

Министерство сельского хозяйства РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт Электроэнергетики и природопользования

Безик В.А., Кубаткина О.В., Ковалев В.В.

Основы автоматизированного электропривода и преобразовательной техники

Методические указания по выполнению
лабораторных работ на стенде НТЦ 17
«Основы электропривода и преобразовательной техники»

Брянская область
2017

УДК62-83 (076)

ББК 31.291

Б 39

Безик, В. А. Основы автоматизированного электропривода и преобразовательной техники: методические указания по выполнению лабораторных работ на стенде НТЦ 17 «Основы электропривода и преобразовательной техники» / В. А. Безик, О. В. Кубаткина, В. В. Ковалев. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2017. – 80 с.

Методические указания содержат краткое описание характеристик, устройства и принципов работы стенда НТЦ 17 «Основы электропривода и преобразовательной техники», указания к лабораторным работам. Они позволяют студентам выполнять лабораторные работы на данном стенде при изучении разделов курсов связанных с электроприводом и преобразовательной технике в электроприводе. Методические указания предназначены для бакалавров и магистров направлений: 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника, 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств, 35.03.06 - Агроинженерия, 20.03.02 – Наземные транспортно-технологические комплексы.

Рецензент:

д.т.н., профессор кафедры Электроэнергетики и автоматики Кисель Ю.Е.
(ФГБОУ ВО Брянский ГАУ).

Рекомендовано к изданию решением методической комиссии института энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол № 2 от 24.10.2017 года.

© Брянский ГАУ, 2017

© Безик В.А., 2017

© Кубаткина О.В., 2017

© Ковалев В.В., 2017

1. Назначение, характеристики

Назначение стенда

Лабораторный стенд (далее изделие) предназначен для использования в качестве учебного оборудования в высших и средних специальных учебных заведениях при проведении лабораторно-практических занятий. Изделие предназначено для эксплуатации в закрытых отапливаемых помещениях при температуре окружающего воздуха от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+35^{\circ}\text{C}$, относительной влажности воздуха 80% при температуре 25°C .

Таблица 1.1

Список работ, выполняемых на стенде

№ работы	Наименование лабораторной работы
1.	Исследование трехфазного управляемого выпрямителя с микропроцессорной системой управления.
2.	Исследование однофазного управляемого выпрямителя с аналоговой системой управления.
3.	Исследование реверсивного широтно-импульсного преобразователя на IGBT-транзисторах.
4.	Исследование трехфазного инвертора на IGBT-транзисторах.
5.	Исследование релейных схем торможения асинхронного двигателя.
6.	Исследование способов пуска асинхронного двигателя.
7.	Исследование реостатного пуска двигателя постоянного тока.
8.	Исследование способов торможения двигателя постоянного тока.
9.	Исследование замкнутых систем управления.
10.	Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока.
11.	Исследование регулировочных характеристик двигателя постоянного тока.
12.	Исследование механических характеристик асинхронного двигателя.
13.	Исследование регулировочных характеристик асинхронного двигателя.

Технические характеристики

Электропитание изделия осуществляется от трехпроводной трехфазной сети переменного тока с фазным напряжением 127 В.

Мощность, потребляемая изделием от сети, не более 0,5 кВт. Габаритные размеры в миллиметрах (ширина- высота-глубина): 1310 - 1470 - 600. Масса изделия не более 85 кг. Изделие должно обеспечивать многократное проведение лабораторных работ, перечень которых приведен в таблице 1.1. Изделие допускает продолжительность непрерывной работы 8 часов.

Устройство и принцип работы

В состав изделия входят:

1. Двухдвигательный электромашинный агрегат, в который входят:

- Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 0,18 кВт, 2730 об/мин.
- Двигатель постоянного тока мощностью 0,12 кВт, 220 В, 3000 об/мин.
- Импульсный датчик положения, имеющий 90 отверстий.
- Маховик.

2. Стенд, в состоящий из следующих блоков:

- Трехфазный управляемый выпрямитель:
 - Силовая часть: трехфазная мостовая схема с возможностью переключения на однофазную мостовую схему (ток тиристоров 25 А, напряжение 800 В; микропроцессорное управление в трехфазном режиме);
 - аналоговая СИФУ для управления в однофазном режиме (возможность подключения активной, индуктивной или двигательной нагрузки).
- Инвертор:
 - Силовая часть: интеллектуальный силовой модуль (IPM) на IGBT-транзисторах -Mitsubishi Electric ASIPM PS 11033, для двигателей мощностью до 0,4 кВт, ток каждого транзистора – 30 А.. Имеет встроенные узлы:
 - драйверы управления каждым транзистором;
 - защиту от токов короткого замыкания;
 - защиту от токов перегрузки (150% в течение 1 минуты);
 - защиту от пониженного напряжения на схемах управления.
 - Микропроцессорное управление модулем (частота модуляции 8 кГц; раздельное управление частотой и напряжением; диапазон задания 0..255 единиц; шаг задания частоты 0,32 Гц).

В качестве нагрузки выступает асинхронный двигатель.

Широтно-импульсные преобразователи реализованы на элементной базе инвертора:

Два плеча инвертора используются для получения реверсивного ШИП для питания якоря ДПТ. Оставшееся плечо используется в качестве неререверсивного

ШИП для питания обмотки возбуждения ДПТ. Реверсивный ШИП может работать в симметричном (поочередное диагональное включение) режиме или несимметричном (диагональное включение одной пары транзисторов). Допускает возможность подключения активной, индуктивной или двигательной нагрузки для исследования силовой части.

- Релейно-контакторное управление (РКУ):

Осуществляет: реостатный пуск ДПТ в три ступени в функции: тока, ЭДС, скорости или времени; динамическое торможение ДПТ в три ступени в функции: тока, ЭДС, скорости или времени; торможение ДПТ противовключением; динамическое торможение АД и торможение противовключением.

Микропроцессорное управление блоком РКУ позволяет:

- Измерять ток, напряжение и скорость ДПТ и запоминать их с интервалом 0,1 секунды в течение 10 секунд (всего 100 значений) после начала пуска/торможения. Это позволяет строить графики пуска/торможения.

- Выдавать аналоговые сигналы пропорциональные току и скорости ДПТ.

- Измерение скорости происходит по сигналам импульсного датчика положения (360 импульсов на оборот)

- Аналоговые регуляторы:

Реализуется П/ПИ - регулятор тока и скорости с изменяемым коэффициентом передачи, регулируемым коэффициентом передачи обратной связи по току и скорости.

Возможные схемы замкнутых систем:

- Одноконтурная стабилизации тока ДПТ.
- Одноконтурная стабилизации скорости ДПТ с регулятором скорости.
- Двухконтурная стабилизации скорости ДПТ с регуляторами скорости и тока.

- Блок измерения (на базе цифровых измерительных приборов):

Осуществляет измерение постоянного (переменного) тока и напряжения (действующее или средне значение), индикацию измеренных величин и передачу на компьютер.

2. Особенности работы стенда

1. Гальваническая развязка на аналоговых входах преобразователей.

На аналоговых входах преобразователей стоит гальваническая развязка, которая также выполняет функции:

- Масштабирования входного сигнала (выход регулятора $\pm 15\text{В}$, вход микроконтроллера 0..5В).
- Инвертирования (для аналоговой СИФУ выпрямителя): сигнал 15В с регулятора соответствует максимальному напряжению выпрямителя, что в

свою очередь соответствует минимальному напряжению, сравниваемому с пилообразным опорным напряжением.

Поэтому сигнал с выхода регулятора не будет соответствовать по значению сигналу в системе управления преобразователем.

2. Индикация.

Отображение измеренных величин производится в цифровом виде. Это ведет за собой следующую особенность: при незначительном изменении измеренной величины происходит изменение цифры младшего разряда. Реальные величины имеют колебания, вызванные помехами, что приводит к постоянному изменению цифр младших разрядов и совершенной не читаемости индикатора. Для устранения этого недостатка, числа перед индикацией проходят через фильтр. Что в свою очередь замедляет реакцию индикации на быстрые изменения величин пусковые токи, разгон/торможение двигателя, колебания тока и т.д.

3. Включение стенда.

Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей, находятся в положении «*выключено*». Питание плат стенда осуществляется от трансформатора. Поэтому при включении уже двух (из трех) автоматических выключателей стенд может включиться.

4. Срабатывание защиты преобразователей.

В процессе работы управляемого выпрямителя микроконтроллер определяет длительность периода питающего напряжения. Если длительность периода более 15 мс. (или их нет вообще, если не включен третий автомат), то на индикаторы выдается надпись "**SynC**" (ошибка синхронизации).

В инверторе и ШИП реализованы защиты:

- От перенапряжения в звене постоянного тока. При переходе двигателя в генераторный режим, поступаемая энергия накапливается на сглаживающем конденсаторе СП. При превышении напряжением уровня 360 В, включается сбросовая цепь R19-VT11. При превышении напряжением уровня 380 В, преобразователь выключается. На индикаторе появляется надпись "**VOLt**" (перенапряжение).
- При срабатывании защиты модуля: ток короткого замыкания (30А) или недостаточное напряжение (меньше 13В) на цепях управления транзисторами. При этом на индикаторе появляется надпись "**OOPS**".

При срабатывании защиты необходимо выключить и включить преобразователь.

3. Выполнение лабораторных работ

3.1. Лабораторная работа №1. Исследование трехфазного управляемого выпрямителя с микропроцессорной системой управления.

3.1.1 Теоретические сведения

Регулирование выпрямленного напряжения путем изменения моментов отпирания тиристорov связано с искажением формы напряжения и тока вентилей, обмоток трансформатора и цепи нагрузки, а также со сдвигом фаз основных гармоник тока и напряжения по сравнению с неуправляемым режимом.

На рисунке 3.1.1 показаны временные диаграммы напряжений и токов идеальной ($r_a = 0$, $r_{np} = 0$, $L_a = 0$) однофазной схемы с нулевым выводом при активной нагрузке для произвольного значения угла регулирования α , определяемого положением отпирających импульсов тиристорov u_{y1} и u_{y2} по отношению к ЭДС полуобмоток трансформатора e_1 и e_2 . Среднее значение выпрямленного напряжения в этом случае

$$U_{ср\alpha} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} E_{2m} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{E_{2m}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Для нерегулируемого режима

$$\alpha = 0, U_{ср. х. х} = 2E_{2m}/\pi,$$

поэтому при $\alpha \neq 0$

$$U_{ср\alpha} = U_{ср. х. х} (1 + \cos \alpha)/2.$$

Полученное выражение представляет собой регулировочную характеристику выпрямителя $U_{ср} = f(\alpha)$. Для данного режима среднее значение выпрямленного напряжения будет равно нулю при $\alpha = \pi$.

Среднее значение выпрямленного тока

$$I_{ср\alpha} = U_{ср. х. х} (1 + \cos \alpha)/(2R_n).$$

Расчетные мощности обмоток и типовую мощность трансформатора определяют, исходя из неуправляемого режима.

В связи с тем, что при изменении угла регулирования α происходит сдвиг во времени первой гармоники потребляемого из сети тока (тока первичной обмотки трансформатора) $i_{(1)}$ относительно питающего напряжения (ЭДС), управляемый выпрямитель потребляет из сети реактивную мощность даже при чисто активной нагрузке.

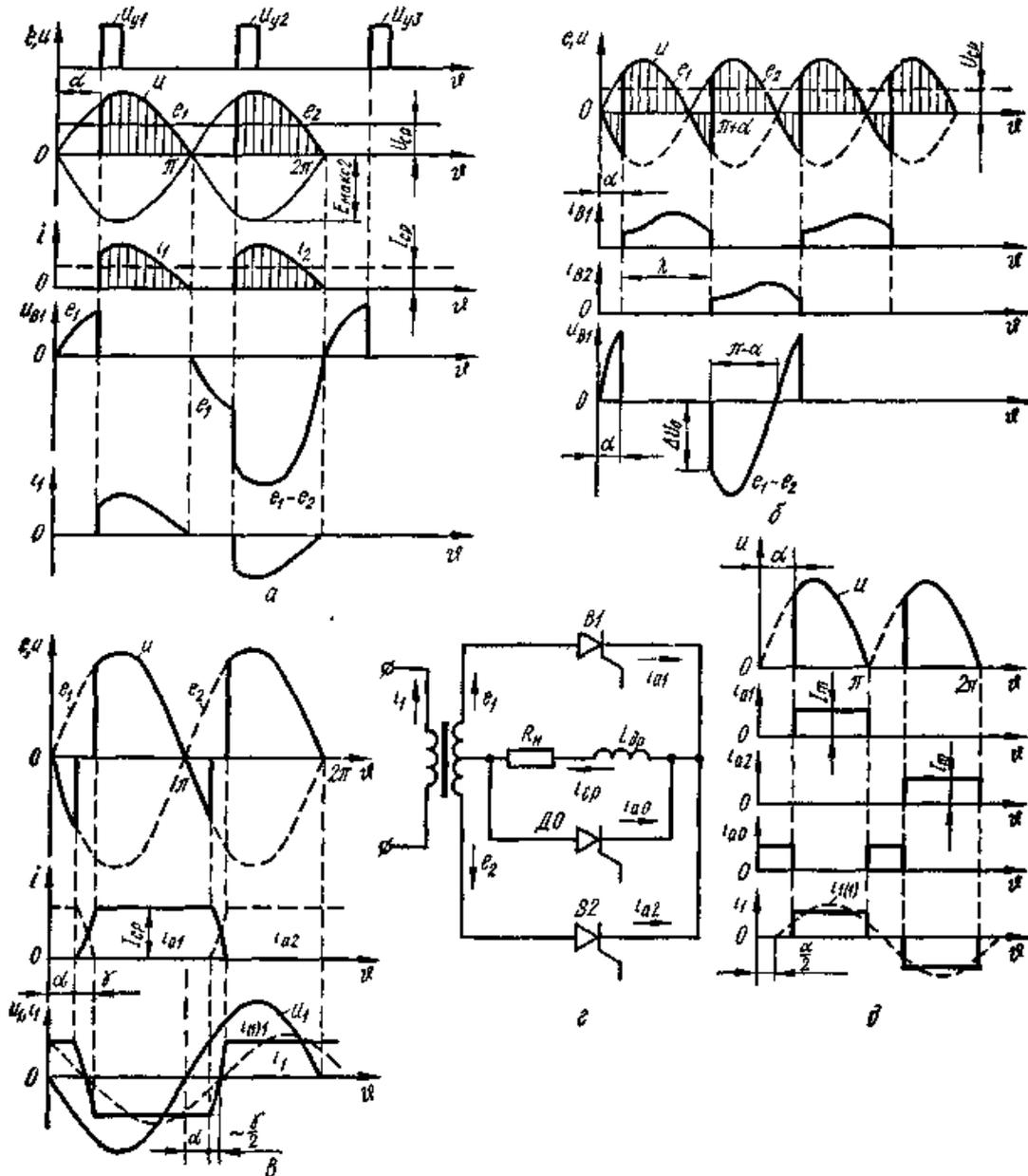


Рисунок 3.1.1 – Временные диаграммы токов и напряжений однофазного выпрямителя с нулевым выводом при:
 а — активной нагрузке; б — активно-индуктивной нагрузке; в — активно-индуктивной нагрузке и $L_a \neq 0$; г — схема выпрямителя с нулевым вентилем; д — временные диаграммы токов и напряжений схема рис. 20.1, г при активно-индуктивной нагрузке.

Коэффициент мощности выпрямителя

$$\lambda = \gamma \cos \varphi_{(i)} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

При активно-индуктивной нагрузке, когда $L_a = 0$, схема может работать в двух режимах: непрерывного ($\lambda = \pi$) и прерывистого ($\lambda < \pi$) тока нагрузки. На рис. 20.1, б показаны временные диаграммы токов и напряжений идеальной схемы для первого режима.

В отличие от режима при активной нагрузке здесь кривая выпрямленного напряжения на интервале α имеет отрицательные значения. Это объясняется тем, что энергия магнитного поля индуктивности нагрузки поддерживает ток в тиристоре и после перехода анодной ЭДС через нуль (на интервале α).

Обратное напряжение на тиристоре в отличие от режима при активной нагрузке определяется линейным значением ЭДС вторичной обмотки ($e_1 - e_2$) как на интервале α , так и на интервале $(\pi - \alpha)$.

Форма токов в элементах схемы зависит от величины x_{π}/R_{π} . При $x_{\pi} = \infty$ соотношения между токами определяются так же, как и в случае неуправляемого режима.

Коэффициент мощности выпрямителя в данном режиме тем ниже, чем больше угол регулирования α . Это объясняется тем, что сдвиг по фазе основной гармоники тока первичной обмотки трансформатора по отношению к напряжению сети с увеличением угла α также увеличивается.

Коэффициент мощности выпрямителя в этом случае

$$\chi \approx \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right).$$

Для уменьшения потребляемой из сети реактивной мощности, а следовательно, для улучшения коэффициента мощности выпрямителя, при работе выпрямителя с большой индуктивностью в схему добавляется нулевой вентиль ДО, шунтирующий нагрузку (рисунок 3.1.1 *з*). На рисунке 3.1.1 *д* показаны временные диаграммы, поясняющие принцип работы схемы без учета параметров r_a , $r_{\text{пр}}$, L_a . Нулевой вентиль ДО включается в те моменты, когда вторичные ЭДС меняют знак с положительного на отрицательный. На интервале α ток протекает через нагрузку и нулевой вентиль. Так как нулевой вентиль шунтирует нагрузку, то выпрямленное напряжение в эти отрезки времени равно нулю. В результате первая гармоника тока в первичной обмотке при $L_{\pi} = \infty$ оказывается сдвинутой по фазе относительно напряжения сети на угол $\alpha/2$ (без нулевого вентиля этот угол равен α).

Коэффициент мощности выпрямителя

$$\chi = \gamma \cos \varphi_{(1)} = (1 + \cos \alpha) \sqrt{2/[\pi(\pi - \alpha)]}.$$

Обратное напряжение на рабочих вентилях, как и в обычной схеме, определяется линейным напряжением вторичной обмотки. Обратное напряжение на нулевом вентиле определяется фазным напряжением.

Однофазные управляемые выпрямители можно выполнить и по мостовой схеме (рисунок 3.1.2).

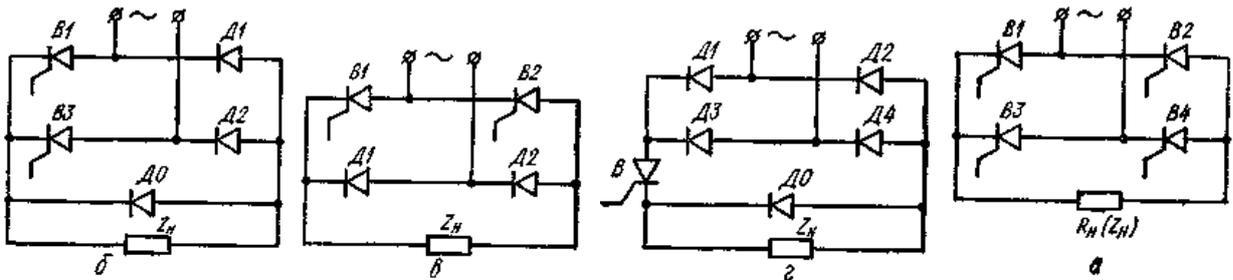


Рисунок 3.1.2 – Однофазные мостовые управляемые выпрямители.

