – чем больше угол управления, тем ширина больше;
- 3) от индуктивности якорной цепи.

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

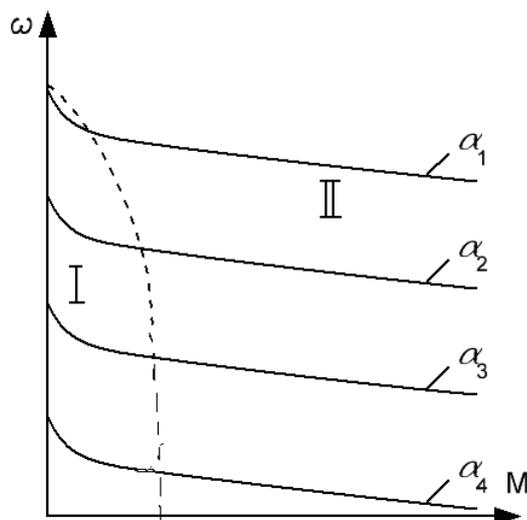


Рисунок 2.3 – Механические характеристики системы УВ – ДПТ

### Порядок выполнения работы

В данной работе исследуемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения является машина М1, в качестве нагрузочного устройства используется электромагнитная муфта УВ1.

При проведении эксперимента ток якоря исследуемого двигателя не должен превышать  $2I_f = 2 \cdot 3,29 = 6,58 \text{ А}$ .

Следует избегать продолжительной работы при токах якоря, превышающих  $I_f = 3,29 \text{ А}$ , чтобы избежать перегрева двигателя.

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 2.4.
2. Перед включением стенда необходимо 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 SA3 перевести в положение «М1-М2».
3. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть», расположенный в левой нижней части стенда).
4. Тумблером SA13 включить ШИП ОБ.
5. Плавно увеличивая регулятором R13 задание ШИП ОБ, установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя 0,18 А (контролировать по амперметру PA5).

6. Тумблер SA1 перевести в положение «УВ».

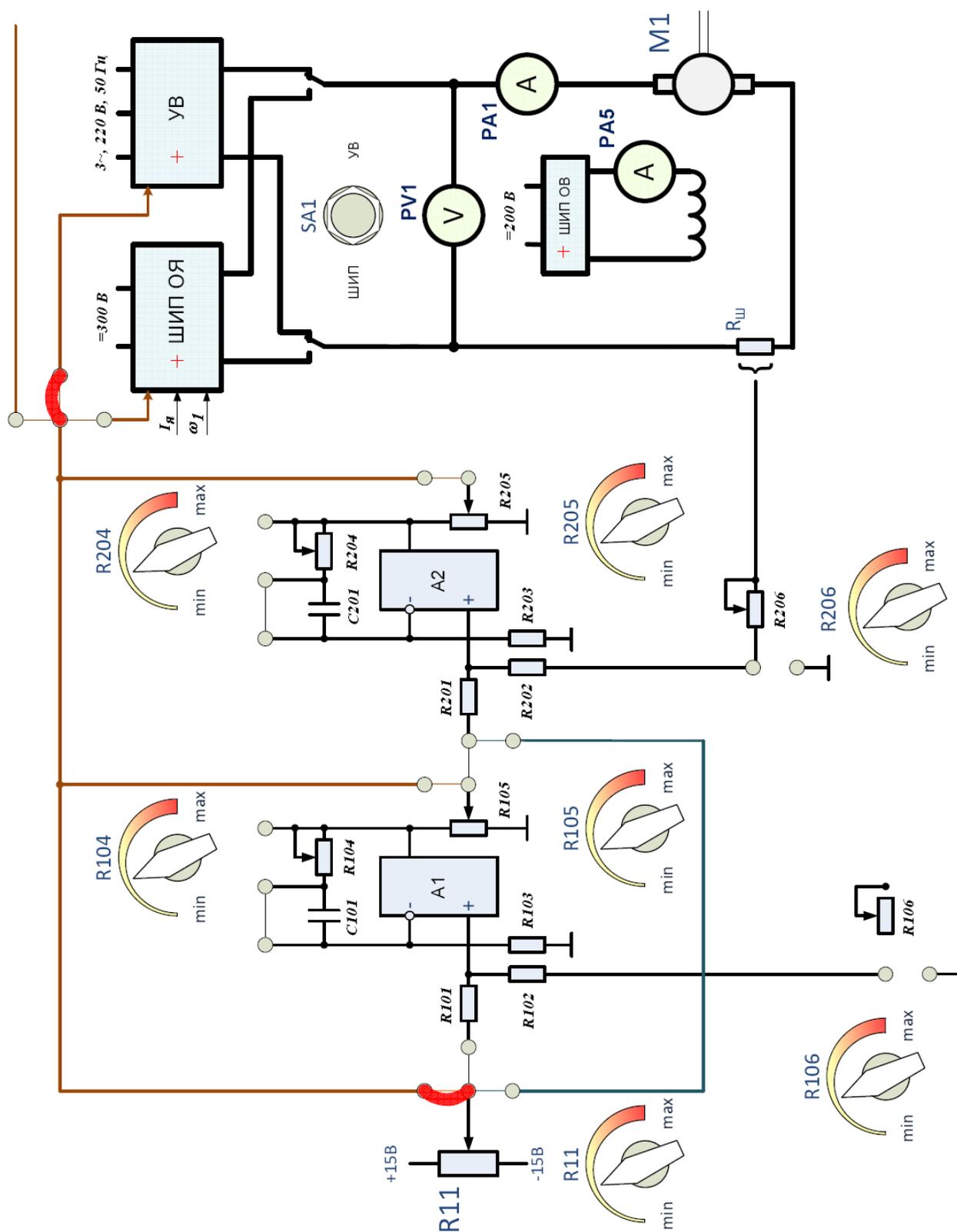


Рисунок 2.4 – Схема для исследования разомкнутой системы УВ–ДПТ

7. Тумблером *SA16* выбрать требуемый режим работы *УВ* (однофазный либо трёхфазный).

8. Регулятор *R11* установить в такое положение, при котором угол открытия тиристоров будет максимальным ( $120^\circ$  для трёхфазного режима либо  $180^\circ$  для однофазного).

9. Тумблером *SA15* включить *УВ*.

10. Плавно увеличивая регулятором *R11* задание *ШИП ОЯ*, установить требуемое значение напряжения якоря исследуемого двигателя  $220\text{ В}$  (контролировать по вольтметру *PV1*).

11. Тумблером *SA17* включить *ШИП1*.

12. Занести в таблицу 2.1 показанное прибором стенда начальное значение угла открытия тиристоров  $\alpha$ .