Управляемые трехфазные выпрямители

На рисунке 3.1.3 показана схема и временные диаграммы токов и напряжений трехфазного выпрямителя с нулевым выводом.

При активной нагрузке с изменением угла регулирования α можно выделить два характерных режима работы выпрямителя: режим непрерывных токов (рисунок 3.1.3 б), когда $0 < \alpha < \pi/6$ (угол регулирования α в трехфазных выпрямителях принято отсчитывать от точки естественного отпирания вентилей); режим прерывистых токов $\pi/6 < \alpha < 5\pi/6$ (рисунок 3.1.3 в).

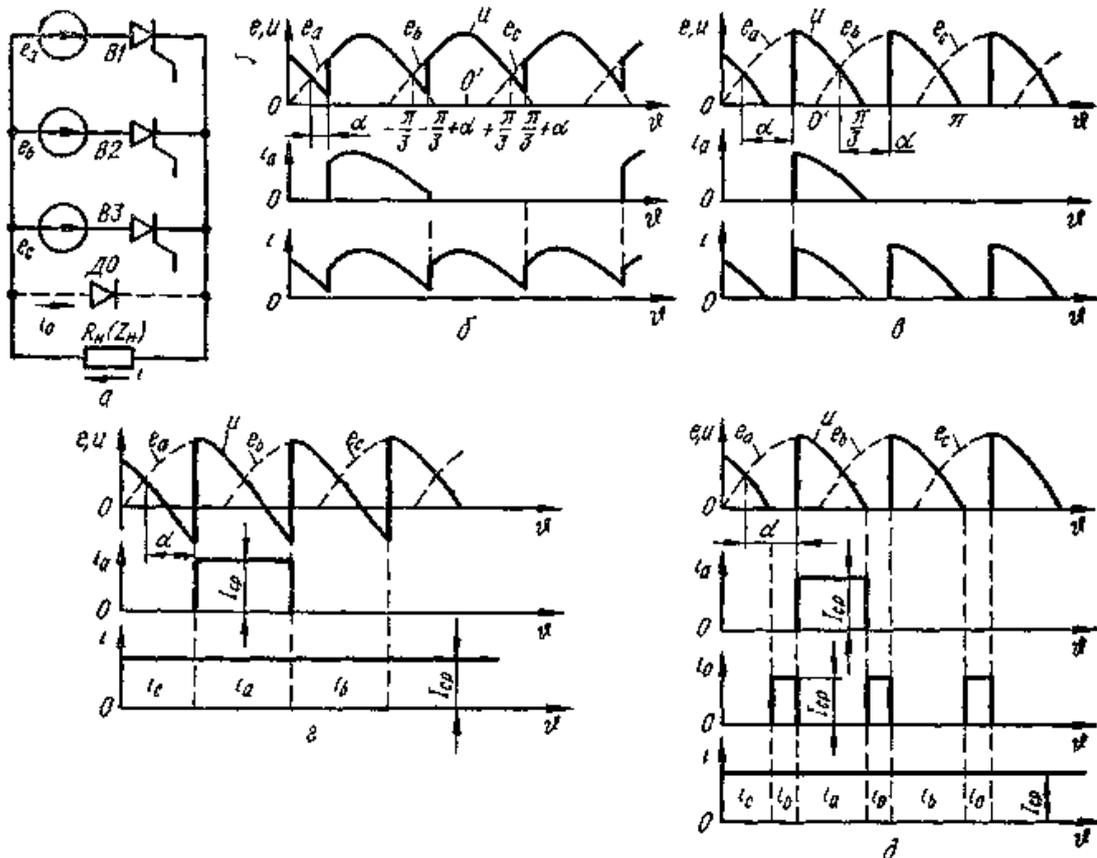


Рисунок 3.1.3 – Трехфазный управляемый выпрямитель с нулевым выводом: а — схема, б — временные диаграммы токов и напряжений при активной нагрузке и $0 \leq \alpha \leq \pi/6$; в — при активной нагрузке и $\pi/6 \leq \alpha \leq 5\pi/6$; г — при активно-индуктивной нагрузке ($L_H = \infty$); д — при активно-индуктивной нагрузке ($L_H = \infty$) с нулевым вентилем

Если $\alpha = 5\pi/6$, выпрямленное напряжение равно нулю.

При активно-индуктивной нагрузке схема также может работать в двух режимах. Прерывистость тока в цепи нагрузки зависит не только от диапазона изменения угла регулирования α , но и от соотношения параметров нагрузки R_H и L_H . Так же, как и в однофазных схемах, кривая выпрямленного напряжения на интервале α может иметь отрицательные значения, что объясняется возможностью вентилей пропускать ток при отрицательном напряжении на обмотке данной фазы за счет накопленной энергии в магнитном поле дросселя L_H . Если $\alpha \leq \pi/6$, непрерывный режим тока имеет место при любых соотношениях R_H и L_H и ничем не отличается от случая активной нагрузки для тех же $\alpha \leq \pi/6$. В случае дальнейшего увеличения угла регулирования непрерывный режим тока сохраняется только при значительном преобладании индуктивности. Без больших погрешностей можно считать ток нагрузки идеально сглаженным (рисунок 3.1.3 *г*).

Для исключения отрицательных участков в кривой выпрямленного напряжения и улучшения коэффициента мощности выпрямителя в схему вводится нулевой вентиль ДО, шунтирующий нагрузку. Ток через нулевой вентиль при активно-индуктивной нагрузке поддерживается за счет ЭДС самоиндукции нагрузки и протекает за интервал времени $\pi/6 - \alpha$ (рисунок 3.1.3 *д*). При этом напряжение на нагрузке в интервале времени $\pi/6 - \alpha$ равно нулю, а тиристоры $V1, V2, V3$ заперты.

Рассмотрим электромагнитные процессы в трехфазном мостовом управляемом выпрямителе (рисунок 3.1.4 *а*), широко применяющемся в преобразовательных установках.

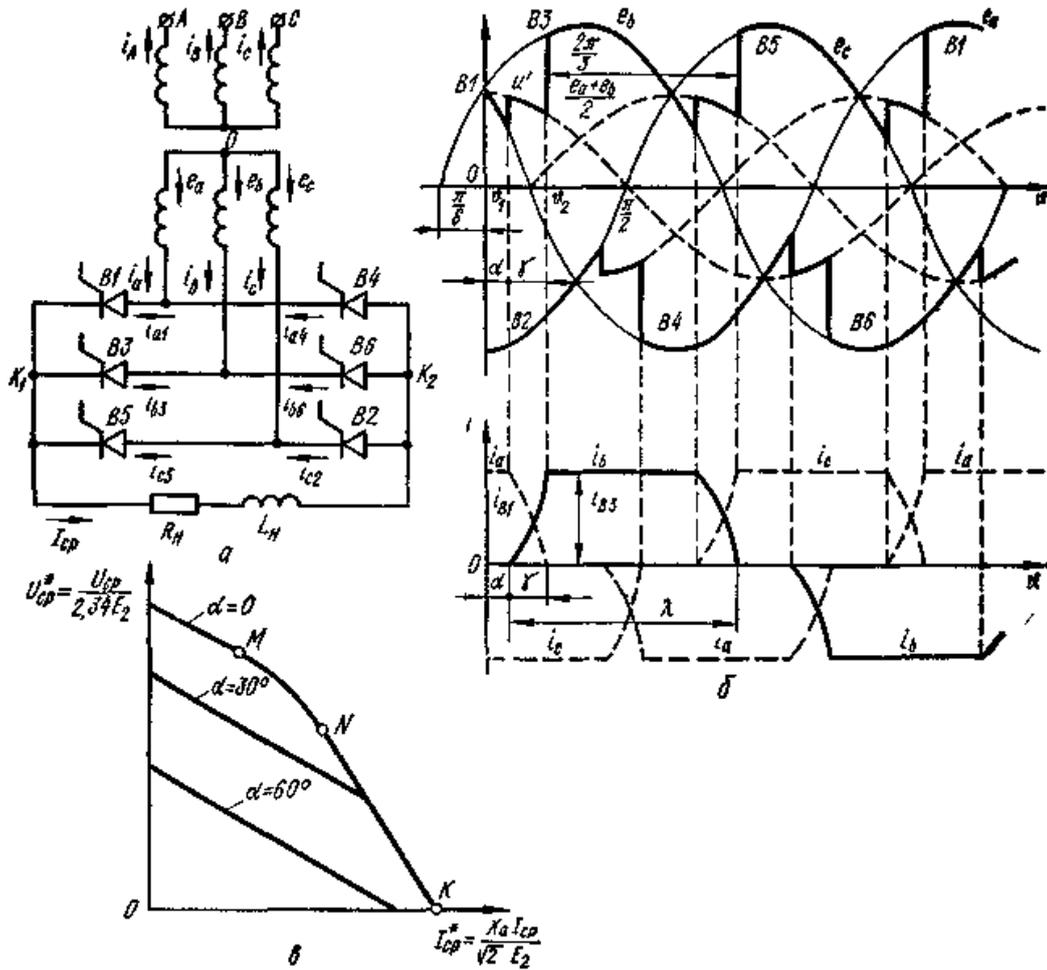


Рисунок 3.1.4 – Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель при активно-индуктивной нагрузке: а – схема; б – временные диаграммы токов и напряжений для режима $\gamma < \pi/3$; в - внешние характеристики выпрямителя

Для управляемых выпрямителей закономерность изменения внешней характеристики зависит от величины угла регулирования α . Поэтому для таких выпрямителей обычно строят семейство внешних характеристик $U_{cp} = f(I_{cp})_{\alpha=\text{const}}$ при различных значениях угла α .

Ток в цепи нагрузки получается идеально сглаженным и неизменным по величине, а ток коммутации зависит лишь от величины индуктивности L_a и закономерности изменения ЭДС обмоток трансформатора, находящихся в контурах коммутации. Закономерность изменения внешней характеристики выпрямителя зависит от длительности пропуска тока каждым вентилем $\lambda = 2\pi/3 + \gamma$ (рисунок 3.1.4 б), которая в свою очередь определяется числом вентиляей, одновременно пропускающих ток. Угол коммутации γ , а следовательно, и угол λ изменяются при изменении величины тока нагрузки. При токах нагрузки I_{cp} , близких к номинальному значению, $\gamma < \pi/3$ и $\lambda < \pi$. В этом режиме в схеме попеременно пропускают ток одновременно либо два, либо три вентиля.

С ростом тока нагрузки величина угла γ увеличивается, интервал одно-

временной работы трех вентилях расширяется, и затем наступает второй режим работы схемы, для которого угол коммутации $\gamma = \pi/3$. При этом $\lambda = \pi$ и в схеме всегда одновременно пропускают ток три вентиля. Дальнейшее увеличение тока нагрузки приводит к возникновению третьего режима, характеризующегося величинами $\gamma > \pi/3$ и $\lambda > \pi$. В этом режиме в схеме одновременно пропускают ток либо три, либо четыре вентиля. С возрастанием тока I_{cp} интервал одновременной работы четырех вентилях расширяется, и при коротком замыкании в схеме в любой момент одновременно пропускают ток четыре вентиля; при этом $\gamma = 2\pi/3$ и $\lambda = 4\pi/3$.

Каждый из трех режимов работы схемы характеризуется определенной закономерностью изменения внешней характеристики, поэтому следует рассмотреть эти режимы в отдельности, а затем произвести сопряжение полученных участков внешней характеристики.

На рис. 20.4, б показаны временные диаграммы токов и напряжений для первого режима ($\gamma < \pi/3$). В интервале одновременной работы двух вентилях (например, $B1, B2$) мгновенное значение выпрямленного напряжения определяется разностью $e_a - e_c$, а мгновенные значения токов в вентилях – постоянным значением выпрямленного тока I_{cp} .

Режим $\gamma = \pi/3$ наступает, как только интервал, в течение которого одновременно пропускают ток два вентиля, становится равным нулю и в схеме в любой момент времени пропускают одновременно ток три вентиля. При дальнейшем увеличении тока нагрузки в случае, если $\alpha < \pi/6$, угол коммутации продолжает оставаться неизменным, равным $\pi/3$. Это объясняется тем, что при увеличении тока нагрузки в схеме по-прежнему одновременно пропускают ток только три вентиля, так как для четвертого вентиля не будет условий, при которых он сможет начать пропускать ток. Например, если ток пропускают вентили $B1, B2, B3$, то очередной вентиль $B4$ не сможет вступить в работу, так как потенциал его анода, определяющийся отрицательным потенциалом нагрузки, равным потенциалу катода работающего вентиля $B2$ (или ЭДС e_c), будет ниже потенциала катода, определяющегося положительным потенциалом нагрузки, который равен полусумме ЭДС короткозамкнутого контура коммутации $(e_a + e_b)/2$. Такой режим будет длиться до тех пор, пока суммарный угол $\alpha + \gamma$ не станет равным $\pi/2$.

Во втором режиме угол α с ростом тока нагрузки автоматически увеличивается, а угол γ остается неизменным, равным $\pi/3$. В результате среднее значение выпрямленного напряжения с увеличением тока нагрузки уменьшается.

Третий режим ($\gamma > \pi/3$) может начаться с момента, когда $\alpha + \gamma = \pi/2$. Для третьего режима характерны два интервала: одновременной работы четырех вентилях и одновременной работы трех вентилях.

На рис. 20.4, в показано семейство внешних характеристик выпрямителя, работающего в выпрямительном режиме, для различных значений угла α в относительных единицах. При $\alpha < \pi/6$ внешние характеристики состоят из трех соприкасающихся участков LM, MN и NK ., для режимов $\gamma < \pi/3, \gamma = \pi/3, \gamma > \pi/3$.

Коэффициент мощности выпрямителя без учета угла перекрытия γ и с учетом угла перекрытия соответственно

$$\chi = (3/\pi) \cos \alpha;$$

$$\chi = (3/\pi) [1 + \gamma/4\pi - \gamma^2/24] [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)]/2.$$

Трехфазный мостовой управляемый выпрямитель может быть выполнен и по несимметричной схеме (три тиристора $B1, B3, B5$ и три диода $D4, D6, D2$, рисунок 3.1.5 *а*). Несимметричная схема широко применяется в выпрямителях небольшой мощности.

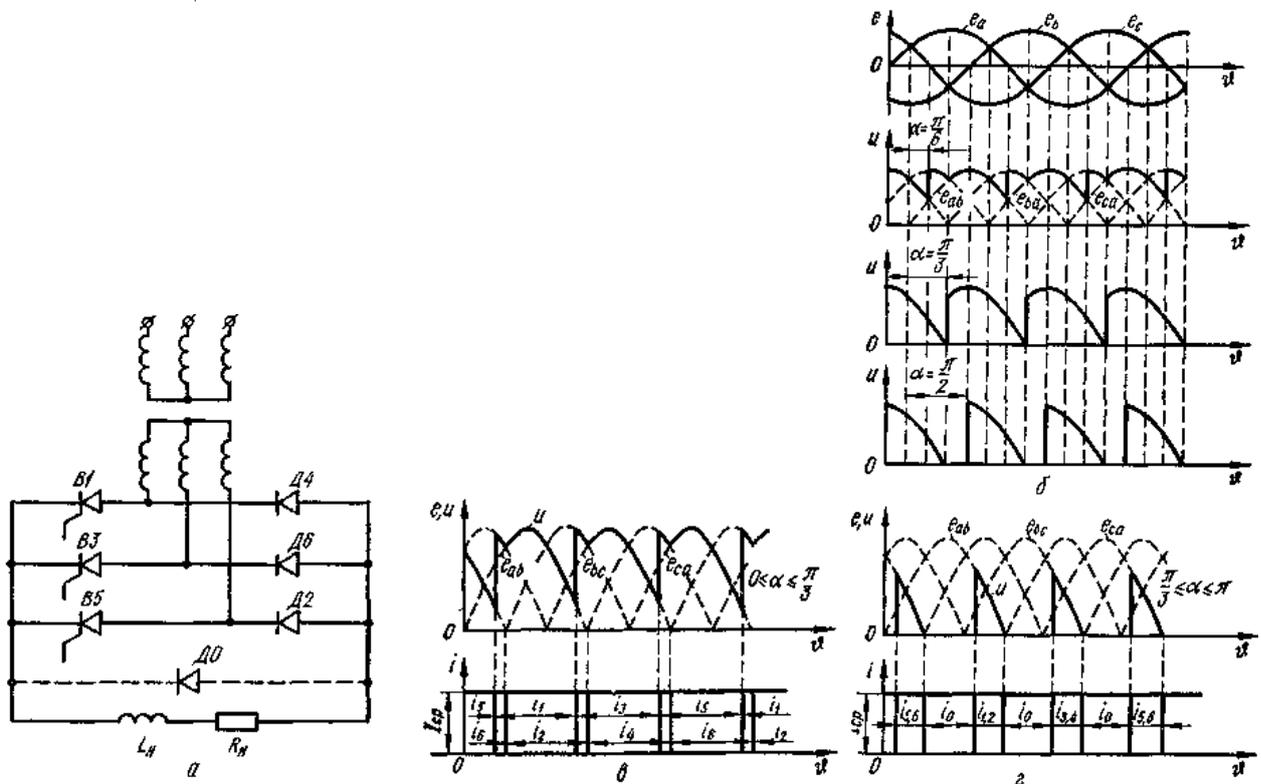


Рисунок 3.1.5 – Трехфазный мостовой несимметричный управляемый выпрямитель: *а* – схема; *б* – временные диаграммы токов и напряжений при активной нагрузке; *в* – при активно-индуктивной нагрузке ($L_H = \infty$); *г* – при активно-индуктивной нагрузке ($L_H = \infty$) с нулевым вентилем.

При работе на активно-индуктивную нагрузку и изменении угла регулирования $0 \leq \alpha \leq \pi/3$ кривая выпрямленного напряжения будет иметь вид, показанный на рис. 20.5, *б*. При увеличении угла α в кривой выпрямленного напряжения в отличие от симметричной мостовой схемы отрицательные участки не появляются. При переходе положительной полуволны напряжения работающего тиристора через нуль, например $B1$, он продолжает проводить ток с вступающим в работу диодом $D4$ той же фазы. Цепь нагрузки оказывается зашунтированной одновременно проводящими ток вентилями $B1$ и $D4$ и напряжение на нагрузке равно нулю. Этот интервал длится до вступления в работу очередного тиристора $B3$ (рис. 20.5, *в*). В кривой выпрямленного напряжения появляются паузы от момента перехода положительной полуволны питающего напряжения через нуль до вступления в работу очередного тиристора. При $\alpha = \pi$ тиристоры оказываются полностью запертыми, и напряжение на нагрузке равно нулю.

Особенностью работы схемы при активно-индуктивной нагрузке в диапазоне регулирования ($\pi/3 \leq \alpha \leq \pi$) является то, что при снятии сигнала управления не удастся обеспечить запираение всех тиристоров. При снятии сигнала управления происходит запираение двух тиристоров, а третий остается открытым за счет ЭДС самоиндукции нагрузки и через него протекает ток нагрузки. Это приводит к снижению диапазона регулирования напряжения и ухудшению использования вентилей по току.

3.1.2 Программа работы:

1. Исследуйте работу выпрямителя на различную нагрузку.

Соберите схему в соответствии с рисунком 3.1.6.