13. Данные напряжения якоря (вольтметр *PV1*), тока якоря (амперметр *PA1*) и скорости вращения двигателя (датчик скорости *EP1*) занести в таблицу 2.1.

14. Повторить п. 13, устанавливая регулятором *R17* момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору *M<sub>УВ1</sub>*) согласно значениям *M* таблицы 2.1.

15. Плавно уменьшая регулятором *R17* задание *ШИП1*, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до  $0$ .

16. Устанавливая регулятором *R11* значения угла открытия тиристоров согласно значениям  $\alpha$  таблицы 2.1, повторить п.13-15.

17. 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».

18. По экспериментальным данным (таблица 2.1) построить механические  $\omega(M)$  характеристики двигателя при различных значениях угла открытия тиристоров.

Таблица 2.1 – Экспериментальные данные

Режим работы УВ	Значение угла открытия тиристоров	№ п/п	Экспериментальные данные			
			$U, В$ ( $PV1$ )	$I_{я}, А$ ( $PA1$ )	$M, Нм$ ( $M_{YB1}$ )	$\omega, рад/с$ ( $EP1$ )
Однофазный	$\alpha = 0^{\circ}$	1			0	
		2			0,5	
		3			1,0	
		4			1,5	
		5			2,0	
	$\alpha = 95^{\circ}$	1			0	
		2			0,5	
		3			1,0	
		4			1,5	
		5			2,0	
	$\alpha = 105^{\circ}$	1			0	
		2			0,5	
		3			1,0	
		4			1,5	
		5			2,0	
Трехфазный	$\alpha = 0^{\circ}$	1			0	
		2			0,5	
		3			1,0	
		4			1,5	
		5			2,0	
	$\alpha = 55^{\circ}$	1			0	
		2			0,5	
		3			1,0	
		4			1,5	
		5			2,0	
	$\alpha = 65^{\circ}$	1			0	
		2			0,5	
		3			1,0	
		4			1,5	
		5			2,0	

### Контрольные вопросы

1. Пояснить функциональную схему УВ.
2. Что такое фазовый способ регулирования выпрямленного 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. Пояснить принцип совместного и раздельного управления реверсивных УВ.
7. Объяснить принцип действия схемы лабораторной установки.
8. Перечислить достоинства и недостатки системы УВ – ДПТ.
9. Пояснить особенности механических характеристик системы УВ – ДПТ.

## Лабораторная работа № 3

### *Исследование разомкнутой системы ШИП – ДПТ*

**Цель работы:** экспериментальное определение механических характеристик разомкнутой системы ШИП – ДПТ; определение влияния преобразователя на механическую характеристику двигателя.

#### Теоретические сведения

Широтно-импульсные преобразователи (ШИП) – электронные устройства, преобразующие энергию постоянного тока с неизменным значением напряжения в энергию постоянного тока с регулируемой величиной напряжения.

Для обеспечения работы привода в 4-х квадрантах используют схему ШИП, представленную на рисунке 3.1:

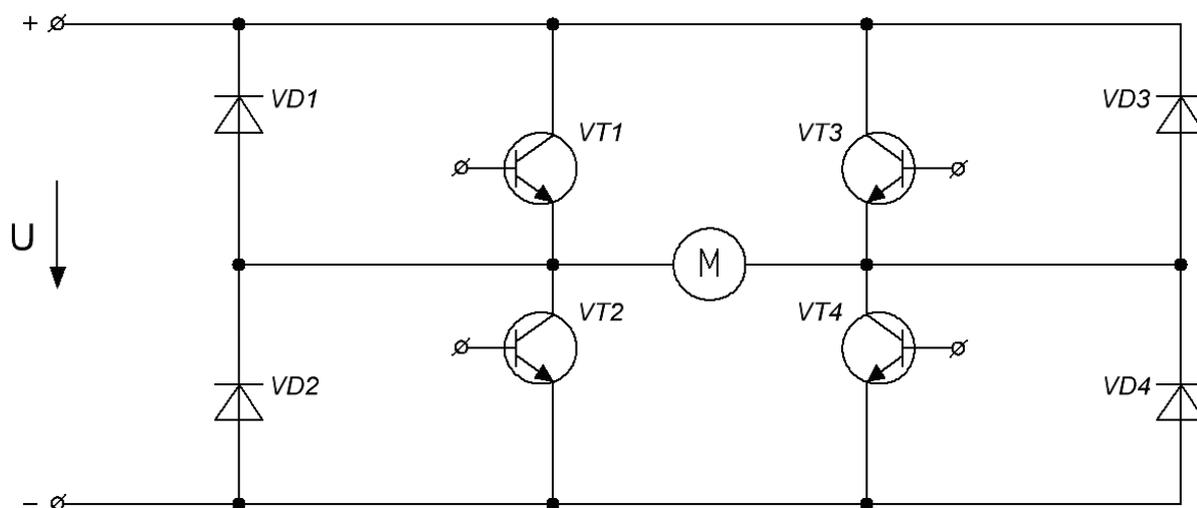


Рисунок 3.1 – Схема транзисторного ШИП

Используют различные алгоритмы управления транзисторами. 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 (рисунок 3.2) представляет собой разнополярные импульсы, длительность которых регулируется входным сигналом. В ШИП с симметричным управлением среднее значение напряжения на выходе ШИП равно нулю, когда скважность  $\gamma = 0,5$ . Симметричный способ управления обычно используется в маломощных приводах постоянного тока.

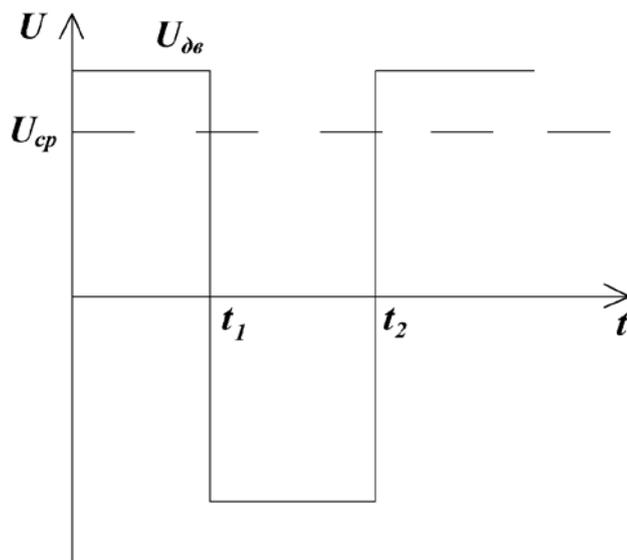


Рисунок 3.2 – Диаграмма напряжения на выходе ШИП

Напряжение на двигателе будет равно:

$$U_{cp} = \frac{Ut_1 - Ut_2}{T_n} = (2\gamma - 1)U . \quad (3.1)$$

Уравнение механической характеристики:

$$\omega = \frac{(2\gamma - 1)U}{K\Phi} - \frac{R_{яц}}{(K\Phi)^2} M . \quad (3.2)$$

Из формулы (3.2) видно, что, изменяя скважность, можно не только регулировать скорость, но и изменять направление вращения.