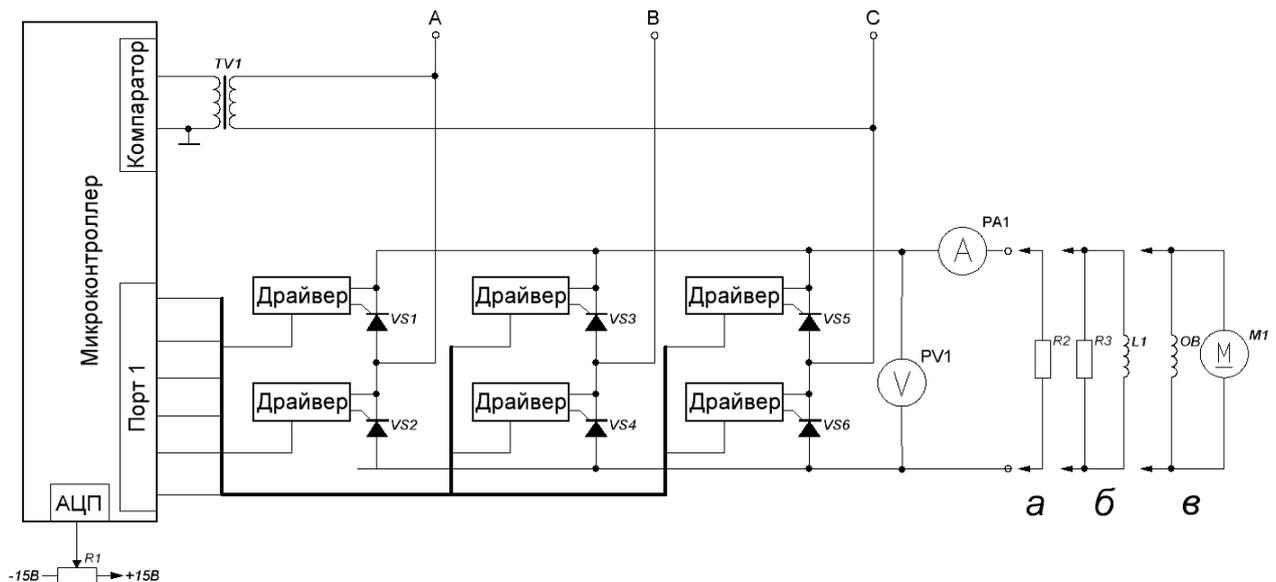


Рисунок 3.1.6 – Схема управляемого выпрямителя с микропроцессорной системой управления

2. Активная нагрузка.

Подключите активную нагрузку к выпрямителю.

Установите режимы работы управляемого выпрямителя: - трехфазный.

Резистором R1 задать максимальный угол управления. Включить управляемый выпрямитель.

Изменяя резистором R1 угол управления, снять регулировочную характеристику трехфазного управляемого выпрямителя, для чего изменяя угол управления от 0 до максимально возможного, измеряйте напряжение и ток в нагрузке при помощи приборов PA1, PV1.

Выключить управляемый выпрямитель.

Результаты измерений занесите в таблицу 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Результаты измерений при активной нагрузке

α					
$U_1, В$					
$I_1, А$					

По результатам измерений постройте графики $U_1=f(\alpha), I_1=f(\alpha)$.

3. Индуктивно-активная нагрузка.

Подключите к выпрямителю индуктивно-активную нагрузку.

В качестве индуктивной нагрузки используется обмотка возбуждения ДПТ. Ток, проходящий через обмотку возбуждения недостаточен для открытия тиристорov, поэтому параллельно с ним включается резистор. Повторить порядок выполнения работы согласно пункту 2.

Результаты измерений занесите в таблицу 3, постройте графики $U_1=f(\alpha), I_1=f(\alpha)$.

Таблица 3.1.2 – Результаты измерений при индуктивно-активной нагрузке

α					
$U_1, В$					
$I_1, А$					

4. Двигательная нагрузка

Подключите двигательную нагрузку к управляемому выпрямителю

Изменяя резистором R1 угол управления, снять регулировочную характеристику трехфазного управляемого выпрямителя, для чего изменяя угол управления от 0 до максимально возможного, измеряйте напряжение, ток в нагрузке, скорость вращения.

Результаты измерений занесите в таблицу 4, постройте графики $U_1 = f(\alpha), I_1 = f(\alpha), \omega = f(\alpha)$.

Таблица 3.1.3 – Результаты измерений при двигательной нагрузке

α					
$U_1, В$					
$I_1, А$					
$\omega, с^{-1}$					

Сравнить регулировочные характеристики трехфазного управляемого выпрямителя для различных видов нагрузки.

3.1.3 Контрольные вопросы:

1. Объясните принцип работы управляемого выпрямителя.
2. Как влияет величина угла управления на значение выходного тока выпрямителя?
3. Как изменятся характеристики двигателя при питании его от управляемого выпрямителя?
4. Объясните отличия регулировочных характеристик для различных видов нагрузки.
5. Когда могут возникнуть прерывистые токи в нагрузке?

3.2. Лабораторная работа №2. Исследование силовой части однофазного управляемого выпрямителя с аналоговой системой управления

3.2.1 Теоретические сведения

3.2.2 Программа работы

1. Собрать схему в соответствии с рисунком 3.2.1.

Установить режимы работы управляемого выпрямителя «однофазный» (на индикаторе отображается текущий угол управления);

Резистором R1 задать максимальный угол управления.

Включить управляемый выпрямитель.

2. Активная нагрузка

Подключите активную нагрузку к выпрямителю.

Изменяя резистором R1 угол управления, снимите регулировочную характеристику трехфазного управляемого выпрямителя, для чего изменяя угол управления от 0 до максимально возможного, измеряйте напряжение и ток в нагрузке при помощи приборов PA1, PV1.

Выключите управляемый выпрямитель.

Результаты измерений занесите в таблицу 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – Результаты измерений при активной нагрузке

α					
$U_1, В$					
$I_1, А$					

По результатам измерений постройте графики $U_1=f(\alpha), I_1=f(\alpha)$.

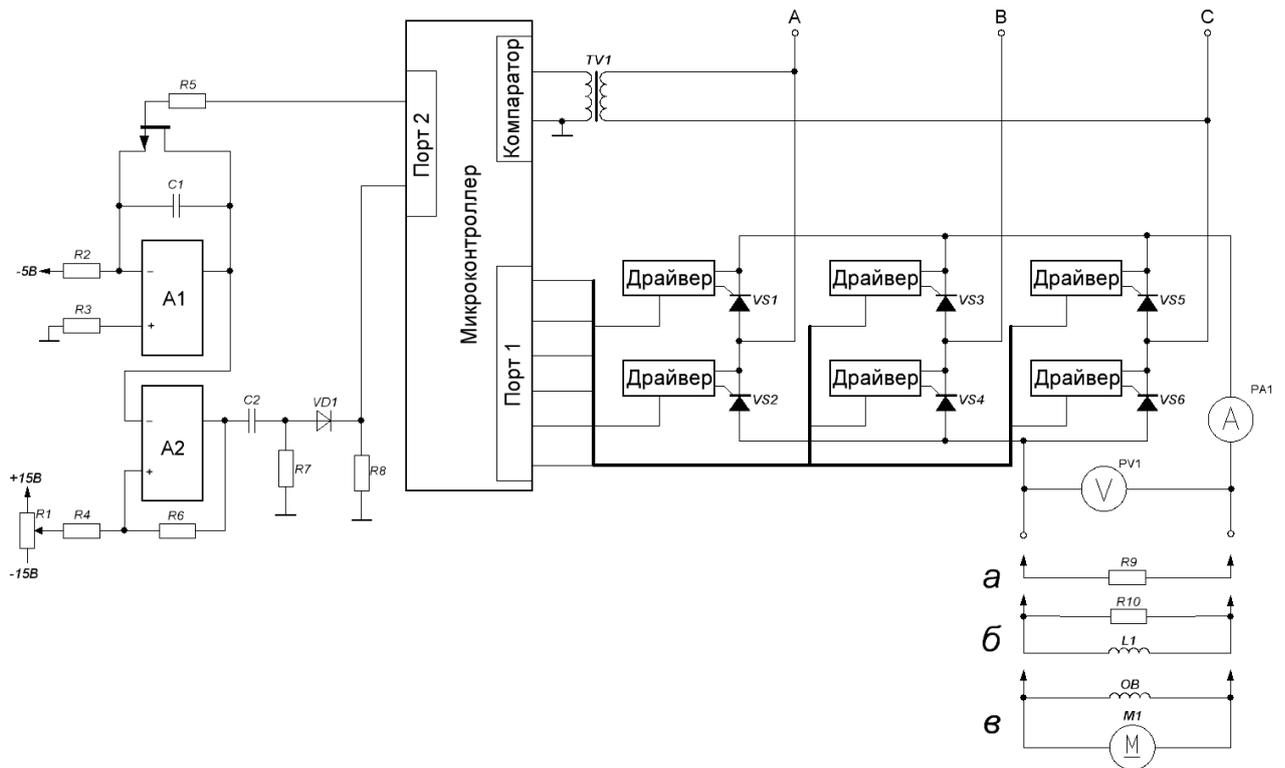


Рисунок 3.2.1 – Схема управляемого выпрямителя с аналоговой системой управления

3 Индуктивно-активная нагрузка.

Подключите индуктивно-активную нагрузку к управляемому выпрямителю.

В качестве индуктивной нагрузки используется обмотка возбуждения ДПТ. Ток, проходящий через обмотку возбуждения недостаточен для открытия тиристорov, поэтому параллельно с ним включается резистор. Повторите порядок выполнения работы согласно пункту 2.

Результаты измерений занесите в таблицу 3.2.2, постройте графики $U_1=f(\alpha)$, $I_1=f(\alpha)$.

Таблица 3.2.2 – Результаты измерений при индуктивно-активной нагрузке

α					
$U_1, \text{В}$					
$I_1, \text{А}$					

4 Двигательная нагрузка

Подключите двигательную нагрузку к управляемому выпрямителю.

Изменяя резистором R1 угол управления, снять регулировочную характеристику трехфазного управляемого выпрямителя, для чего изменяя угол управления от 0 до максимально возможного, измеряйте напряжение, ток в нагрузке, скорость вращения.

Результаты измерений занесите в таблицу 3.2.3, постройте графики $U_1 = f(\alpha)$, $I_1 = f(\alpha)$, $\omega = f(\alpha)$.

Таблица 3.2.3 – Результаты измерений при индуктивно-активной нагрузке

α					
$U_1, \text{В}$					
$I_1, \text{А}$					
$\omega, \text{с}^{-1}$					

Сравнить регулировочные характеристики управляемого выпрямителя для различных видов нагрузки.

При исследовании УВ при работе на двигательную нагрузку можно наблюдать срыв коммутации тиристорov. Одним из условий открытия тиристора является наличие положительного напряжения между анодом и катодом тиристора. При малых углах управления на входе выпрямителя формируется большое действующее напряжение, которое заставляет двигатель вращаться с большой скоростью. При этом в двигателе возникает значительная противо-ЭДС. Когда противо-ЭДС двигателя становится больше мгновенного напряжения фазы, тиристор не может включиться, т.к. он управляется одиночными импульсами. Если тиристор не включается, то уменьшается действующее напряжение на выходе выпрямителя. Следовательно, уменьшается скорость двигателя и его противо-ЭДС. Когда скорость двигателя уменьшится настолько, что противо-ЭДС станет меньше мгновенного напряжения фазы, тиристор снова начнет включаться. При этом повышается выходное напряжение выпрямителя, а вместе с ним и противо-ЭДС двигателя, и процесс начинается заново. Поэтому при малых углах управления наблюдается колебания скорости двигателя.

Для наблюдения срыва коммутации необходимо:

- подключить осциллограф к выходу выпрямителя;
- плавно увеличивать выходное напряжение выпрямителя.
- Наблюдайте изменение скорости вращения двигателя и осциллограммы напряжений.

3.2.3 Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы управляемого выпрямителя.
2. Как влияет величина угла управления на значение выходного тока выпрямителя?
3. Как изменятся характеристики двигателя при питании его от управляемого выпрямителя?
4. Объясните отличия регулировочных характеристик для различных видов нагрузки.
5. Объясните явление срыва коммутации в управляемом выпрямителе.

3.3. Лабораторная работа №3. Исследование реверсивного широтно-импульсного преобразователя на IGBT-транзисторах.

Цель работы: Изучить принцип работы широтно-импульсного преобразователя, особенности работы электропривода от широтно-импульсного преобразователя (ШИП).

3.3.1 Теоретические сведения

Регулирование напряжения на якоре двигателя постоянного тока (ДПТ) можно осуществить импульсным методом, когда двигатель периодически подключается к источнику питания и отключается от него. При этом в тот период, когда двигатель подключён к источнику питания, происходит передача энергии от источника к электроприводу, которая главным образом передаётся через вал производственному механизму, а часть её запасается в виде кинетической и электромагнитной энергии; в период же отключения электропривод продолжает работать, используя запасённую энергию.

Упрощённая схема силовой части системы импульсного регулирования напряжения на якоре двигателя постоянного тока представлена на рисунке 3.3.1, на котором Вп – трёхфазный выпрямитель, K – управляемый ключ, VD – обратный диод, C_ϕ – конденсатор фильтра.

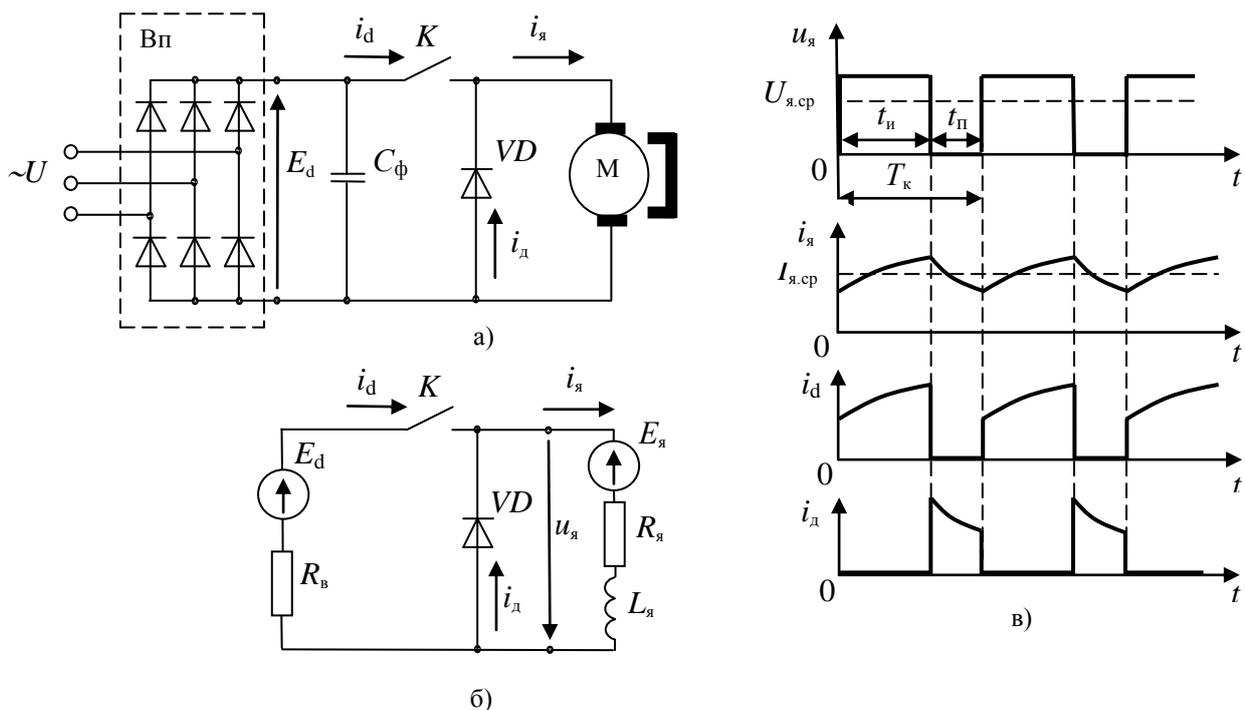


Рисунок 3.3.1 - Система импульсного регулирования напряжения на якоре ДПТ: а – упрощённая схема силовой части; б – её эквивалентная схема замещения; в – диаграммы изменения напряжения на якоре двигателя и токов: якоря, потребляемого от источника и в обратном диоде

В этой системе якорь двигателя с помощью коммутирующего ключа пери-

одически подключается к источнику постоянного тока, напряжение которого неизменно. На интервале замкнутого состояния ключа K $t_{и}$ к якорю двигателя прикладывается среднее значение ЭДС выпрямителя E_d (рисунок 3.3.1 б). Ток якоря $i_{я}$ при этом экспоненциально возрастает вследствие влияния индуктивности якорной цепи (рисунок 3.3.1 в). Диод VD в этом случае закрыт в результате подачи на его анод отрицательного напряжения источника питания. На интервале $t_{п}$ ключ K размыкается и ток якоря $i_{я}$ под действием ЭДС самоиндукции спадает через обратный диод VD . В этот период $i_{я}=i_{д}$. Благодаря диоду VD значительно уменьшаются пульсации тока якоря, а также исключаются коммутационные перенапряжения на ключе и обмотке якоря. Затем процесс повторяется через каждый период цикла коммутации T_k .

Временные диаграммы напряжения и токов в схеме построены на рисунке 3.3.1 в в предположении равенства нулю падений напряжений на открытых полупроводниковых приборах и равенства нулю внутреннего сопротивления источника питания R_b (рисунок 3.3.1 б) для постоянного и переменного тока.

Способы регулирования скважности

Как следует из рисунка 3.3.1 в, среднее значение напряжения на якоре двигателя $U_{я.ср}$, а следовательно, и его угловая скорость вращения, может регулироваться изменением скважности импульсов $\gamma = t_{и} / T_k$, где $t_{и}$ – длительность импульса, T_k – период коммутации.

Это изменение может быть получено одним из трех способов:

- регулированием $t_{и}$ – продолжительности включенного состояния K , при постоянной частоте импульсов $f = 1 / T_k$; т. е. при $T_k = \text{const}$, а $t_{и} = \text{var}$. Такой способ называется широтно-импульсным регулированием (ШИР);
- регулированием частоты импульсов, при постоянным времени включения K – $t_{и}$, т. е. при $t_{и} = \text{const}$ и $T_k = \text{var}$. Это частотно-импульсный способ регулирования (ЧИР).
- при изменении как частоты импульсов, так и продолжительности замкнутого состояния K , т. е. при $T_k = \text{var}$ и $t_{и} = \text{var}$ – широтно-частотный способ импульсного регулирования (ШЧИР).

Наибольшее распространение в технике электропривода получило широтно-импульсное регулирование.

Устройства, преобразующие напряжение сети в регулируемое напряжение питания двигателя постоянного тока с помощью широтно-импульсного регулирования, называются широтно-импульсными преобразователями (ШИП). Схема питания якорной цепи двигателя постоянного тока от ШИП (рисунок 3.3.1 а) получила название системы ШИП-Д.

Широтно-импульсный преобразователь

Функционально ШИП состоит из двух частей: блока широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и силового блока, который включает в себя выпрямитель (Вп) и силовой коммутатор (СК) (рисунок 3.3.2 а).

Широтно-импульсный модулятор преобразует входную координату – напряжение управления U_y во внутреннюю координату – скважность включения вентиля γ .

В состав ШИМ входят: генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН), схема сравнения (СС), распределитель импульсов (РИ) и усилители импульсов (У). ГЛИН вырабатывает с частотой $f = 1/T_k$ напряжение $U_{\text{глин}}$, которое может быть синусоидальной, треугольной, пилообразной и т.д. формы.