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

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

Для исключения этого недостатка разработаны способы, обеспечивающие однополярное напряжение на выходе ШИП. Простейшим из них является *несимметричный*. 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  $VT1$  равна  $\gamma = 0$ .

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

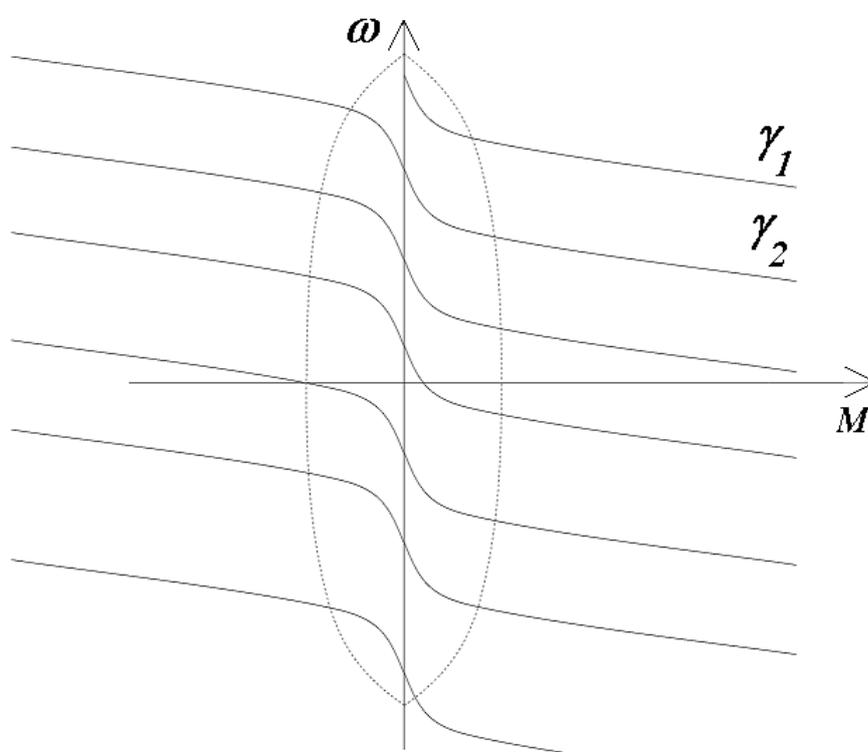


Рисунок 3.3 – Механические характеристики системы ШИП – ДПТ

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.

В настоящее время выпускаются биполярные транзисторы с изолированным затвором, которые рассчитаны на большие токи, поэтому ШИП могут применяться и в приводах большой мощности.

## Порядок выполнения работы

В данной работе исследуемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения является машина  $M1$ , в качестве нагрузочного устройства используется электромагнитная муфта  $YB1$ .

При проведении эксперимента ток якоря исследуемого двигателя не должен превышать  $2I_f = 2 \cdot 3,29 = 6,58 \text{ A}$ .

Следует избегать продолжительной работы при токах якоря, превышающих  $I_f = 3,29 \text{ A}$ , чтобы избежать перегрева двигателя.

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 3.4.
2. Перед включением стенда необходимо 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  $SA3$  перевести в положение « $M1-M2$ ».
3. Подключить стенд к трехфазной сети (включить автоматический выключатель «Сеть», расположенный в левой нижней части стенда).
4. Тумблером  $SA13$  включить ШИП  $OB$ .
5. Плавно увеличивая регулятором  $R13$  задание ШИП  $OB$ , установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя  $0,18 \text{ A}$  (контролировать по амперметру  $PA5$ ).
6. Тумблер  $SA1$  перевести в положение «ШИП».
7. Регулятор  $R11$  установить в такое положение, при котором скважность ШИП  $OЯ$  (контролировать по индикатору «Скважность, %») будет  $50 \%$ .
8. Тумблером  $SA11$  включить ШИП  $OЯ$ .
9. Плавно увеличивая регулятором  $R11$  задание ШИП  $OЯ$ , установить требуемое значение напряжения якоря исследуемого двигателя  $220 \text{ В}$  (контролировать по вольтметру  $PV1$ ). Занести в таблицу 3.1 значение скважности ШИП  $OЯ$  (индикатор «Скважность, %»).
10. Тумблером  $SA17$  включить ШИП  $I$ .
11. Данные тока якоря (амперметр  $PA1$ ) и скорости вращения двигателя (датчик скорости  $EPI$ ) занести в таблицу 3.1.
12. Повторить п. 11, устанавливая регулятором  $R17$  момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору  $M_{YB1}$ ) согласно значениям  $M$  таблицы 3.1.

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

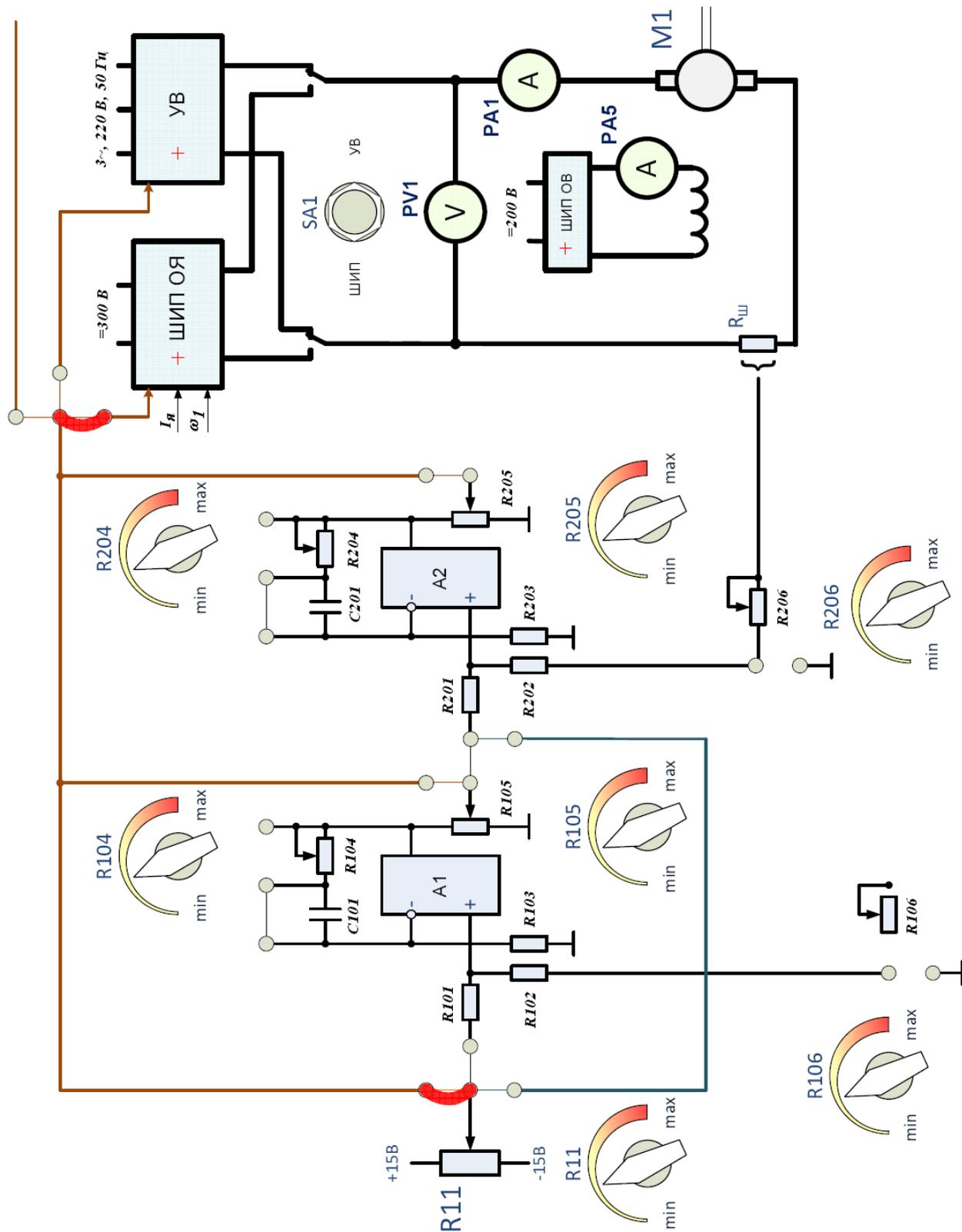


Рисунок 3.4 – Схема для исследования разомкнутой системы ШИП – ДПТ

Таблица 3.1 – Экспериментальные данные

Устанавливаемые параметры	№ п/п	Экспериментальные данные		
		$M, Нм$ ( $M_{YBI}$ )	$I_{я}, A$ ( $PA1$ )	$\omega, рад/с$ ( $EP1$ )
$U = U_H = 220 В$ $Q = \%$	1	0		
	2	0,5		
	3	1,0		
	4	1,5		
	5	2,0		
$U = 200 В$ $Q = \%$	1	0		
	2	0,5		
	3	1,0		
	4	1,5		
	5	2,0		
$U = 180 В$ $Q = \%$	1	0		
	2	0,5		
	3	1,0		
	4	1,5		
	5	2,0		

14. Регулятором  $R11$  установить значение напряжения якоря исследуемого двигателя  $200 В$  (контролировать по вольтметру  $PV1$ ). Занести в таблицу 3.1 значение скважности ШИП ОЯ (индикатор «Скважность, %»).

15. Повторить п. 11, устанавливая регулятором  $R17$  момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору  $M_{YBI}$ ) согласно значениям  $M$  таблицы 3.1.

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

17. Регулятором  $R11$  установить значение напряжения якоря исследуемого двигателя  $180 В$  (контролировать по вольтметру  $PV1$ ). Занести в таблицу 3.1 значение скважности ШИП ОЯ (индикатор «Скважность, %»).

18. Повторить п. 11, устанавливая регулятором  $R17$  момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору  $M_{YBI}$ ) согласно значениям  $M$  таблицы 3.1.

19. Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно уменьшая регулятором  $R17$  задание ШИП, уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до  $0$ ;
- тумблером  $SA17$  отключить ШИП;

- 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 ОБ, уменьшить ток возбуждения исследуемого двигателя до 0;
  - тумблером SA13 отключить ШИП ОБ;
  - выключить автоматический выключатель «Сеть».
20. По экспериментальным данным (таблица 3.1) построить механические  $\omega(M)$  характеристики двигателя для различных значений скважности ШИП ОЯ.

### 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, используя диаграммы напряжения, принцип работы ШИП с несимметричным управлением.
5. Перечислить достоинства ШИП по сравнению с тиристорными преобразователями.
6. Объяснить принцип действия схемы лабораторной установки.

## Лабораторная работа № 4

### *Исследование характеристик одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по току*

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

#### Теоретические сведения

При питании двигателя от идеального источника электромеханическая характеристика определяется выражением:

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

Статическая ошибка, обусловленная изменением нагрузки, будет равна:

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

При питании от реального преобразователя

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

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

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

Погрешность стала больше, точность уменьшилась.

Если сигнал управления на вход преобразователя подавать через усилитель, то

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

где  $U_y$  – сигнал на входе усилителя.

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

Точность при этом не изменилась.

Для повышения точности регулирования в приводах применяют обратные связи.

Если использовать положительную обратную связь по току, то

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

где  $U_{зс}$  – сигнал задания скорости,

$K_m$  – коэффициент обратной связи по току.

Подставляя (4.2) в (4.1), получают уравнение электромеханической характеристики привода с обратной связью по току

$$\omega = K_n K_\delta K_y U_{зс} - (R - K_m K_n K_y) K_\delta I_\alpha, \quad (4.3)$$

где  $R = (R_{яц} + R_n)$ .

Статическая ошибка при этом

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

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

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 привода только с ОС по току не применяются.

### Порядок выполнения работы

*В данной работе исследуемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения является машина М1, в качестве нагрузочного устройства используется электромагнитная муфта УВ1.*

*При проведении эксперимента ток якоря исследуемого двигателя не должен превышать  $2I_f = 2 \cdot 3,29 = 6,58 \text{ А}$ .*

*Следует избегать продолжительной работы при токах якоря, превышающих  $I_f = 3,29 \text{ А}$ , чтобы избежать перегрева двигателя.*

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 4.1. В соответствии с технической документацией стенда настроить контур тока при помощи регуляторов R204, R205 и R206.

2. Перед включением стенда необходимо 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 SA3 перевести в положение «М1-М2».

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

4. Тумблером SA13 включить ШИП ОБ.

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

6. Тумблером SA17 включить ШИП1.