Схема сравнения анализирует на своем входе два сигнала $U_{\text{глин}}$ и U_y . При $U_{\text{глин}} - U_y \leq 0$ сигнал на выходе схемы сравнения $U_{\text{с.с}}$ (рис. 2, б) положительный максимального уровня, при $U_{\text{глин}} - U_y > 0$ сигнал $U_{\text{с.с}}$ отрицательный максимального уровня. РИ распределяет импульсы управления по силовым ключам коммутатора.

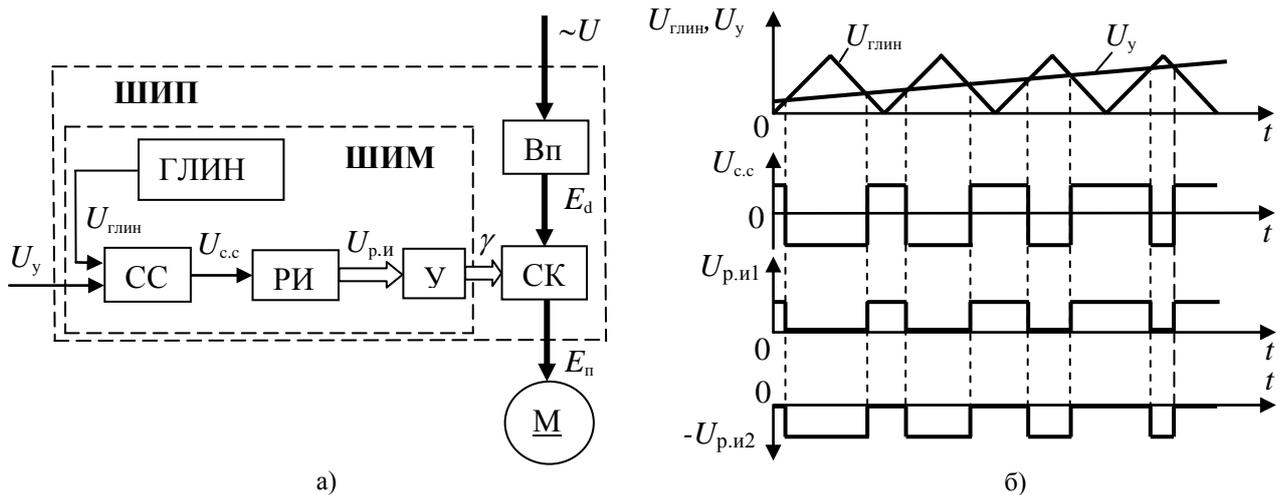


Рисунок 3.3.2. Система ШИП-Д: а – обобщённая функциональная схема; б – временные диаграммы напряжений в схеме для линейно нарастающего напряжения управления

Силовой коммутатор реализует посредством включения и отключения силовых ключей заданную с помощью ШИМ скважность в виде выходной ЭДС ШИП, среднее значение которой определяется интегралом

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{T_k} \int_0^{t_{\text{и}}} E_{\text{д}} dt.$$

Силовой коммутатор в схеме (рис. 1, а) не позволяет изменять полярность выходного напряжения, в связи с чем такую схему называют нереверсивной. Нереверсивная схема формирует однополярные импульсы выходной ЭДС со средним значением

$$E_{\text{п}} = \frac{t_{\text{и}}}{T_k} E_{\text{д}} = \gamma E_{\text{д}}.$$

К выходу коммутатора подключен двигатель М для которого $U_{\text{я.ср}} = E_{\text{п}}$.

Силовой коммутатор может быть реализован также и по реверсивной (мостовой) схеме (рис. 5, б). В этом случае выбор направления вращения осуществ-

ляется за счёт парного включения транзисторов VT1, VT4 или VT2, VT3 либо более сложной комбинацией переключения силовых ключей [1].

Динамические свойства ШИП моделируются передаточной функцией с учётом запаздывания в виде

$$W(p) = K_{\Pi} e^{-T_3 p},$$

где T_3 – постоянная времени чистого запаздывания, определяемая как $T_3 = 1/f_k$; f_k – частота коммутации; K_{Π} – коэффициент передачи ШИП.

$$K_{\Pi} = E_{\Pi}/U_y.$$

При высокой частоте f_k реально ШИП можно считать безынерционным звеном, для которого

$$W(p) = K_{\Pi}.$$

Регулирование скорости в разомкнутой системе ШИП-Д

Хотя напряжение $u_{я}$ изменяется между нулевым и номинальным значением (рисунок 3.3.1 в), ток двигателя $i_{я}$ из-за наличия индуктивности в якорной цепи совершает незначительные колебания относительно среднего значения. Момент двигателя при этом имеет также незначительную пульсацию. Благодаря этому и механической инерционности двигателя его частоту вращения можно принять постоянной. С учётом этого допущения уравнения электромеханической и механической характеристик при импульсном регулировании имеют вид

$$\omega = \frac{E_{\Pi}}{c} + \frac{I_{я.ср}(R_{я} + R_{\Pi})}{c} = \omega_0 + \Delta\omega ;$$

$$\omega = \frac{E_{\Pi}}{c} + \frac{M_{ср}(R_{я} + R_{\Pi})}{c^2} = \omega_0 + \Delta\omega ,$$

где ω – угловая скорость вращения, рад/с; ω_0 – угловая скорость идеального холостого хода, рад/с; $\Delta\omega$ – перепад скорости; c – коэффициент ЭДС двигателя; E_{Π} – ЭДС ШИП; $R_{я}$ – сопротивление обмоток двигателя; R_{Π} – внутреннее сопротивление ШИП включающее $R_{в}$ и сопротивление замкнутого ключа K .

Из этих уравнений следует, что угловую скорость можно регулировать в широких пределах, изменяя E_{Π} , а жёсткость механических характеристик при регулировании угловой скорости постоянна. В этом случае электромеханические и механические характеристики для различных значений скважности изображаются прямыми линиями (рисунок 3.3.3 а), параллельными друг другу.

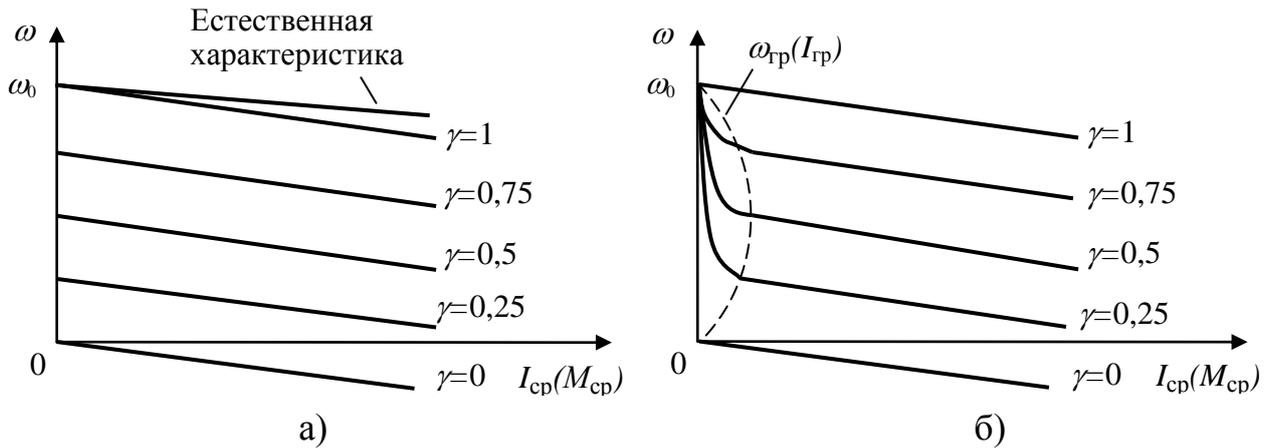


Рисунок 3.3.3 - Электромеханические (механические) характеристики системы ШИП-Д, выполненной по схеме рис.1, а: а – идеализированные; б – реальные

При этом характеристики системы ШИП-Д имеют по сравнению с естественной характеристикой ДПТ-НВ несколько больший наклон из-за наличия сопротивления $R_{\text{п}}$.

Режим прерывистых токов в системе ШИП- Д

При уменьшении момента сопротивления на валу двигателя и малых значениях индуктивности якорной цепи мгновенные значения тока якоря $i_{\text{я}}$ могут достигать нулевого значения, как показано на нижнем графике (рисунок 3.3.4).

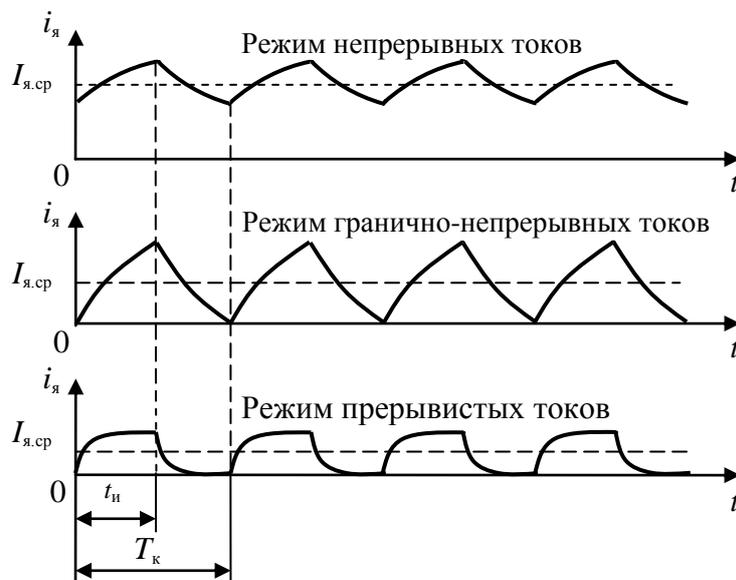


Рисунок 3.3.4 - Диаграммы токов при среднем значении индуктивности якорной цепи и различных моментах сопротивления на валу двигателя для $\gamma = 0,5$

В этом случае движение привода во время паузы тока связано с большим

расходом запаса кинетической энергии, чем в режиме непрерывного тока, и соотношение между $\omega_{\text{ср}}$ и $I_{\text{я.ср}}$ изменяется по сравнению с режимом непрерывного тока. Поэтому в случае прерывистых токов наблюдаются нелинейности электромеханических и механических характеристик, которые особенно проявляются при малых нагрузках и скважностях, как показано на рисунке 3.3.3 б. Здесь штриховой линией $\omega_{\text{гр}}(I_{\text{я.гр}})$ отделена зона прерывистых токов. Условия определения гранично-непрерывного (граничного) тока в соответствии с рисунком 3.3.4 могут быть сформулированы следующим образом:

$$I_{\text{гр}} \approx I_{\text{к.з}} \frac{\gamma(1-\gamma)}{2T_{\text{я}}f_{\text{к}}}$$

где $I_{\text{к.з}}=E_{\text{д}}/R_{\text{я}\Sigma}$, $T_{\text{я}}=L_{\text{я}\Sigma}/R_{\text{я}\Sigma}$, $R_{\text{я}\Sigma}=(R_{\text{п}}+R_{\text{я}})$ – суммарное сопротивление якорной цепи системы ШИП-Д.

Из последнего выражения видно, что граничный ток изменяется при регулировании скорости. Наибольшего значения гранично-непрерывный ток достигает при $\gamma=0,5$, а при $\gamma=1$ и $\gamma=0$ имеем $I_{\text{я.гр}}=0$, что естественно, так как в первом случае якорь двигателя всё время подключён к сети, а во втором имеет место режим динамического торможения при отсутствии дополнительного сопротивления в цепи якоря.

В режиме прерывистых токов скорость идеального холостого хода для всех значений скважности будет одинаковой и определяется как

$$\omega_0 = E_{\text{п}}/c.$$

Наличие зоны прерывистых токов ограничивает регулировочные возможности электропривода. Для сужения зоны прерывистых токов используют следующие средства:

- включение в цепь якоря дополнительной индуктивности;
- увеличение частоты коммутации;
- применение схем ШИП с возможностью реверса тока якоря.

При включении в цепь якоря дополнительной индуктивности одновременно возрастает суммарное, активное сопротивление якорной цепи. Это ведёт к снижению жёсткости статических характеристик, увеличению потерь и габаритов системы.

Увеличению частоты коммутации препятствует рост потерь в ключе (транзисторе, тиристоре) и его предельные динамические параметры, а уменьшение ведёт к увеличению зоны прерывистых токов. Обычно частота коммутации ($f_{\text{к}}$) составляет 800–1200 Гц.

Схема силовой части ШИП с возможностью реверса тока якоря двигателя приведена на рисунке 3.3.5 а. В этой схеме в отличие от схемы на рисунке 3.3.1 а используется дополнительный транзисторный ключ $VT2$, коммутируемый в противофазе с основным ключом $VT1$ (когда ключ $VT1$ замкнут, ключ $VT2$ разомкнут и наоборот). За счёт ключа $VT2$ ток якоря двигателя может менять направление (в

переходных режимах или при активном моменте нагрузки двигателя). При этом двигатель работает в режиме динамического торможения. Энергия, поступающая с вала двигателя, через транзистор $VT2$ частично гасится на активных сопротивлениях якоря, частично через диод $VD1$ запасается в конденсаторе фильтра C_ϕ выпрямителя (рисунок 3.3.1 а). Диоды $VD1$ и $VD2$ обеспечивают протекание токов самоиндукции и защиту ключей $VT1$ и $VT2$ от перенапряжений, возникающих при коммутации. Схема обеспечивает режим непрерывного тока при любой нагрузке и регулируемую скорость холостого хода двигателя.

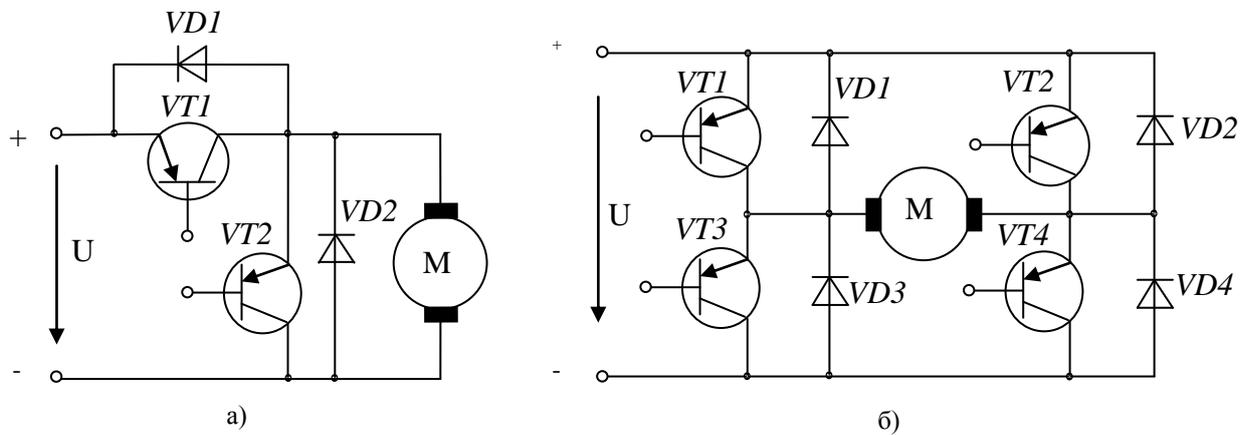


Рисунок 3.3.5. Схемы силовой части ШИП: а – с возможностью реверса тока якоря; б – мостовая

Широтно-импульсный преобразователь (ШИП) характеризуется большой полосой пропускания и большей линейностью характеристик управления. Поэтому ШИП находит применение для электропривода с высоким быстродействием и точностью регулирования. Он особенно удобен при наличии сети постоянного тока или в автономных установках при питании привода от аккумуляторов. Однако широтно-импульсная модуляция выходного напряжения вызывает пульсацию тока якоря, приводящую к дополнительному нагреву ДПТ. Для режима рекуперации энергии потребуется источник питания ШИП, допускающий оба направления тока. При отсутствии такого источника обычно применяют неуправляемый выпрямитель, дополняемый соответствующими цепями, в которых должна гаситься рекуперированная нагрузка электроэнергии. Отмеченные недостатки ШИП ограничивают его применение для электроприводов небольшой мощности – от долей киловатт до нескольких киловатт.

3.3.2 Программа работы

1. Исследование сигналов управления

Соберите схему в соответствии с рисунком 3.3.6.

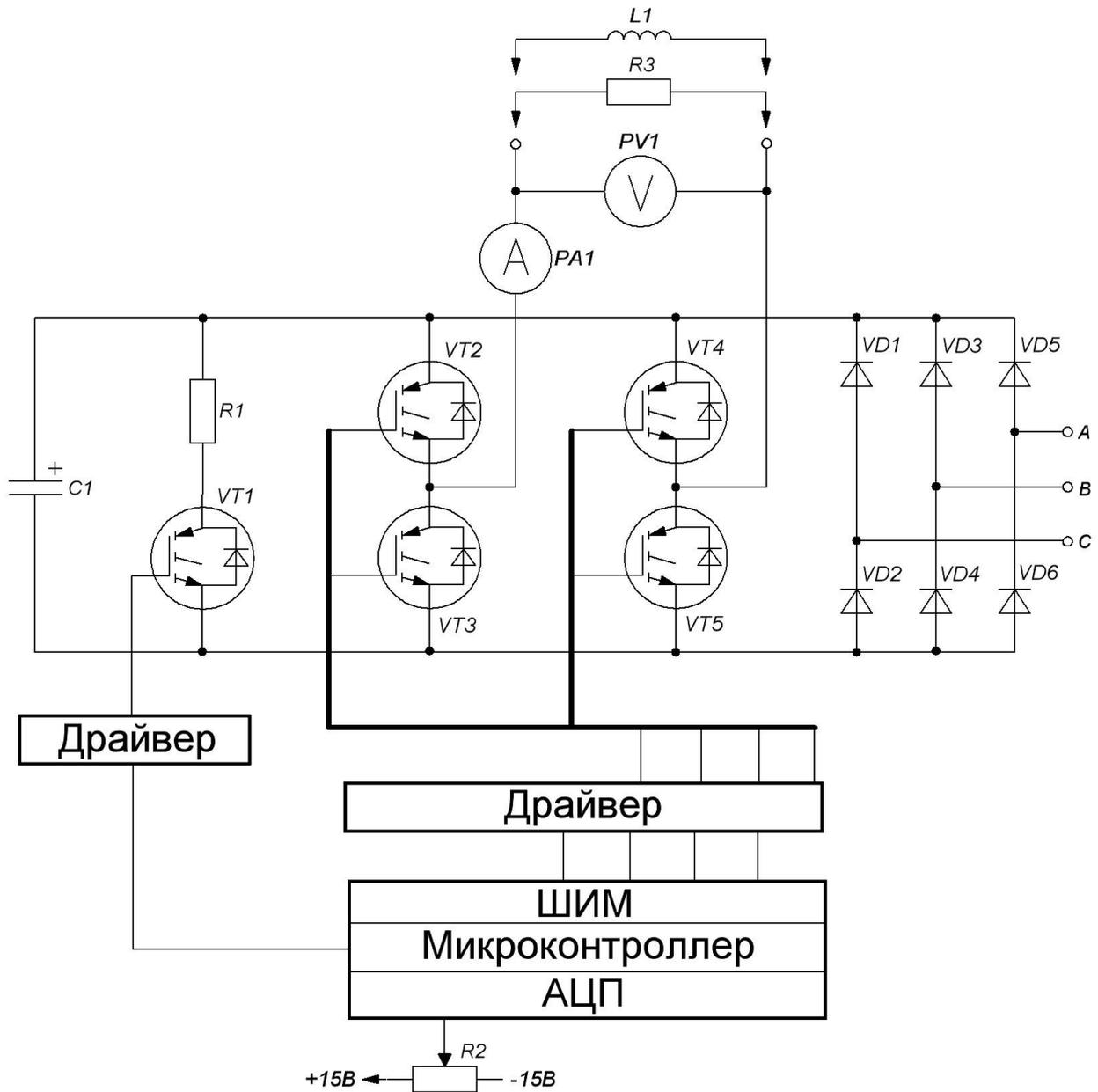


Рисунок 3.3.6 - Широтно-импульсный преобразователь с активной и индуктивно активной нагрузкой

На панели расположены два гнезда, подключенные к выходу микроконтроллера. На этих выводах присутствуют сигналы управления плечом преобразователя (уровень сигналов инверсный). Левое гнездо соответствует верхнему транзистору плеча, а правое гнездо - нижнему. С помощью осциллографа можно наблюдать форму сигналов управления при различных режимах работы преобразователя.