7. Плавно увеличивая регулятором *R17* задание *ШИП1*, увеличить момент нагрузки на валу двигателя до максимального значения, при котором двигатель при включении гарантированно не начнёт вращаться.

8. Занести в таблицу 4.1 значение момента нагрузки на валу (прибор  $M_{УВ1}$ )

9. Тумблер *SA1* перевести в положение «*ШИП*».

10. Регулятор *R11* установить в центральное положение.

11. Тумблером *SA11* включить *ШИП ОЯ*.

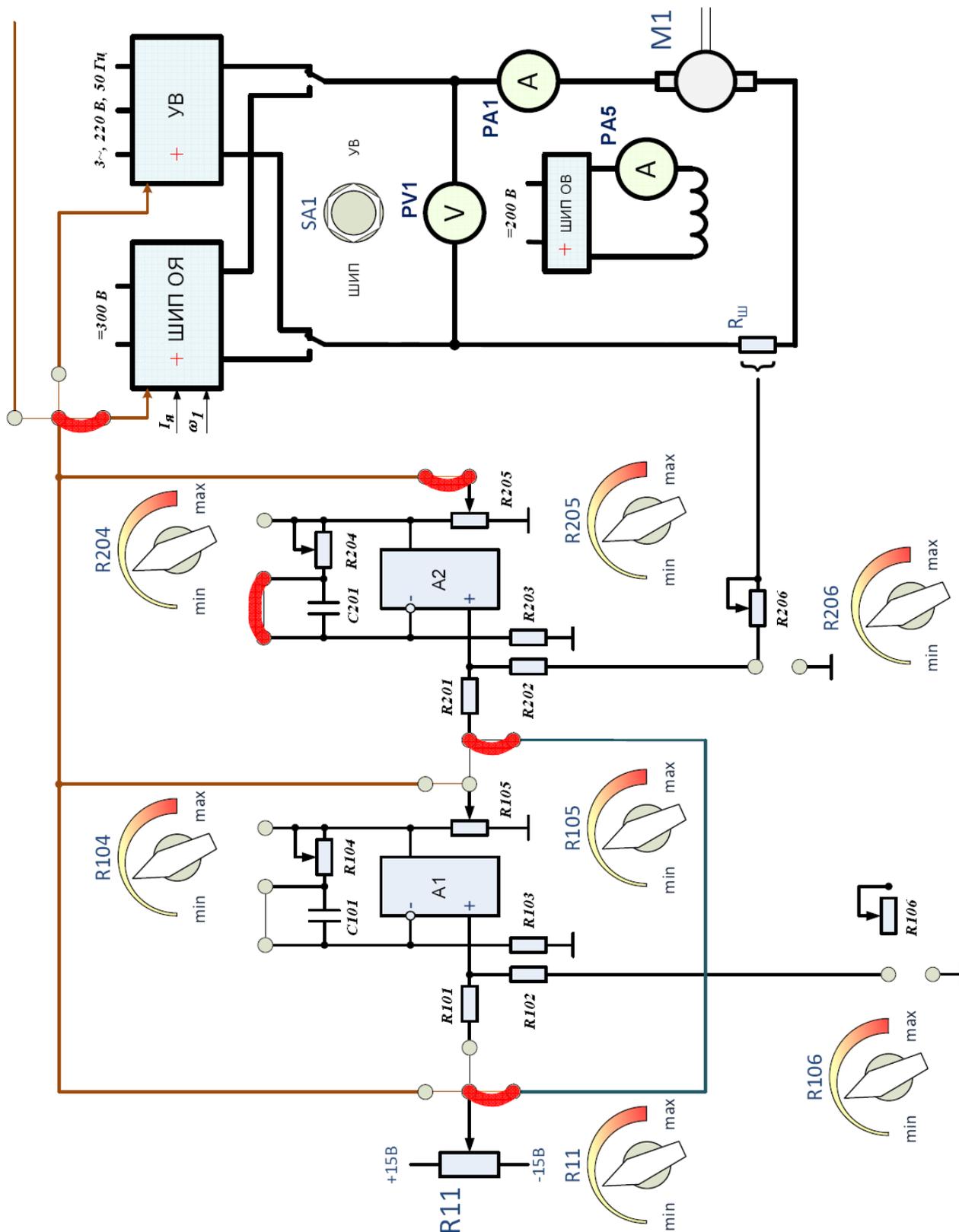


Рисунок 4.1 – Схема для исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по току

12. Плавно увеличивать регулятором  $R11$  задание для системы регулирования до тех пор, пока значение тока якоря не достигнет такой величины (контролировать по амперметру  $PA1$ ), при которой двигатель не начнёт вращение (контролировать по датчику скорости  $EPI$ ).

13. Уменьшить регулятором  $R11$  задание для системы регулирования до момента прекращения вращения двигателя.

14. Данные тока якоря (амперметр  $PA1$ ) и скорости вращения двигателя (датчик скорости  $EPI$ ) занести в таблицу 4.1.

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

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные

№ п/п	Экспериментальные данные		
	$M, Нм$ ( $M_{YBI}$ )	$I_{я}, А$ ( $PA1$ )	$\omega, рад/с$ ( $EPI$ )
1			
2	2,5		
3	2,0		
4	1,5		
5	1,0		
6	0,5		
7	0		

16. 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  $ШИП ОЯ$ ;
- тумблером  $SA13$  отключить  $ШИП ОВ$ ;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

17. По экспериментальным данным (таблица 4.1) построить механическую  $\omega(M)$  и электромеханическую  $\omega(I_{я})$  характеристики двигателя одноконтурной системы  $ШИП - ДПТ$  с обратной связью по току.

### Контрольные вопросы

1. Пояснить особенности разомкнутых и замкнутых систем регулирования электропривода.

2. Пояснить необходимость использования замкнутой системы регулирования с обратной связью по току.

3. Объяснить, используя графики механических характеристик, принцип работы одноконтурной системы  $ШИП - ДПТ$  с обратной связью по току.

4. Описать тип регулятора, использованного в схеме лабораторной установки.

5. Указать параметры регулятора, вид преобразования сигнала, осуществляемого регулятором; изобразить график переходной функции.

## Лабораторная работа № 5

### *Исследование характеристик одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости*

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

#### Теоретические сведения

При питании двигателя от идеального источника электромеханическая характеристика определяется выражением:

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

Статическая ошибка, обусловленная изменением нагрузки, будет равна:

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

При питании от реального преобразователя

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

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

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

Погрешность стала больше, точность уменьшилась.

Если сигнал управления на вход 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.

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

Точность при этом не изменилась.

Для повышения точности регулирования в приводах применяют обратные связи.

Если использовать отрицательную обратную связь по скорости, то

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

где  $U_{зс}$  – сигнал задания скорости,

$K_c$  – коэффициент обратной связи 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

$$\omega = \frac{K_n K_\partial K_y U_{зс} - (R_{яц} + R_n) K_\partial I_я}{1 + K_n K_\partial K_y K_c}.$$

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

$$\omega = \frac{KU_{зс} - (R_{яц} + R_n) K_\partial I_я}{1 + KK_c} = \frac{K}{1 + KK_c} U_{зс} - \frac{R}{1 + KK_c} K_\partial I_я.$$

Статическая ошибка при этом

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

Суммирующий усилитель, применяемый в данном приводе, называют пропорциональным регулятором (П-регулятор). Если  $K_y$  увеличивать, то при  $K_y \rightarrow \infty$ , параметры системы будут  $\delta_\omega \rightarrow 0$ ,  $\omega \rightarrow \frac{U_{zc}}{K_c}$ .

Характеристика будет абсолютно жесткой.

Но, как известно из курса ТАУ, при большом значении коэффициента усиления возникают проблемы в динамике (неустойчивость, автоколебания). Этого можно избежать, если применить ПИ-регулятор. Он обеспечивает хорошую динамику привода и абсолютно жесткую механическую характеристику в статике, т. к. у ПИ-регулятора в установившемся режиме

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

Привод с отрицательной обратной связью по скорости применяется очень широко, т. к. позволяет получить высокую точность регулирования.

### Порядок выполнения работы

*В данной работе исследуемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения является машина М1, в качестве нагрузочного устройства используется электромагнитная муфта УВ1.*

*При проведении эксперимента ток якоря исследуемого двигателя не должен превышать  $2I_f = 2 \cdot 3,29 = 6,58 \text{ А}$ .*

*Следует избегать продолжительной работы при токах якоря, превышающих  $I_f = 3,29 \text{ А}$ , чтобы избежать перегрева двигателя.*

1. Для получения статических характеристик одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости при использовании ПИ-регулятора собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 5.1. В соответствии с технической документацией стенда настроить контур скорости при помощи регуляторов R104, R105 и R106.

2. Перед включением стенда необходимо 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 переключатели. Тумблер SA3 перевести в положение «M1-M2».

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

4. Тумблером SA13 включить ШИП ОБ.

5. Плавно увеличивая регулятором *R13* задание *ШИП ОВ*, установить номинальное значение тока возбуждения исследуемого двигателя *0,18 А* (контролировать по амперметру *РА5*).
6. Тумблер *SA1* перевести в положение «*ШИП*».
7. Регулятор *R11* установить в центральное положение.
8. Тумблером *SA11* включить *ШИП ОЯ*.

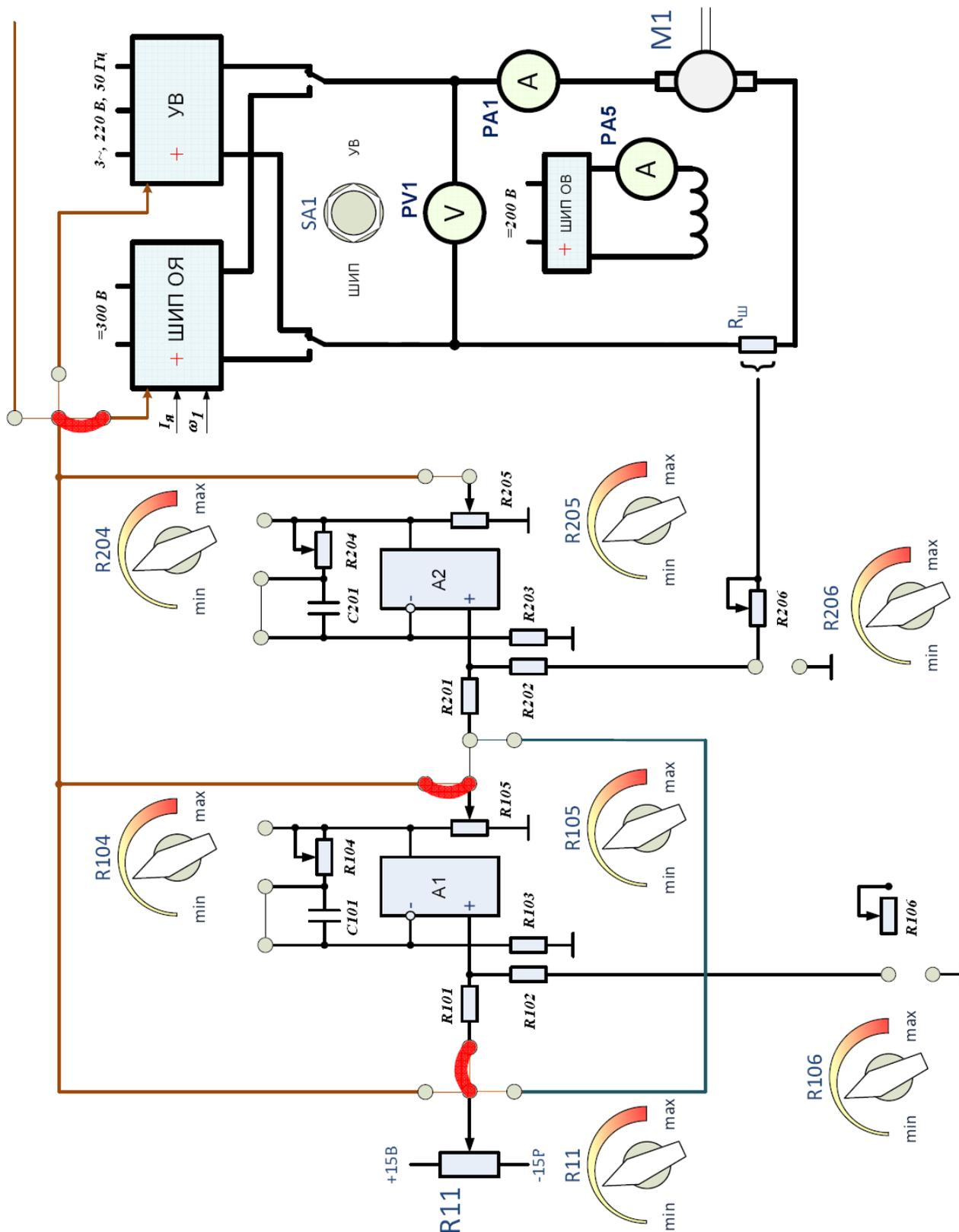


Рисунок 5.1 – Схема для исследования одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости

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

10. Тумблером  $SA17$  включить  $ШИПП1$ .