Для этого нужно задать режим работы ШИП и включить его. Резистором $R2$ можно изменять скважность.

2. Исследование силовой части

2.1 Активная нагрузка

Подключите активную нагрузку к преобразователю. Выберите режим работы «симметричный».

Изменяя скважность импульсов резистором R2, измеряйте напряжение и ток в нагрузке приборами PA1, PV1. Наблюдайте форму выходного напряжения ШИП.

Результаты измерений занесите в таблицу 3.3.1.

Таблица 3.3.1 – Результаты измерений при активной нагрузке

$\varepsilon, \%$					
$U_1, \text{В}$					
$I_1, \text{А}$					

По результатам измерений постройте графики $U_1=f(\varepsilon), I_1=f(\varepsilon)$.
Выключить ШИП.

2.2 Индуктивная нагрузка

Подключите индуктивную нагрузку к преобразователю. В качестве индуктивной нагрузки используется обмотка возбуждения двигателя постоянного тока.

Повторить порядок выполнения лабораторной работы в соответствии с пунктом 2.2.

2.4 Двигательная нагрузка

Соберите схему согласно рисунка 3.3.7.

Задать резистором R3 ток обмотки возбуждения равным 0,25 А.

Изменяя резистором R2 скважность, снять регулировочную характеристику ШИП.

Результаты измерений занесите в таблицу 3.3.2, постройте графики $U_1 = f(\varepsilon), I_1 = f(\varepsilon), \omega = f(\varepsilon)$.

Таблица 3.3.2 - Результаты измерений при двигательной нагрузке

ε					
$U_1, \text{В}$					
$I_1, \text{А}$					
$\omega, \text{с}^{-1}$					

Сравните регулировочные характеристики для различных видов нагрузки.

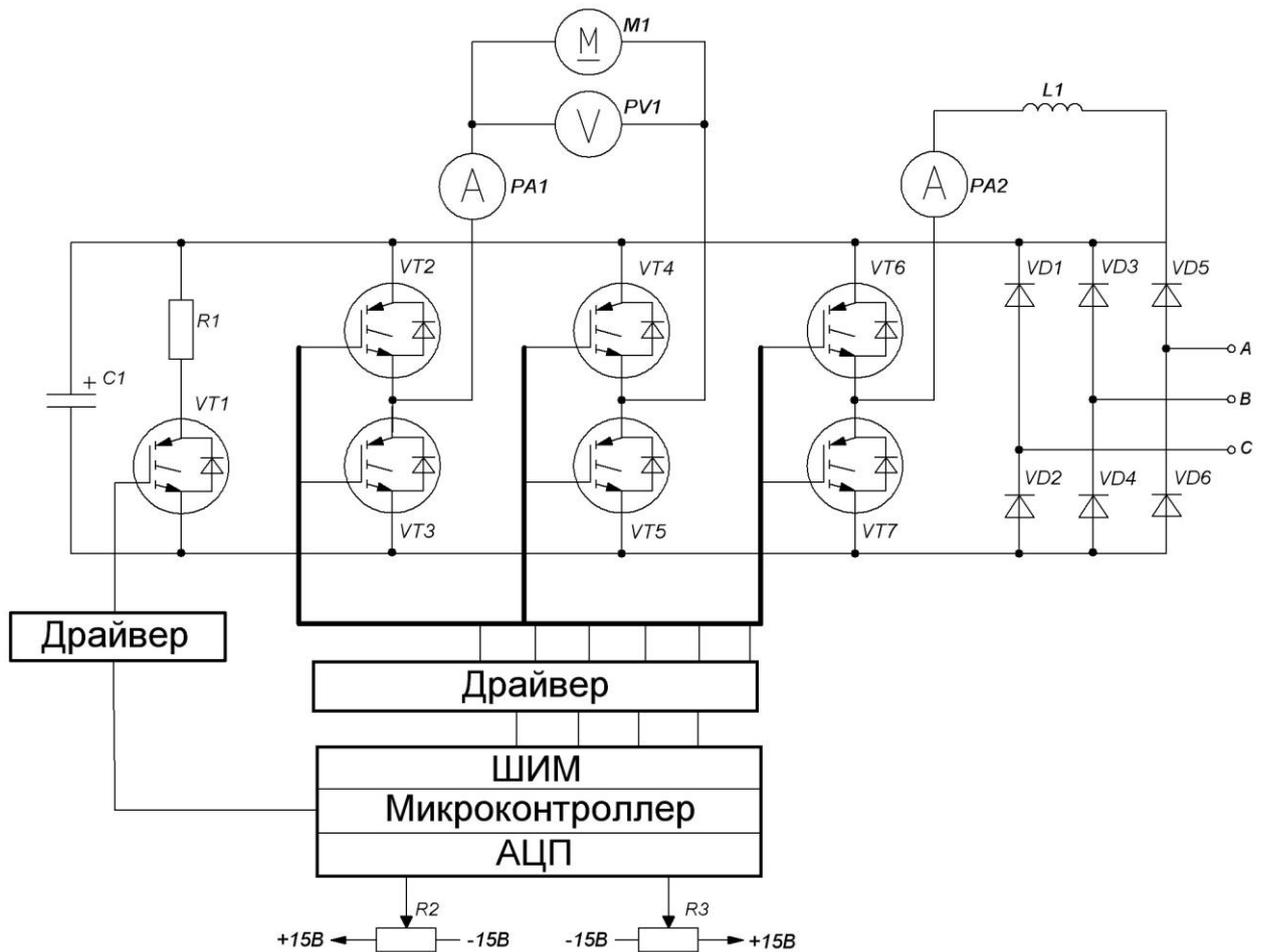


Рисунок 3.3.7 – Подключение двигательной нагрузки к широтно - импульсному преобразователю

3.3.3 Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы широтно-импульсного преобразователя.
2. Почему при скважности более 50% выходное напряжение положительное, а при меньшей, чем 50% отрицательное?
3. Почему при подключении двигательной нагрузки не происходит изменение полярности напряжения на обмотке возбуждения при изменении скважности?
4. Для чего в ШИП необходим диод, шунтирующий нагрузку?
5. Какова форма тока в нагрузке, питаемой ШИП?
6. В каких условиях возможно возникновение прерывистого тока в нагрузке?

3.4 Лабораторная работа №4. Исследование трехфазного инвертора на IGBT-транзисторах.

Цель работы: Изучить принцип работы и особенности построения трехфазных инверторов, особенности работы электроприводов при питании от инвертора.

3.4.1 Теоретические сведения

Основным элементом современных электроприводов переменного тока является преобразователь частоты (ПЧ).

В общем случае можно выделить две основные задачи, решаемые регулируемым электроприводом: управление моментом и скоростью вращения двигателя.

Необходимость регулирования момента диктуется предъявляемыми к электроприводу техническими и технологическими требованиями. Для нормального функционирования привода необходимо ограничивать момент и ток двигателя допустимыми значениями в переходных процессах пуска, торможения и приложения нагрузки. Для механизмов, испытывающих при работе значительные перегрузки вплоть до стопорения рабочего органа (например, приводы мельниц), возникает необходимость непрерывного регулирования момента двигателя в целях ограничения динамических ударных нагрузок. Во многих случаях требуется также точное дозирование усилия на рабочем органе (приводы металлообрабатывающих станков, намоточные машины и др.).

Технологические режимы многих производственных механизмов на разных этапах работы требуют движения рабочего органа с различной скоростью, что обеспечивается либо механическим путем, либо путем электрического регулирования скорости электропривода. При этом требования к диапазону и точности регулирования скорости могут изменяться в широчайших пределах в зависимости от области применения электропривода.

Характерным недостатком АИТ является то, что он не может работать на холостом ходу (с отключенным двигателем). Кроме того, при использовании АИТ возможны существенные потери мощности и формирование дополнительных возмущающих моментов в двигателе, приводящих к колебаниям скорости. При необходимости формирования токов двигателя, близких к синусоидальным, требуется значительное усложнение схемы АИТ.

Особенностями автономных инверторов напряжения (АИН, рисунок 3.4.1) являются питание от источника напряжения, замыкание контура реактивного тока нагрузки через обратные диоды и независимость формы кривой напряжения на выходе инвертора от характера нагрузки. Недостатком АИН является необходимость использования реверсивных выпрямителей для организации рекуперативных режимов работы электропривода. Однако применение инверторов напряжения позволяет без усложнения схемы получить высокие энергетические показатели и обеспечить выходные токи, близкие к синусоидальным. Именно это обуславливает широкое применение АИН в современном электроприводе.

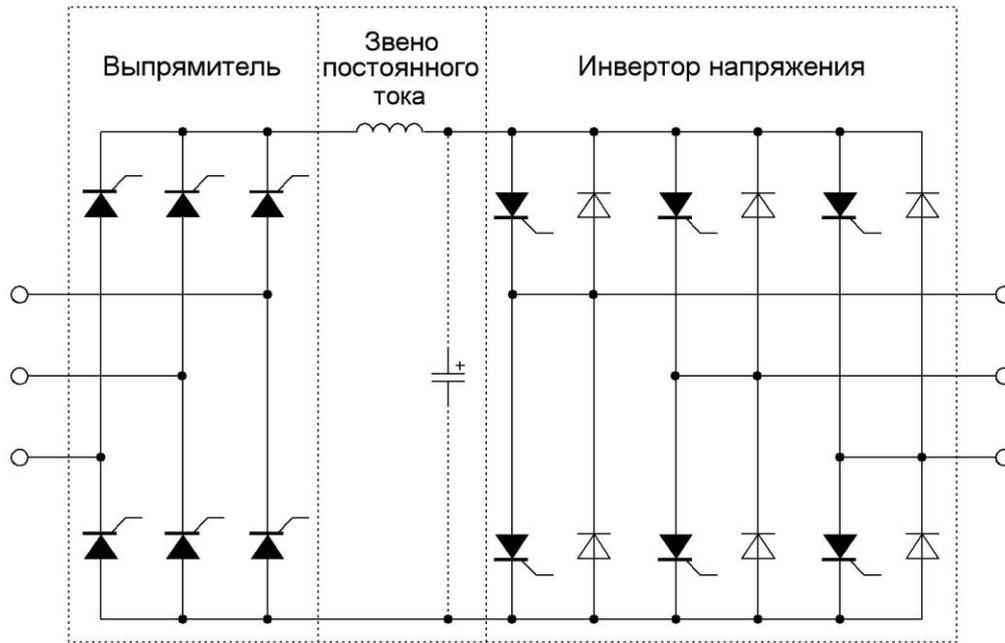


Рисунок 3.4.1 – Автономный инвертор напряжения

Для построения силовых ключей в области коммутируемых токов до 50 А используются биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET), а также низкочастотные и высокочастотные диоды и тиристоры. Силовые биполярные транзисторы в диапазоне до 50 А находят основное применение в дешевом промышленном оборудовании. В области коммутируемых токов более 50 А основными используемыми приборами являются силовые модули на базе биполярных транзисторов, запираемые тиристоры (GTO, GCT, IGCT). Особо следует выделить транзисторные и диодно-транзисторные модули, выполненные по интегральной технологии на основе транзисторов типа IGBT. Низкие потери мощности в ключевых режимах, большие значения рабочих напряжений и токов, малые времена включений и отключений этих модулей, а также возможность их использования при параллельной работе позволяют создавать мощные и компактные преобразовательные установки с высокой частотой коммутации полупроводниковых ключей.

Методы управления

Для решения задач регулирования скорости и момента в современном электроприводе применяют два основных метода частотного управления:

- скалярное управление;
- векторное управление.

Асинхронный электропривод со скалярным управлением является на сегодняшний день наиболее распространенным. Он применяется в составе приводов насосов, вентиляторов, компрессоров и других механизмов, для которых важно поддерживать либо скорость вращения вала двигателя (при этом используется датчик скорости), либо технологический параметр (например, давление в трубопроводе, при этом используется соответствующий датчик).

Основной принцип скалярного управления — изменение частоты и ам-

плитуды питающего напряжения по закону $U/f^n = const$, где $n \geq 1$. Конкретный вид зависимости определяется требованиями, предъявляемыми к приводу нагрузкой. Обычно за независимое воздействие принимается частота, а значение напряжения при данной частоте определяет вид механической характеристики, значения пускового и критического моментов. Скалярное управление обеспечивает постоянство перегрузочной способности привода независимо от частоты напряжения, однако имеет место снижение развиваемого двигателем момента при низких частотах (при $f < 0,1f_{ном}$). Максимальный диапазон регулирования скорости вращения ротора при неизменном моменте сопротивления для приводов со скалярным управлением достигает 1:10.

Метод скалярного управления относительно прост в реализации, но обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, при отсутствии датчика скорости на валу двигателя невозможно регулировать скорость вращения вала, так как она зависит от нагрузки. Наличие датчика скорости решает эту проблему, однако остается второй существенный недостаток — нельзя регулировать момент на валу двигателя. С одной стороны, и эту проблему можно решить установкой датчика момента, однако такие датчики имеют очень высокую стоимость, зачастую превышающую стоимость всего привода. Но даже при наличии датчика управление моментом получается очень инерционным. Более того, при скалярном управлении нельзя регулировать одновременно и момент и скорость, поэтому приходится выбирать ту величину, которая является наиболее важной для данного технологического процесса.

Для устранения недостатков, присущих скалярному управлению, фирмой SIEMENS еще в 1971 году был предложен метод векторного управления. Первые варианты приводов с векторным управлением требовали использования двигателей со встроенными датчиками потока. Это существенно ограничивало применение таких приводов.

В современных электроприводах в систему управления закладывается математическая модель двигателя, которая позволяет рассчитывать момент на валу и скорость вращения вала. При этом необходимыми являются только датчики тока фаз статора двигателя. Благодаря специальной структуре системы управления обеспечивается независимое и практически безынерционное регулирование двух основных параметров – момента на валу и скорости вращения.

На сегодняшний день сформировалось два основных класса систем векторного управления – бездатчиковые системы (без датчика скорости на валу двигателя) и системы с обратной связью по скорости. Применение того или иного метода векторного управления определяется областью применения электропривода. При небольших диапазонах изменения скорости (не более 1:100) и требованиях к точности ее поддержания не более $\pm 0,5\%$ применяют бездатчиковое векторное управление. Если же скорость вращения вала изменяется в широких пределах (до 1:10000 и более), имеются требования к высокой точности поддержания скорости вращения (до $\pm 0,02\%$ при частотах вращения менее 1 Гц) или есть необходимость позиционирования вала. Также при необходимости регулирования момента на валу двигателя на очень низких частотах вращения, применяют методы векторного управления с обратной связью по скорости.

При использовании векторного управления достигаются следующие преимущества:

- высокая точность регулирования скорости даже при отсутствии датчика скорости;
- плавное, без рывков, вращение двигателя в области малых частот;
- возможность обеспечения номинального момента на валу при нулевой скорости (при наличии датчика скорости);
- быстрая реакция на изменение нагрузки: при резких скачках нагрузки практически не происходит скачков скорости;
- обеспечение такого режима работы двигателя, при котором снижаются потери на нагрев и намагничивание, а, следовательно, повышается КПД двигателя.

Наряду с очевидными преимуществами, методу векторного управления присущи и некоторые недостатки, такие, как большая вычислительная сложность и необходимость знания параметров двигателя. Кроме того, при векторном управлении колебания скорости на постоянной нагрузке больше, чем при скалярном управлении. Следует отметить, что существуют области, в которых возможно использование только скалярного управления, например в групповом приводе, где от одного преобразователя питаются несколько двигателей.

Построение силовой части

Наибольшее распространение получили преобразователи частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного тока, построенные по схеме выпрямитель — автономный инвертор. Принцип работы и области применения таких ПЧ зависят от типа используемого выпрямителя и автономного инвертора (инвертор напряжения или инвертор тока).

Существует несколько различных схем выпрямителей. По принципу действия они могут быть разделены на три группы: управляемые, полууправляемые и неуправляемые. Схемотехнически все выпрямители строятся по трехфазной мостовой схеме.

Наибольшее распространение получили неуправляемые выпрямители. Выполняемые на самых простых и дешевых полупроводниковых приборах — диодах, они характеризуются максимальной простотой и надежностью, высоким КПД, а также достаточно высоким качеством выходного (выпрямленного) напряжения и гармонического состава тока, потребляемого из сети. Однако неуправляемость процесса преобразования энергии не позволяет реализовать режимы рекуперации, необходимые во многих случаях.

Управляемые выпрямители, выполняемые обычно на низкочастотных тиристорах, лишены как недостатков, так и большинства достоинств диодных выпрямителей. Они обладают высоким КПД и свойством обратимости по направлению преобразования энергии и обычно используются совместно с автономными инверторами тока для регулирования величины выходного тока преобразователя. Недостатки управляемых выпрямителей заключаются в повышенном уровне пульсаций выпрямленного напряжения, в пониженном значении коэффициента мощности, который уменьшается пропорционально выходному напряжению, и в одностороннем направлении выходного тока. При необходи-

мости обеспечить протекание выпрямленного тока в обоих направлениях используют реверсивные тиристорные преобразователи, состоящие из двух включенных встречно-параллельно тиристорных выпрямителей, один из которых предназначен для протекания тока нагрузки в прямом, а другой в обратном направлении. Это усложняет и удорожает преобразователь.

Полууправляемые выпрямители занимают промежуточное положение между управляемыми и неуправляемыми выпрямителями, позволяя регулировать значение выпрямленного напряжения без возможности рекуперации энергии в сеть. В случае управляемых и полууправляемых выпрямителей появляется возможность отключения силовой схемы ПЧ от сети без использования дополнительного оборудования.

В зависимости от типа автономного инвертора контур постоянного тока может быть выполнен как звено, обеспечивающее постоянное напряжение (обычно С- или LC фильтр), или как звено, поддерживающее постоянство тока (фильтр в виде реактора со значительной индуктивностью). Величина емкости конденсатора в звене постоянного тока обычно составляет 2000-20000 мкФ; такие конденсаторы имеют большие габариты и высокую стоимость.

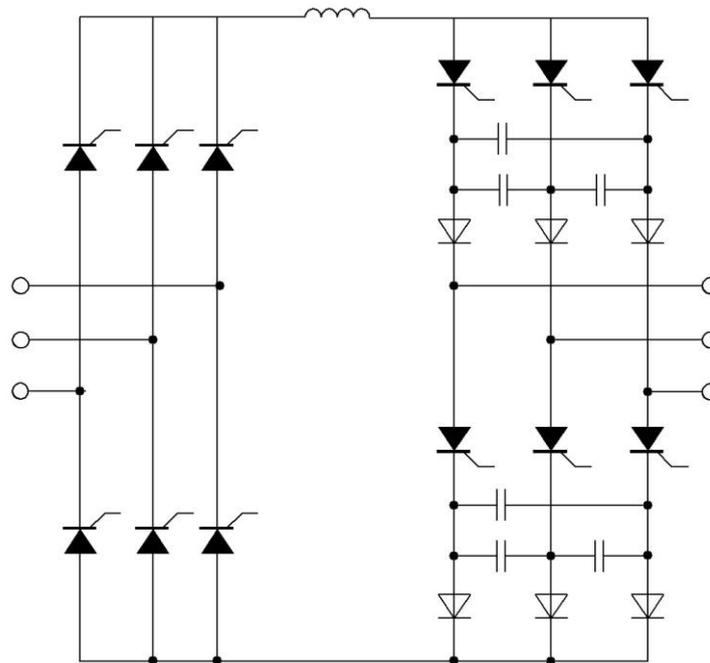


Рисунок 3.4.2 – Автономный инвертор тока

Характерными особенностями автономных инверторов тока (АИТ, рисунок 3.4.2) являются питание от источника тока (в цепь источника включен дроссель значительной индуктивности), обмен реактивной энергией нагрузки с коммутирующим конденсатором, значительное колебание напряжения на входе инвертора при постоянном токе источника, а также зависимость формы кривой напряжения на выходе и входе инвертора от характера нагрузки. АИТ технически реализуются проще, чем АИН, так как в них отсутствует возвратный диодный мост. В ПЧ на основе АИТ при использовании управляемых выпрямителей возможна рекуперация энергии в сеть, что важно для электроприводов, работающих в повторно-кратковременных режимах работы.

Для построения систем с обратной связью по скорости в ПЧ предусматривают входы для подключения датчика скорости типа энкодер. Модуль сопряжения датчиком скорости может входить в стандартную поставку ПЧ или выполняться в Биде платы расширения. Для питания дискретных входов и датчика скорости используется встроенный источник питания (обычно 24 В).

3.4.2 Программа работы

1. Соберите схему в соответствии с рисунком 3.4.3.

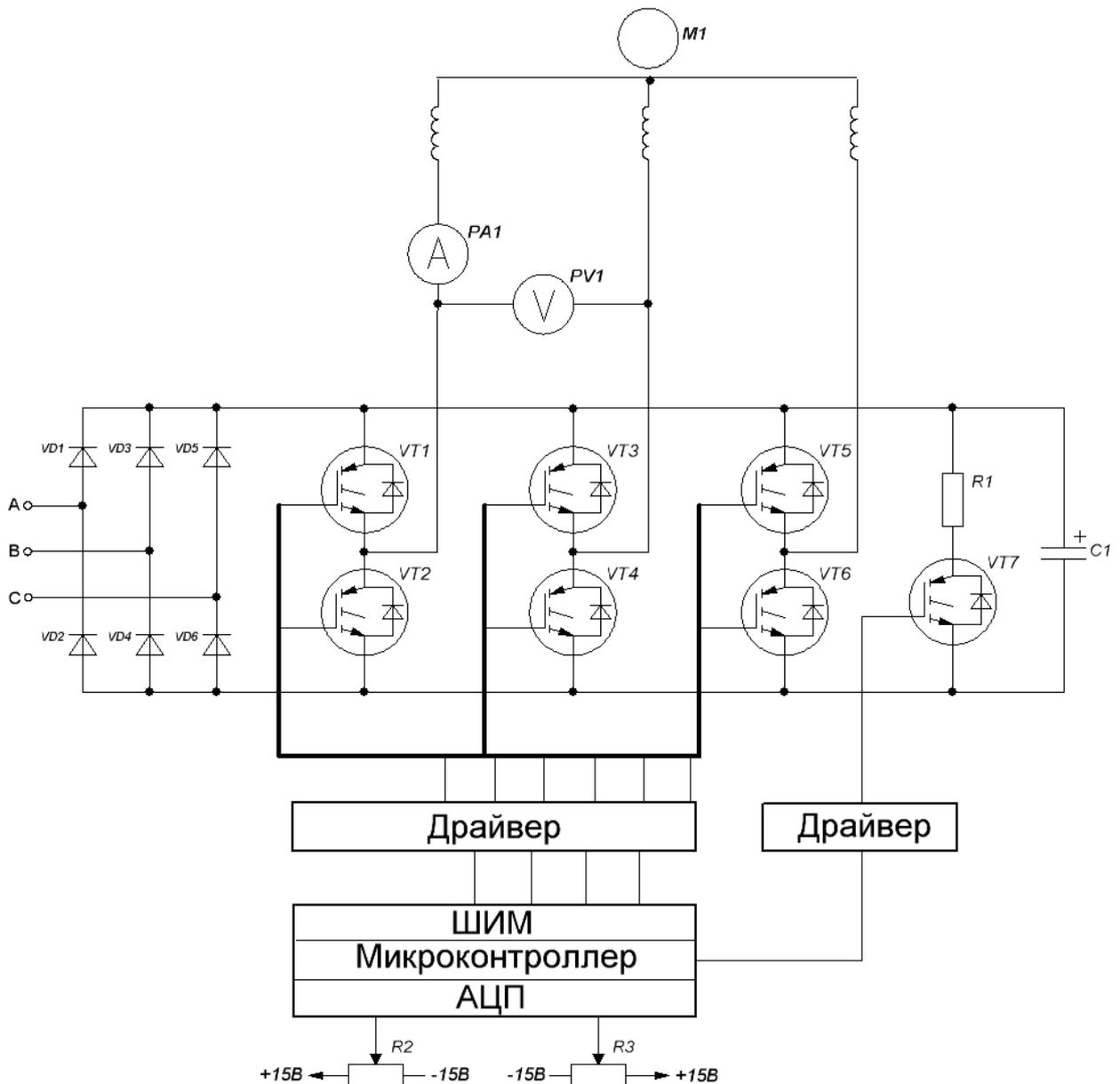


Рисунок 3.4.4 – Инвертор напряжения

2. Исследование сигналов управления

Инвертор может работать в двух режимах:

- Независимое управление частотой и напряжением.
- Управление частотой, с подстройкой напряжения по закону $U/f = const$.

На панели расположены два гнезда, подключенные к выходу микро-

контроллера. На этих выводах присутствуют сигналы управления двумя нижними транзисторами инвертора. С помощью осциллографа можно наблюдать форму сигналов управления драйверами (уровень сигналов инверсный).

Для этого нужно:

- задать режим работы «независимое управление напряжением»;
- задать резистором R3 максимальное напряжение (на индикаторе PV3 будет отображаться задание в процентах и знак «минус»);
- резистором R1 задать минимальную частоту инвертора.

3. Исследование силовой части

Выбрать режим работы инвертора « $U/f=const$ ». Задать частоту инвертор равную нулю.

Подключить двигатель к инвертору.

Подключить осциллограф к датчику тока ВА1.

Изменяя частоту инвертора с помощью резистора R31 можно наблюдать форму тока фазы двигателя.

4. Исследование регулировочных характеристик.

Изменяя частоту инвертора от 0 до 60 Гц, измеряйте напряжение, ток двигателя и скорость вращения.

Результаты измерений занесите в таблицу 10, постройте зависимости напряжения, тока и скорости от частоты питающего напряжения.

Таблица 3.4.1 - Результаты измерений трехфазного инвертора

f , Гц					
U_1 , В					
I_1 , А					
ω , с ⁻¹					

Для отключения инвертора нажать кнопку «Стоп».

3.4.3 Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы трехфазного инвертора.
2. Какова форма напряжения на выходе трехфазного инвертора?
3. Для чего используют широтно-импульсное модулирование выходного сигнала инвертора?
4. Изменяются ли характеристики двигателя при питании от трехфазного инвертора?
5. С какой целью при изменении частоты одновременно изменяют величину выходного напряжения инвертора?

3.5 Лабораторная работа №5. Исследование релейных схем торможения асинхронного двигателя.

Цель работы: Изучить способы торможения электродвигателей, принципы построения и особенности работы схем торможения.

3.5.1 Теоретические сведения

В соответствии с направлением действия момента электродвигателя относительно направления его вращения режим работы электродвигателя в системе электропривода может быть двигательным или тормозным. В двигательном режиме направление момента электродвигателя совпадает с направлением вращения вала и момент будет двигательным, в тормозном — направления не совпадают и момент электродвигателя тормозной. В системе прямоугольных координат механические характеристики двигательного режима расположены в первом и третьем квадрантах, а тормозного — во втором и четвертом.

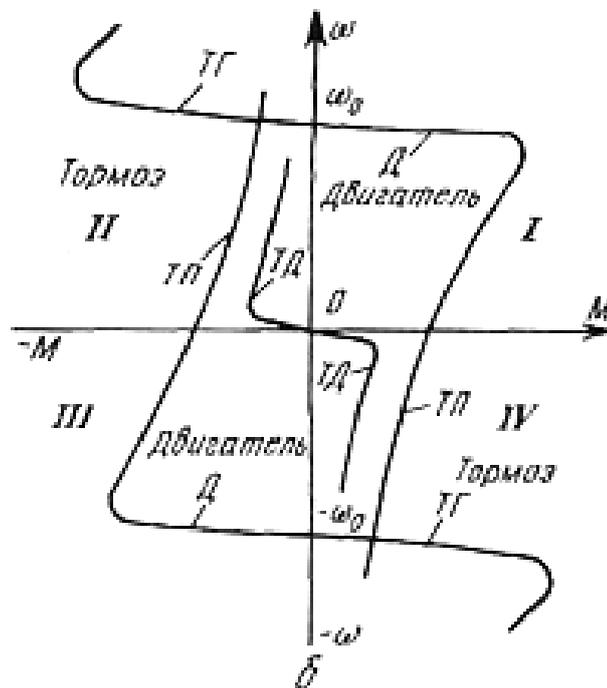


Рисунок 3.5.1- Механические характеристики асинхронного двигателя в двигательном и тормозном режимах работы:

Д – двигательный режим; ТГ – торможение генераторное; ТП – торможение противовключением; ТД – динамическое торможение

В свою очередь, различают следующие режимы электрического торможения электродвигателей: рекуперативный, противовключением и динамический.

Режим рекуперативного торможения достигается при скоростях по ходу вращения электродвигателя, превышающих его скорость идеального холостого хода: $\omega > \omega_0$. В этом случае энергия торможения поступает (рекуперируется) в элек-

трическую сеть в виде потока электрической энергии обратного направления.

Режим торможения противовключением имеет место при вращении электродвигателя против направления действия его момента. Такой режим может быть достигнут либо реверсированием электродвигателя на ходу, либо введением внешних силовых резисторов в цепь ротора у асинхронного двигателя с фазным ротором. При реализации торможения противовключением в схемах предусматривается датчик контроля скорости, чтобы исключить реверсирование двигателя. При других способах торможения он не требуется.

Режим динамического торможения осуществляется переключением цепей вращающегося электродвигателя на режим автономного генератора с нагрузкой, например в виде балластного силового резистора. Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может быть реализован подачей постоянного напряжения на статор двигателя. В двигателе с фазным ротором постоянное напряжение может подаваться также и на ротор (оставшийся элемент – ротор или статор должны быть закорочены).

В тормозных режимах асинхронный двигатель развивает большой момент и токи, поэтому в целях ограничения токов и моментов двигателя часто вводят добавочные сопротивления в ротор или статор двигателя. Обычно они выводятся ступенчато. В зависимости от параметра, на который реагирует схема управления различают схемы торможения в функции тока, скорости, ЭДС, времени.

В последних двух режимах энергия торможения поглощается электродвигателем и силовыми резисторами, вызывая их нагрев.

В частности, цикл реверса содержит режимы торможения противовключением и двигательный.

В качестве примера на рисунке 3.5.1 приведены механические характеристики асинхронного двигателя в двигательном и тормозных режимах для прямого и обратного направлений вращения.

Использование электрических способов торможения электродвигателей повышает производительность установок с электроприводом, улучшает качество управления ими.

3.5.2 Программа работы

1. Соберите схемы в соответствии с рисунками 3.5.2, 3.5.3а. Включите режим работы инвертора « $U/f=const$ » Включить тумблер питания для релейно-контактных схем SA1.

2. Торможение противовключением.

Нажать кнопку SB2 «Стоп». При этом включится реле KV2 и реле соответствующее реверсу двигателя.

Выставить частоту инвертора равную 50 Гц.

Включить инвертор кнопкой SB1 "Вперед" или кнопкой SB2 "Назад".

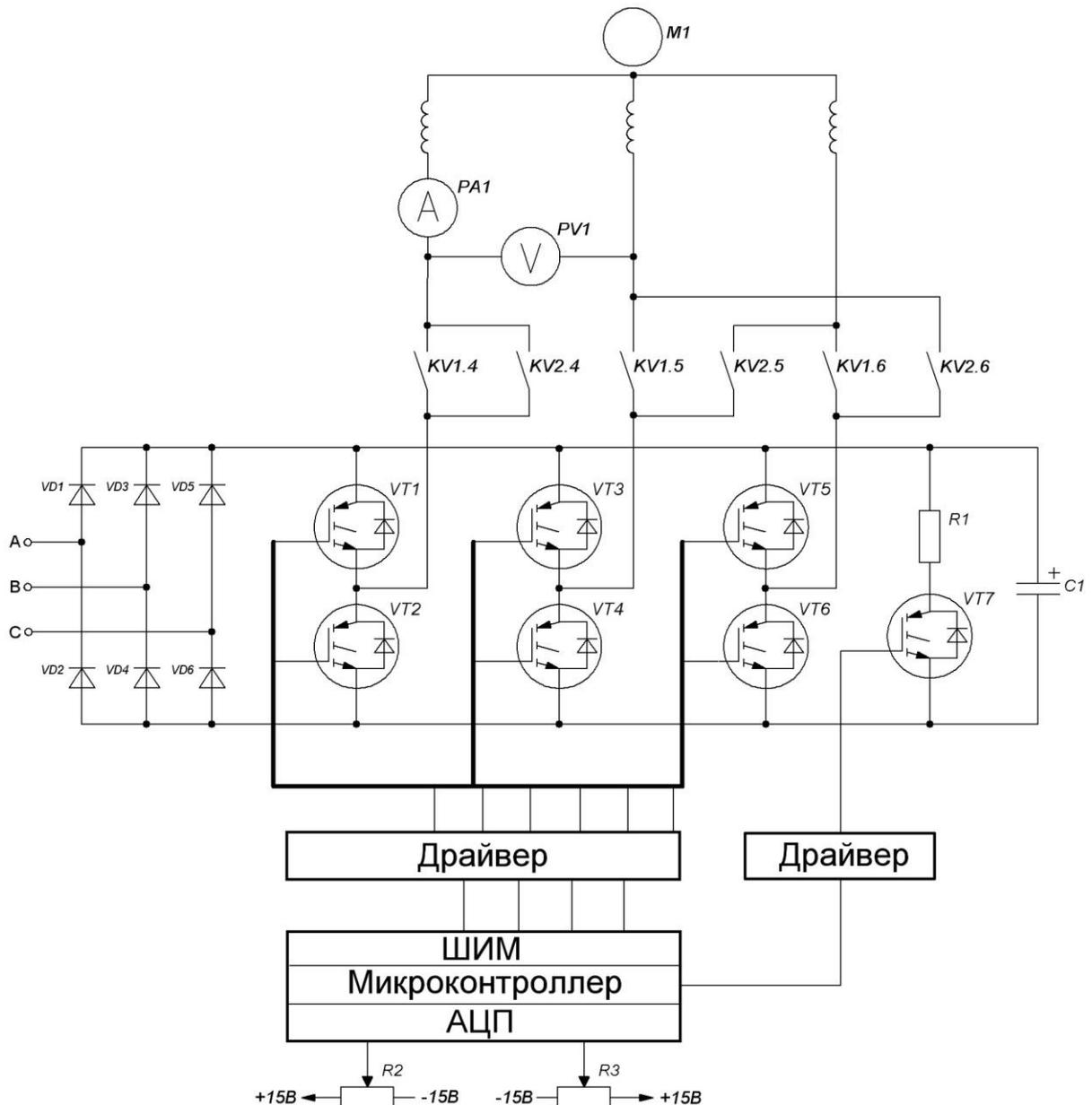


Рисунок 3.5.2 – Подключение асинхронного двигателя к инвертору напряжения

После остановки двигателя инвертор выключается автоматически. Обратите внимание на изменение тока двигателя.

После остановки двигателя возможен пуск в обратную сторону в течение не более 0.1 секунды. Это является нормальным режимом работы инвертора.

3. Динамическое торможение.

Изменить схему 3.5.3а на 3.5.3б.

Выставить частоту инвертора равную 50Гц.

Включить инвертор кнопкой SB70 "Вперед" или кнопкой SB71 "Назад".

Напряжение при динамическом торможении регулируется резистором R32 «Задание напряжения». При режиме работы инвертора " $U/f=const$ ", резистор R32 «Задание напряжения» не влияет на амплитуду синусоидального напряжения.

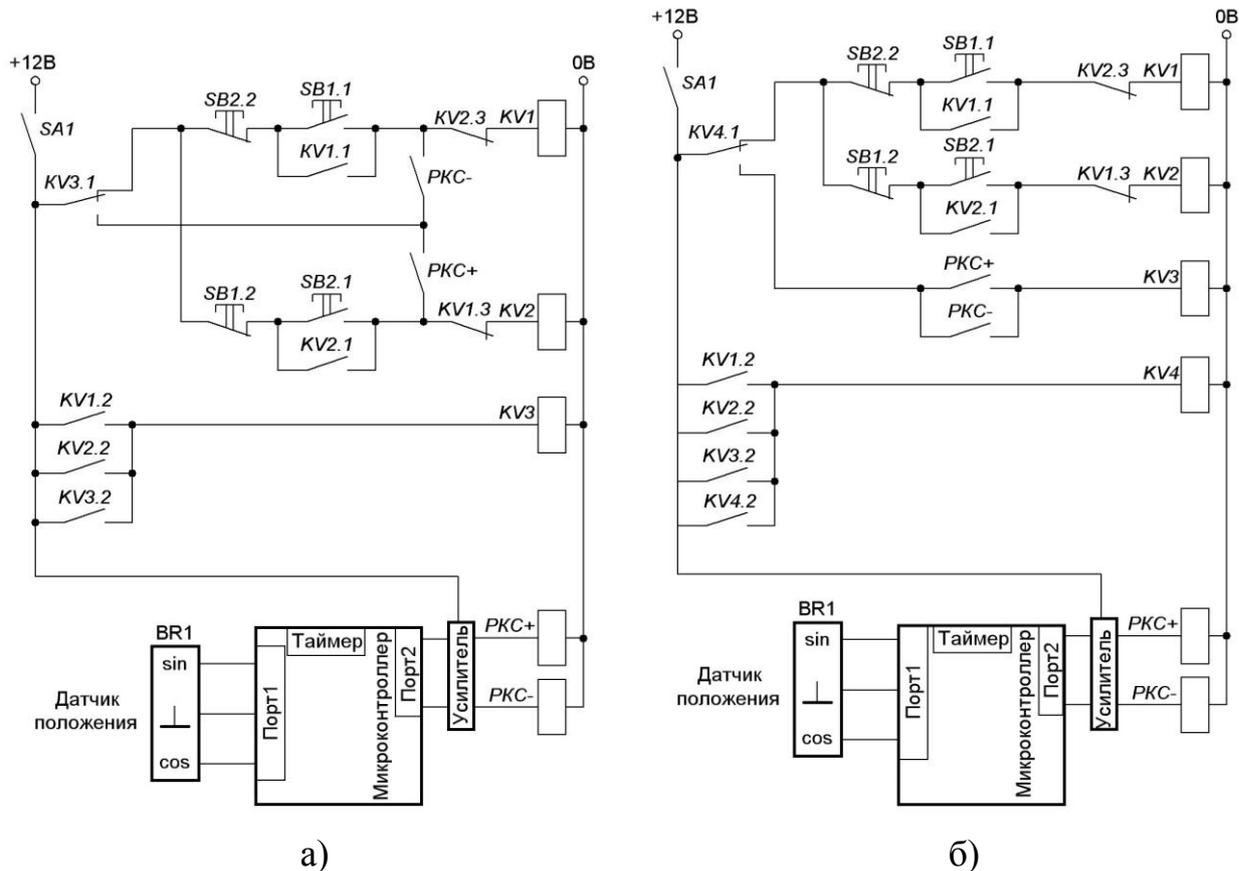


Рисунок 3.5.3 – Схема релейно-контактного управления торможением асинхронного двигателя

- а) – при торможении противключением,
 б) – при динамическом торможении.