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

12. Повторить п. 11, устанавливая регулятором  $R17$  момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору  $M_{YB1}$ ) согласно значениям  $M$  таблицы 5.1.

Таблица 5.1 – Экспериментальные данные

Тип регулятора	№ п/п	Экспериментальные данные			
		$\omega_{\text{зад}}, \text{ рад/с}$	$M, \text{ Нм}$ ( $M_{YB1}$ )	$I_{\text{я}}, \text{ А}$ ( $PA1$ )	$\omega, \text{ рад/с}$ ( $EP1$ )
ПИ - регулятор	1		0		
	2		0,5		
	3		1,0		
	4		1,5		
	5		2,0		
П - регулятор	1		0		
	2		0,5		
	3		1,0		
	4		1,5		
	5		2,0		

13. Плавно уменьшая регулятором  $R17$  задание  $ШИПП1$ , уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до  $0$ .

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

15. Для получения статических характеристик одноконтурной системы  $ШИПП - ДПТ$  с обратной связью по скорости при использовании П-регулятора скорости в схеме рисунка 5.1 замкнуть накоротко переключкой конденсатор  $C101$  и установить с помощью регулятора  $R11$  значение  $\omega_{\text{зад}}$ , например,  $150 \text{ рад/с}$ . Занести данное значение в таблицу 5.1.

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

17. Повторить п. 16, устанавливая регулятором  $R17$  момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору  $M_{YB1}$ ) согласно значениям  $M$  таблицы 5.1.

18. Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно уменьшая регулятором  $R17$  задание  $ШИПП1$ , 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».

19. По экспериментальным данным (таблица 5.1) построить механические  $\omega(M)$  и электромеханические  $\omega(I_{я})$  характеристики двигателя одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости для разных типов регуляторов.

### Контрольные вопросы

1. Пояснить особенности разомкнутых и замкнутых систем регулирования электропривода.
2. Пояснить необходимость использования замкнутой системы регулирования с обратной связью по скорости.
3. Объяснить принцип работы одноконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости.
4. Описать типы регуляторов, использованных в схеме лабораторной установки.
5. Указать параметры каждого из использованных регуляторов, вид преобразования сигнала, осуществляемого регулятором; изобразить график переходной функции.

## Лабораторная работа № 6

### ***Исследование характеристик двухконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости и по току***

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

#### Теоретические сведения

Значительно лучшие свойства электропривода в статике и динамике можно обеспечить, если использовать в приводе 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. Однократноинтегрирующая система, когда в качестве регулятора тока используется ПИ-регулятор, а в качестве регулятора скорости – П-регулятор.

2. Двукратноинтегрирующая система, когда в качестве регулятора тока используется ПИ-регулятор и в качестве регулятора скорости – также 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 привода  $T_{я}$ .

Коэффициент передачи регулятора находится по выражению

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

где  $R$  – сопротивление якорной цепи привода,  
 $K_n$  – коэффициент передачи преобразователя,  
 $T_n$  – постоянная времени преобразователя,  
 $K_m$  – коэффициент обратной связи по току.

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

где  $U_{zm\ max}$  – максимальное значение задающего сигнала на входе регулятора тока,

$I_{я\ доп}$  – максимально допустимое значение тока якоря двигателя.

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

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

где  $T_m$  – электромеханическая постоянная привода.

$$T_m = J R K_\delta^2,$$

где  $J$  – момент инерции привода,

$T_\mu$  – малая некомпенсируемая постоянная контура скорости,

$$T_\mu = 2T_n,$$

$K_c$  – коэффициент обратной связи по скорости.

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:

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

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

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, при которой постоянная времени регулятора скорости  $T_{pc} = 4T_\mu$ , а коэффициент передачи регулятора определяется выражением (6.1).

В этом случае электромеханическая и механическая характеристики будут определяться выражением:

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

То есть механическая характеристика будет абсолютно жесткой и статическая ошибка равна нулю. Стабильность скорости в этом случае зависит только от постоянства сигнала задания скорости и коэффициента обратной связи по скорости.

### Порядок выполнения работы

В данной работе исследуемым двигателем постоянного тока независимого возбуждения является машина  $M1$ , в качестве нагрузочного устройства используется электромагнитная муфта  $YB1$ .

При проведении эксперимента ток якоря исследуемого двигателя не должен превышать  $2I_f = 2 \cdot 3,29 = 6,58 \text{ A}$ .

Следует избегать продолжительной работы при токах якоря, превышающих  $I_f = 3,29 \text{ A}$ , чтобы избежать перегрева двигателя.

1. Для получения статических характеристик двухконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости и по току при использовании ПИ-регуляторов собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 6.1. В соответствии с технической документацией стенда настроить контур скорости при помощи регуляторов  $R104$ ,  $R105$  и  $R106$  и контур тока при помощи регуляторов  $R204$ ,  $R205$  и  $R206$ .

2. Перед включением стенда необходимо 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 переключатели. Тумблер  $SA3$  перевести в положение « $M1-M2$ ».

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

4. Тумблером  $SA13$  включить ШИП  $OB$ .

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

6. Тумблер  $SA1$  перевести в положение «ШИП».

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

8. Тумблером  $SA11$  включить ШИП  $OЯ$ .

9. Плавно увеличивая регулятором  $R11$  задание для системы регулирования, установить требуемую скорость вращения двигателя (контролировать по датчику скорости  $EP1$ ), например,  $150 \text{ рад/с}$ . Занести данное значение  $\omega_{зад}$  в таблицу 6.1.

10. Тумблером  $SA17$  включить ШИП  $I$ .