Задать желаемое напряжение динамического торможения резистором R3. Напряжение в звене постоянного тока 340В, сопротивление обмоток статора 70..120 Ом (в зависимости от температуры).

Нажать кнопку «Стоп».

После остановки двигателя инвертор выключается автоматически.

3.5.3 Контрольные вопросы

1. Перечислите способы торможения электродвигателей.
2. Укажите наиболее экономичный и наиболее эффективный тормозные режимы.
3. Объясните работу исследуемых схем.
4. Объясните характер изменения тока двигателя при торможении в исследуемых схемах.

3.6 Лабораторная работа №6. Исследование способов пуска асинхронного двигателя

Цель работы: Изучить способы пуска асинхронных двигателей, их особенности и области применения.

3.6.1 Теоретические сведения

Способы пуска электродвигателей определяются, во-первых, видом электродвигателя и, во-вторых, требованиями со стороны рабочей машины или механизма, которые приводятся ими в действие.

Прямой способ пуска – это наиболее простой и широко используемый способ, когда электродвигатель непосредственно подключается к электрической сети. Прямой пуск допустим для микроэлектродвигателей и асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 100 кВт. Для прямого пуска характерны большие пусковые токи электродвигателя и значительные ударные моменты и ускорения в системе электропривода. Последнее не всегда допустимо для ряда рабочих машин и механизмов. Например, в ЭП грузоподъемных и транспортных машин и механизмов значительные ударные моменты и вызываемые ими большие ускорения могут нарушить их работоспособность и привести к аварии.

Способ снижения напряжения питания, обычно от нуля до номинального, применяют с целью снижения бросков тока и моментов электродвигателя при пуске. При этом пуск становится управляемым. Таким способом можно пускать электродвигатели как переменного, так и постоянного тока. На практике для реализации данного способа пуска необходимо использовать индивидуальный регулируемый источник электропитания соответствующей мощности, т. е. способ требует дополнительных затрат. Вместе с тем этот способ экономичный, повышает надежность электропривода и нашел широкое применение для пуска и одновременного регулирования угловой скорости электродвигателей постоянного тока и АД, используемых в современных автоматизированных электроприводах с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Реостатный способ пуска, заключающийся во введении в главные силовые цепи пусковых реостатов, которые после пуска частично или полностью шунтируют, используют для ограничения пусковых токов и моментов электродвигателей и одновременно для "смягчения" механических характеристик. Способ неэкономичный, так как в резисторах, включенных в силовые цепи, теряется значительное количество электроэнергии. Вместе с тем способ достаточно доступный и позволяет понижать жесткость механических характеристик электродвигателя и осуществлять управляемый пуск. Это особенно важно, например, для подъемно-транспортных механизмов, так как за счет пониженной жесткости механических характеристик обеспечивается безударное и плавное перемещение грузов.

Реакторный и автотрансформаторный способы пуска используют в тех случаях, когда в мощных электроприводах переменного тока для ограничения пусковых токов вместо пусковых резисторов целесообразно использовать пусковые реакторы (индуктивные сопротивления) и автотрансформаторы.

Пуск переключением со "звезды" на "треугольник" применяют для трехфазных короткозамкнутых асинхронных двигателей с соединением обмотки статора в рабочем режиме по схеме "треугольник". С целью снижения пускового тока обмотку статора на период пуска соединяют по схеме "звезда". При этом пусковой ток в линии и пусковой момент двигателя понижаются в 3 раза.

Повышение пускового момента и снижение пускового тока АД с короткозамкнутым ротором без увеличения активного сопротивления обмотки ротора в рабочем режиме (а следовательно, и потерь мощности в ней) привело к выпуску специальных короткозамкнутых асинхронных двигателей с повышенным пусковым моментом. Такие двигатели имеют обмотку ротора в виде двойной "беличьей клетки", или ее стержни размещены в глубоких пазах (глубокопазные). При пуске двухклеточных и глубокопазных двигателей из-за явления электромагнитной индукции большая часть тока ротора вытесняется в верхнюю часть короткозамкнутой обмотки (явление скин-эффекта). Это приводит к увеличению ее активного сопротивления, следовательно, к увеличению пускового момента и снижению пускового тока. В рабочем режиме АД скин-эффект ослабевает и ток ротора протекает по всей площади поперечного сечения стержней обмотки ротора, т. е. активное сопротивление обмотки току ротора по сравнению с пусковым режимом уменьшается. Из-за большого магнитного рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора АД с повышенным пусковым моментом имеют несколько худшие энергетические показатели (КПД, $\cos\phi$), чем короткозамкнутые АД общего применения.

3.6.2 Программа работы:

1. Соберите схему в соответствии с рисунками 3.6.1, 3.6.2.

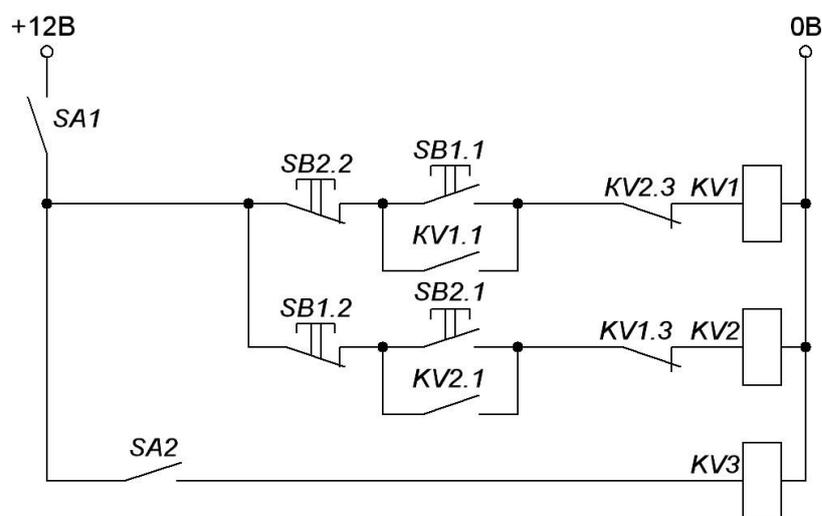


Рисунок 3.6.1 – Релейно-контактное управление пуском асинхронного двигателя

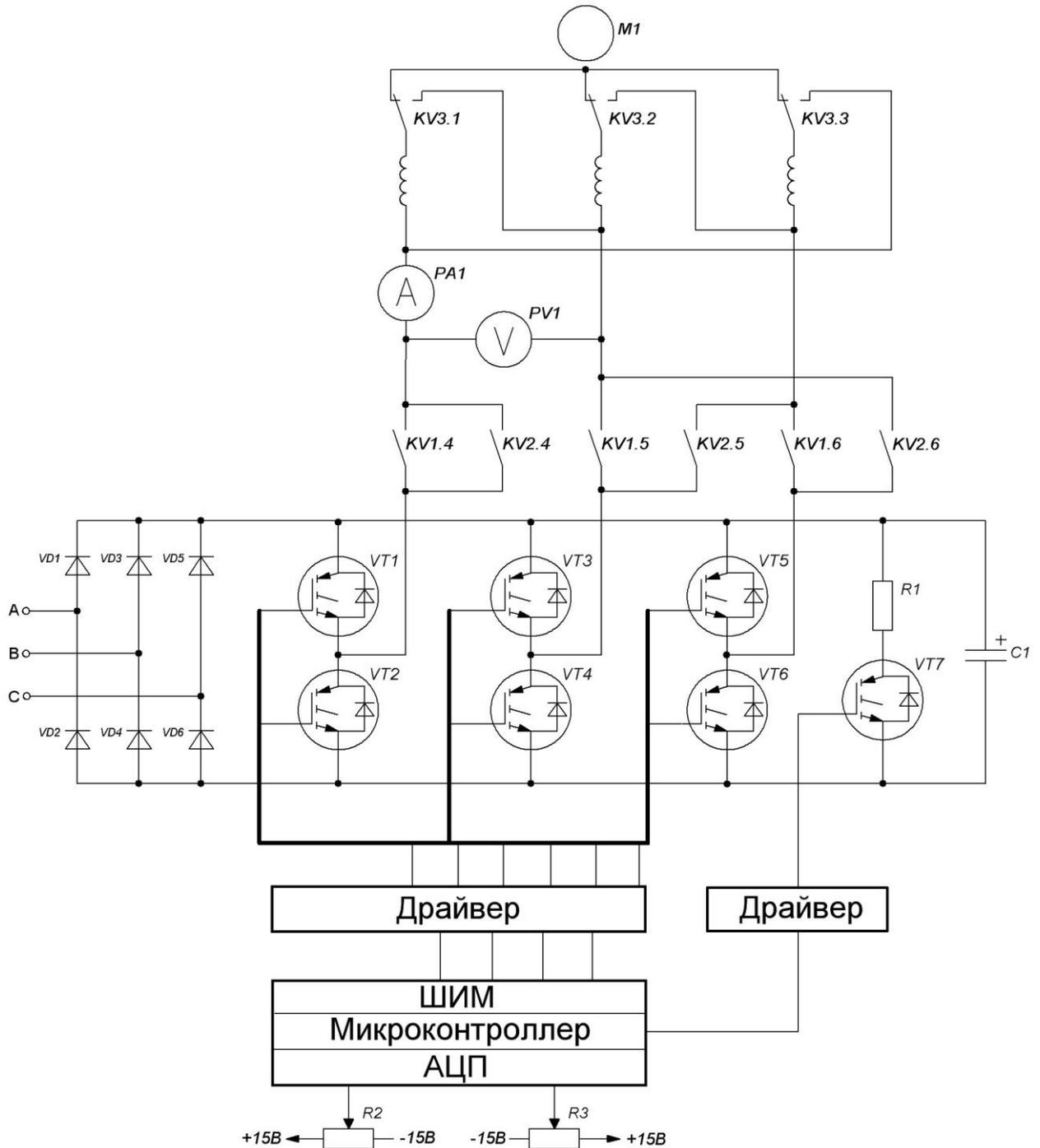


Рисунок 3.6.2 – Подключение асинхронного двигателя к инвертору напряжения

Включить режим работы инвертора « $U/f=const$ ». Выставить частоту инвертора равную 50 Гц. Включить тумблер SA1.

2. Прямой пуск

Включить тумблер SA2 (обмотка статора соединена в треугольник).

Нажать кнопку SB1 «Вперед».

Зафиксировать пусковой ток. Измерения тока проведите три раза и вычислите среднее значение.

Для выключения инвертора нажать кнопку SB2 «Стоп».

3. Пуск переключением обмоток статора со звезды на треугольник

Выключить тумблер SA2 (обмотка статора соединена в звезду). Нажать кнопку SB1 «Вперед». Зафиксировать пусковой ток.

После разгона двигателя, включить тумблер SA2 (обмотка статора соединена в треугольник). Зафиксировать бросок тока (должен быть меньше пускового тока при прямом пуске). Измерения тока проведите три раза и вычислите среднее значение.

Для выключения инвертора нажать кнопку «Стоп».

4. Частотный пуск

Выставить частоту инвертора равную нулю.

Включить инвертор кнопкой SB1 "Вперед".

Разогнать двигатель, плавно увеличивая частоту и напряжение инвертора. После разгона двигателя нажать кнопку «Стоп» для отключения инвертора.

3.6.3 Контрольные вопросы

1. Перечислите способы пуска электродвигателей.
2. Когда возможно использовать пуск с переключением со звезды на треугольник?
3. Как изменяется пусковой момент двигателя при пуске с переключением со звезды на треугольник?
4. Почему прямой пуск двигателя не всегда возможен?
5. В каких условиях применим прямой пуск двигателя?
6. Какими пусковыми свойствами обладает асинхронный двигатель?

3.7 Лабораторная работа №7. Исследование реостатного пуска двигателя постоянного тока

Цель работы: Изучить особенности реостатного пуска двигателя постоянного тока, принципы построения и работы схем реостатного пуска.

3.7.1 Теоретические сведения

Способы пуска электродвигателей определяются, во-первых, видом электродвигателя и, во-вторых, требованиями со стороны рабочей машины или механизма, которые приводятся ими в действие.

Прямой способ пуска — это наиболее простой и широко используемый способ, когда электродвигатель непосредственно подключается к электрической сети. Прямой пуск допустим для микроэлектродвигателей и в некоторых случаях для коллекторных электродвигателей мощностью менее 0,8 кВт. Для прямого пуска характерны большие пусковые токи электродвигателя и значительные ударные моменты и ускорения в системе электропривода. Последнее не всегда допустимо для ряда рабочих машин и механизмов. Например, в электроприводе грузоподъемных и транспортных машин и механизмов значительные ударные моменты и вызываемые ими большие ускорения могут нарушить их работоспособность и привести к аварии.

Способ снижения напряжения питания, Обычно от нуля до номинального, применяют с целью снижения бросков тока и моментов электродвигателя при пуске. При этом пуск становится управляемым. Таким способом можно пускать электродвигатели как переменного, так и постоянного тока. На практике для реализации данного способа пуска необходимо использовать индивидуальный регулируемый источник электропитания соответствующей мощности, т. е. способ требует дополнительных затрат. Вместе с тем этот способ экономичный, повышает надежность ЭП и нашел широкое применение для пуска и одновременного регулирования угловой скорости электродвигателей постоянного тока, используемых в современных автоматизированных электроприводах с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

Реостатный способ пуска, заключающийся во введении в главные силовые цепи пусковых реостатов, которые после пуска электропривода частично или полностью шунтируют, используют для ограничения пусковых токов и моментов электродвигателей и одновременно для "смягчения" механических характеристик. Способ неэкономичный, так как в резисторах, включенных в силовые цепи, теряется значительное количество электроэнергии. Вместе с тем способ достаточно доступный и позволяет понижать жесткость механических характеристик электродвигателя и осуществлять управляемый пуск. Это особенно важно, например, для подъемно-транспортных электроприводов, так как за счет пониженной жесткости механических характеристик обеспечивается безударное и плавное перемещение грузов.

В случае реостатного пуска двигателя постоянного тока (ДПТ), а также для получения желаемых искусственных (реостатных) механических характери-

стик расчет сопротивлений ступеней пускового или регулировочного реостата ведут следующим образом.

Схема включения ДПТ с независимым возбуждением и его пусковая характеристика показаны на рисунке 3.7.1.

Графический метод расчета пусковых сопротивлений основан на том, что падение скорости прямо пропорционально сопротивлению якорной цепи.

$$\Delta\omega = (R_{я} + R_{д}) \frac{M}{c^2 \cdot \Phi^2},$$

где c – постоянная машины,

Φ – магнитный поток,

$R_{я}$, $R_{д}$ – сопротивления якоря и добавочное,

M – момент на валу.

Поэтому, предварительно построив пусковую характеристику, зная сопротивление якоря, можно рассчитать масштаб сопротивлений

$$m_R = \frac{R_{я}}{l_{79}},$$

где l_{79} – длина отрезка между точками 7 и 9.

Тогда сопротивление третьей секции (по рисунку) пропорционально длине отрезка между точками 5 и 7, второй – отрезку между точками 3 и 5 и т.д.

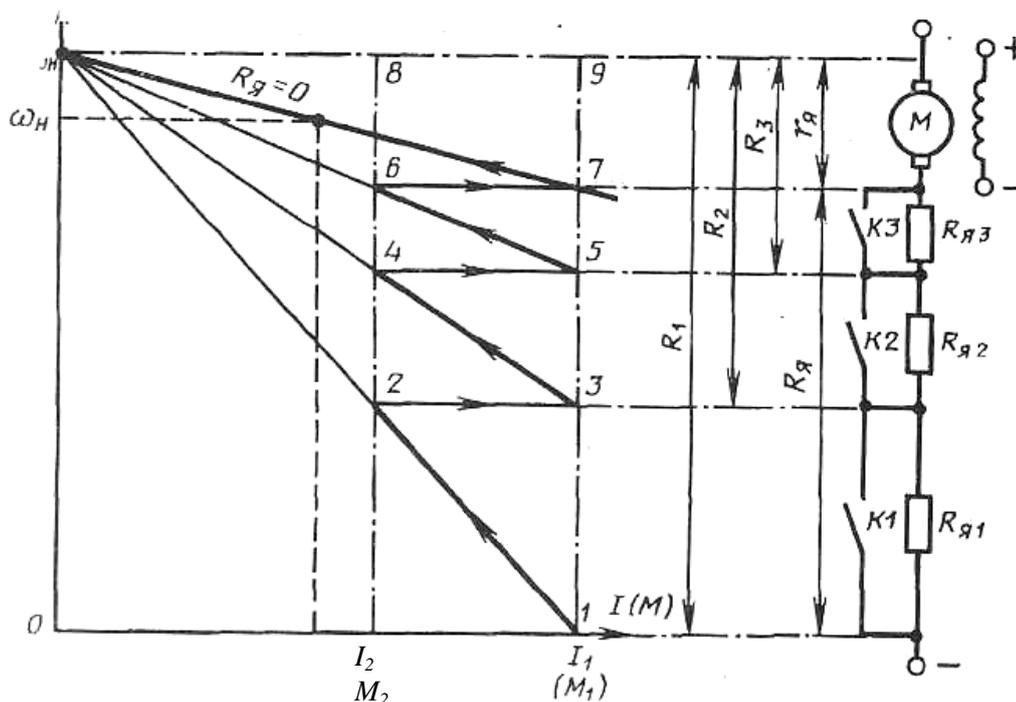


Рис. 10. Схема включения и пусковая характеристика ДПТ с независимым возбуждением

При аналитическом методе расчета необходимо рассчитать кратность пусковых моментов

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2}.$$

Тогда сопротивление секций пускового реостата

$$R_{\partial i} = R_{\text{я}} \lambda^{i-1} (\lambda - 1)$$

Значение момента переключения M_2 выбирают из условия $M_2 = (1,1-1,2)M_c$, где M_c – момент сопротивления при пуске. Значения максимального пускового момента M_1 выбирают $M_1 = (2-2,5)M_n$ при форсированном пуске и $M_1 = (1,4-1,6)M_n$ при плавном пуске.