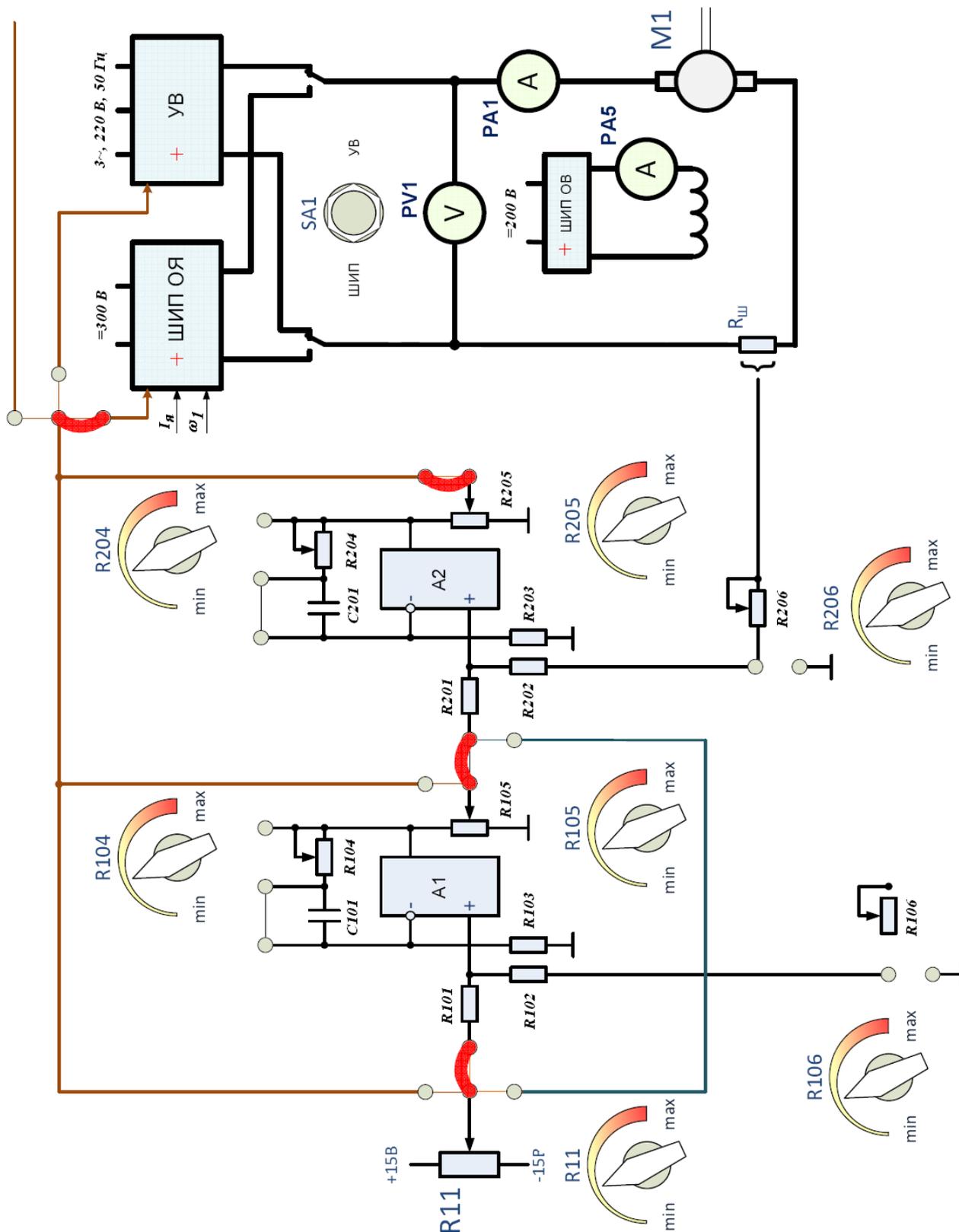


Рисунок 6.1 – Схема для исследования характеристики двухконтурной системы ШИП – ДПТ с обратной связью по скорости и по току

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

12. Повторить п. 11, устанавливая регулятором  $R17$  момент нагрузки на валу двигателя (контролировать по прибору  $M_{YB1}$ ) согласно значениям  $M$  таблицы 6.1.

Таблица 6.1 – Экспериментальные данные

Тип регулятора	№ п/п	Экспериментальные данные			
		$\omega_{ЗД}, \text{ рад/с}$	$M, \text{ Нм}$ ( $M_{YB1}$ )	$I_{Я}, \text{ А}$ ( $PA1$ )	$\omega, \text{ рад/с}$ ( $EPI$ )
ПИ - регулятор	1		0		
	2		0,5		
	3		1,0		
	4		1,5		
	5		2,0		
П - регулятор	1		0		
	2		0,5		
	3		1,0		
	4		1,5		
	5		2,0		

13. Плавно уменьшая регулятором  $R17$  задание  $ШИПП$ , уменьшить момент нагрузки на валу исследуемого двигателя до 0.

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

15. Для получения статических характеристик двухконтурной системы  $ШИП - ДПТ$  с обратной связью по скорости и по току при использовании П-регулятора скорости в схеме рисунке 6.1 замкнуть накоротко переключками конденсатор  $C101$  и установить с помощью регулятора  $R11$  значение  $\omega_{ЗД}$ , например,  $150 \text{ рад/с}$ . Занести данное значение в таблицу 6.1.

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

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

18. 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 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*».

18. По экспериментальным данным (таблица 6.1) построить механическую  $\omega(M)$  и электромеханическую  $\omega(I_A)$  характеристики двигателя двухконтурной системы *ШИП-ДПТ* с обратной связью по скорости и по току для разных типов регуляторов.

### **Контрольные вопросы**

1. Пояснить необходимость использования двухконтурных систем регулирования координат электропривода.

2. Объяснить, используя графики механических характеристик, принцип работы двухконтурной системы *ШИП – ДПТ* с обратной связью по скорости и по току.

3. Пояснить принцип подчиненного регулирования координат в двухконтурной системе *ШИП – ДПТ*.

4. Описать типы регуляторов, использованных в схеме лабораторной установки.

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

6. Объяснить особенности выбора параметров настройки регуляторов схем электропривода.

7. Что такое технический и симметричный оптимум?

## Литература

1. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – Москва : Высшая школа, 1991. – 430 с.
2. Чиликин, М. Г. Теория автоматизированного электропривода / М. Г. Чиликин [и др.]. – Москва : Энергия, 1979. – 616 с.
3. Ильинский, Н. Ф. Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 544 с.
4. Гульков, Г. И. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г. И. Гульков. – Минск : Новое знание, 2007. – 394 с.
5. Москаленко, В. В. Электрический привод / В. В. Москаленко. – Москва : Академия, 2007. – 368 с.
6. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. Н. Осипов. – Москва : Академия, 2006. – 304 с.
7. Попов, Ю. В. Автоматизированный электропривод : методические указания к лабораторным работам по электротехнике для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / Ю. В. Попов, В. Ф. Куксевич, К. Н. Ринейский. – Витебск : УО «ВГТУ», 2012. – 42 с.
8. Попов, Ю. В. Автоматизированный электропривод : методические указания к лабораторным работам по курсу «Автоматизированный электропривод отрасли» для студентов специальности 1-53 01 01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)». Ч. 1 / Ю. В. Попов, В. Ф. Куксевич, М. Ф. Шаркова. – Витебск : УО «ВГТУ», 2009. – 38 с.
9. Руководство по выполнению работ на лабораторном стенде НТЦ-07.24.1 «Электропривод – МПСУ (М1)» / Могилев : НТП «Центр», 2012. – 48 с.