Для согласования необходимого числа секций пускового реостата m и кратности пусковых моментов можно воспользоваться формулами

$$m = \frac{\lg \frac{1}{R_{\text{я}}^0 M_2^0}}{\lg \lambda}, \quad \lambda = \sqrt[m]{\frac{1}{R_{\text{я}}^0 M_2^0}},$$

где $R_{\text{я}}^0 = \frac{R_{\text{я}}}{R_n}$ - относительное сопротивление якоря, $R_n = U_n / I_n$ - номинальное сопротивление двигателя,

$$M_2^0 = \frac{M_2}{M_n} - \text{относительный момент переключения.}$$

В зависимости от параметра, на который реагирует схема управления, шунтируя добавочные сопротивления различают схемы пуска в функции тока, скорости, ЭДС, времени.

3.7.2 Программа работы

1. Соберите схему в соответствии с рисунками 3.7.2, 3.7.3.

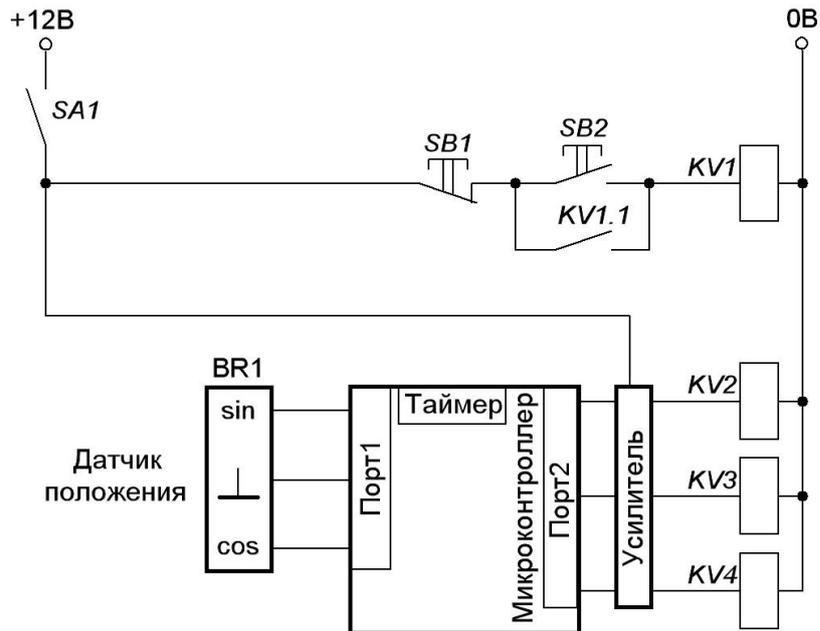


Рисунок 3.7.2 – Релейно-контактное управление пуском ДПТ

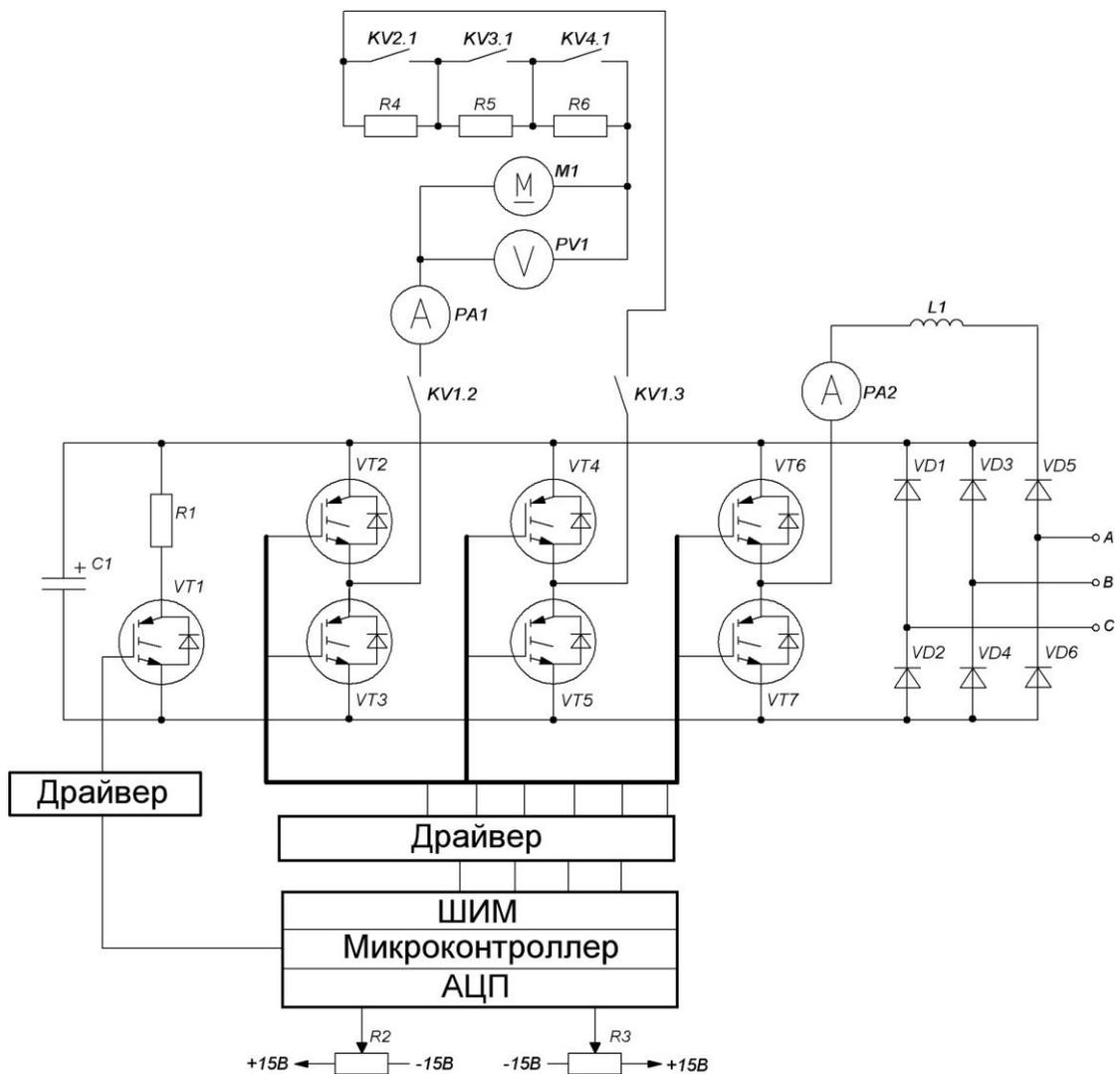


Рисунок 3.7.3 – Подключение двигателя постоянного тока к широтно-импульсному преобразователю для исследования способов пуска

2. С помощью панели управления РКУ выбрать меню: **rcu**(РКУ)-**Strt**(Start-СТарТ).

На правом индикаторе выбрать вид пуска: Сигг(Ток) / Edc(ЭДС) / Spd(скорость) / SEC(время).

На трех левых индикаторах задать значения срабатывания реле К8..К10 (при пуске в функции тока - одно значение на левом индикаторе). Порядок включения реле при пуске в функции тока: К2-К3-К4.

Включить ШИП возбуждения и задать ток равным 0,18 ампера.

Задать режим работы ШИП якоря: "*Симметричный*", "*Включить*".

Задать скважность ШИП якоря равной 80%.

Включить тумблер SA1.

Нажать кнопку SB2 (включение пускателя К1 и сигнал включения РКУ).

Индикаторы РКУ переходят в режим индикации (ток-напряжение-скорость-время).

Для остановки двигателя после пуска нажать кнопку SB1.

Для просмотра значений пуска, изменять значение времени с помощью панели управления РКУ. Для выхода из режима просмотра нажать на ручку управления.

Пример пуска в функции тока. Уровень срабатывания по току 1.00 А.

Выбрать режим (отсчет от главного меню): **rcu-Strt**. На индикаторах отображаются нули. На правом индикаторе - надпись ESC. Левый индикатор моргает.

Нажать на ручку управления РКУ. Левый индикатор моргает чаще. Поворачивая ручку выбрать число 100. При быстром вращении значение изменяется десятками. Нажать на ручку управления РКУ. Левый индикатор моргает с прежней частотой.

Поворачивая ручку управления РКУ, выбрать правый индикатор.

Нажать на ручку. Индикатор с надписью **ESC** моргает чаще (если при этой надписи нажать на ручку еще раз, то произойдет выход в меню **rcu**). Поворачивая выбрать надпись **Cur** (пуск в функции ток). При этом на средних индикаторах появятся прочерки.

Включить ШИП возбуждения и задать ток равным 0,18 ампера.

Задать режим работы ШИП якоря: "*Симметричный*", "*Включить*".

Задать скважность ШИП якоря равной 80%.

Включить тумблер SA1.

Нажать кнопку SB2. Происходит включение пускателя К5 и РКУ запускается. Двигатель разгоняется. При этом загораются светодиоды, сигнализирующие о включении реле К2..К4.

После разгона двигателя выключить: ШИП якоря, ШИП возбуждения, пускатель К1.

Поворачивая ручку управления (уже находимся в меню просмотра **rcu-SEE**) можно просмотреть значения: тока якоря, напряжения на якоре, скорости двигателя и времени.

3. Наблюдайте реостатный пуск в функции тока, ЭДС и времени. Обратите внимание за изменения тока двигателя.

3.7.3 Контрольные вопросы

1. Перечислите способы пуска электродвигателей.
2. Какие преимущества реостатного пуска двигателя по сравнению с другими способами?
3. Какие значения тока двигателя допустимы при форсированном реостатном пуске?
4. Как рассчитываются пусковые сопротивления?
5. Как влияют значения выбранных пусковых токов на необходимое число секций пускового реостата?
6. Какие преимущества и недостатки реостатного пуска в функции времени по сравнению с реостатным пуском в функции тока и ЭДС?

3.8 Лабораторная работа №8. Исследование способов торможения двигателя постоянного тока

Цель работы: Изучить способы торможения двигателя постоянного тока, их особенности и способы реализации.

3.8.1 Теоретические сведения

В соответствии с направлением действия момента электродвигателя относительно направления его вращения режим работы электродвигателя в системе ЭП может быть двигательным или тормозным. В двигательном режиме направление момента электродвигателя совпадает с направлением вращения вала и момент будет двигательным, в тормозном — направления не совпадают и момент электродвигателя тормозной. В системе прямоугольных координат механические характеристики двигательного режима расположены в первом и третьем квадрантах, а тормозного — во втором и четвертом.

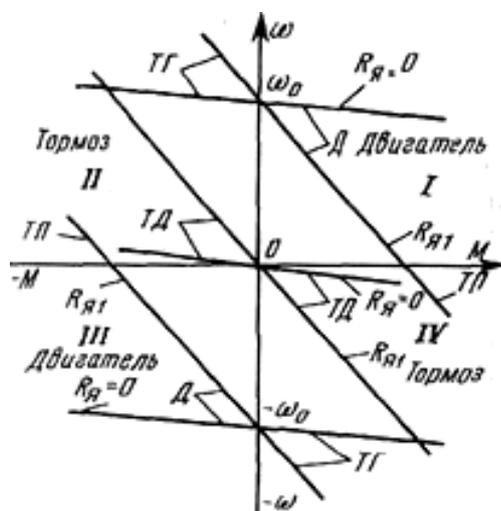


Рисунок 3.8.1 - Механические характеристики ДПТ независимого возбуждения в двигательном и тормозном режимах работы: Д – двигательный режим; ТГ – торможение рекуперативное; ТП – торможение противовключением; ТД – динамическое торможение

В свою очередь, различают следующие режимы электрического торможения электродвигателей: рекуперативный, противовключением и динамический.

Режим рекуперативного торможения достигается при скоростях по ходу вращения электродвигателя, превышающих его скорость идеального холостого хода: $\omega > \omega_0$. В этом случае энергия торможения поступает (рекуперирована) в электрическую сеть в виде потока электрической энергии обратного направления. Для ДПТ последовательного возбуждения режим рекуперативного торможения невозможен, так как у него отсутствует скорость идеального холостого хода.

Режим торможения противовключением имеет место при вращении электродвигателя против направления действия его момента. Такой режим может быть достигнут либо реверсированием электродвигателя на ходу, либо введением внешних силовых резисторов в цепь якоря.

Режим динамического торможения осуществляется переключением цепей вращающегося электродвигателя на режим автономного генератора с нагрузкой, например в виде балластного силового резистора.

В последних двух режимах энергия торможения поглощается электродвигателем и силовыми резисторами, вызывая их нагрев.

В частности, цикл реверса содержит режимы торможения противовключением и двигательный.

В качестве примера на рисунке 3.8.1 приведены механические характеристики в двигательном и тормозных режимах для прямого и обратного направлений вращения.

Токи и моменты двигателя при торможении могут ограничиваться резисторами, которые ступенчато выводятся по мере снижения скорости. В зависимости от характеристики, на которую реагирует схема управления при выведении резисторов различают торможение в функции ЭДС, скорости, тока, времени.

Использование электрических способов торможения электродвигателей повышает производительность установок с ЭП, улучшает качество управления ими.

3.7.2 Программа работы

1. Торможение противовключением.

Соберите схему в соответствии с рисунками 3.8.2, 3.8.3.

Включить ШИП возбуждения и задать ток возбуждения равным 0.18 А.

Включить тумблер SA1.

Нажать кнопку SB2.

Включить ШИП якоря и разогнать двигатель, увеличивая задание резистором R2.

Нажать кнопку SB1. Обратите внимание на изменение тока двигателя. Измерьте максимальное значение тока и сравните его с номинальным током двигателя. Измерения проведите 4 раза, вычислите среднее значение тока.

После остановки двигателя отключить ШИПы якоря и возбуждения.

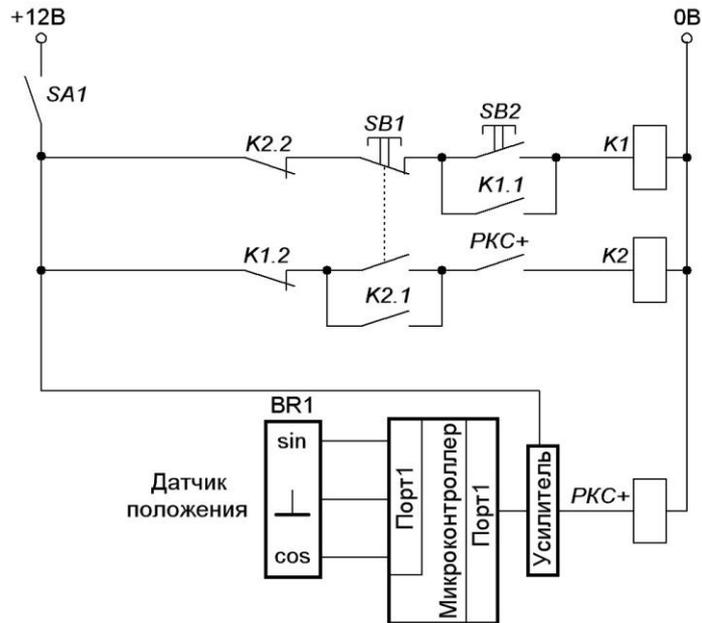


Рисунок 3.8.2 – Релейно-контактная схема управления торможением противовключением ДПТ

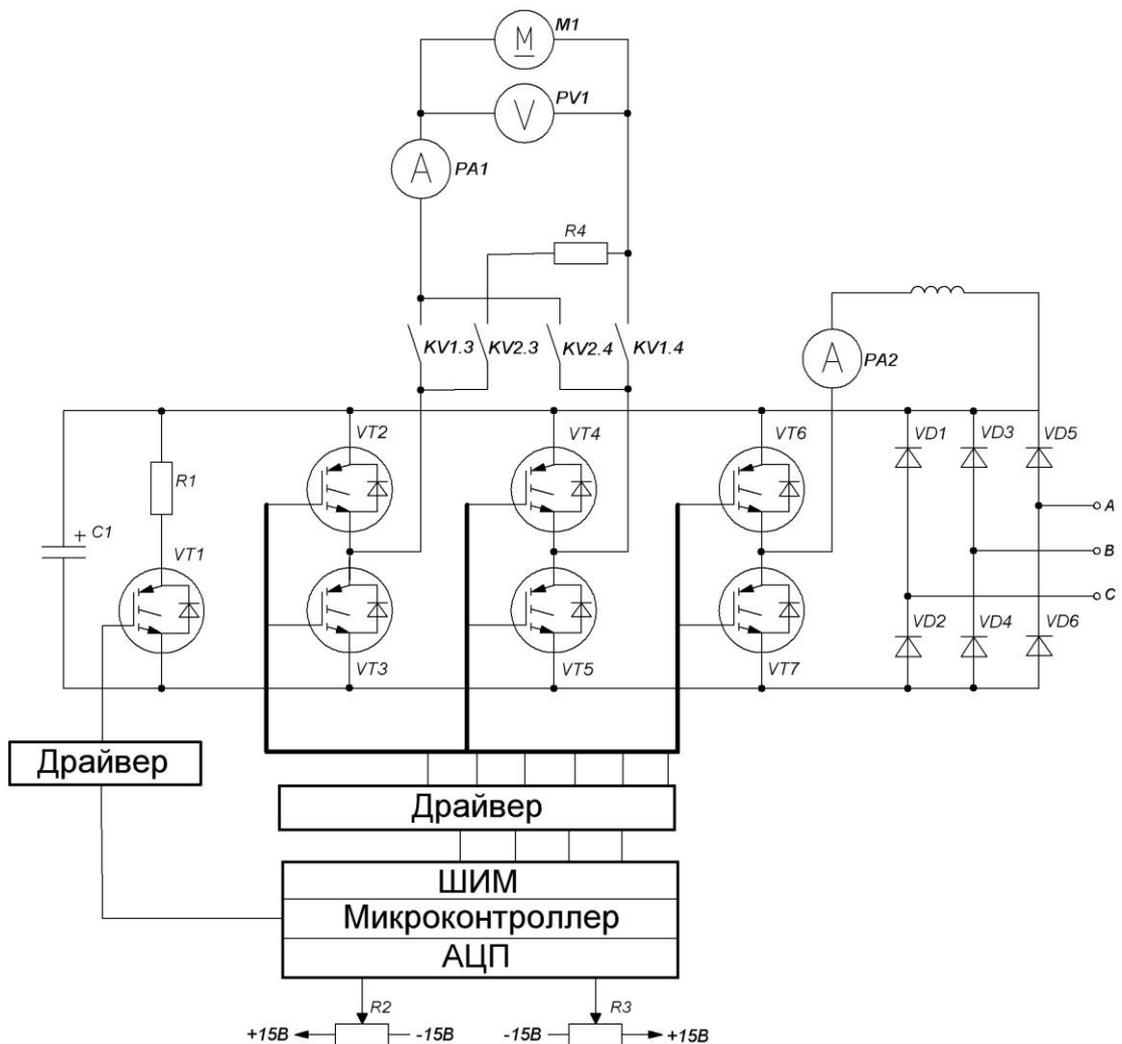


Рисунок 3.8.3 - Подключение ДПТ к широтно-импульсному преобразователю для исследования торможения противовключением.

2. Динамическое торможение.

Собрать схему в соответствии с рисунками 3.8.4, 3.8.5.

С помощью панели управления РКУ выбрать: rcu(ПКУ)-Strt(Start-старт).
На правом индикаторе выбрать вид пуска: Cug(Ток) / Edc(ЭДС) / Spd(скорость) / SEC(время).

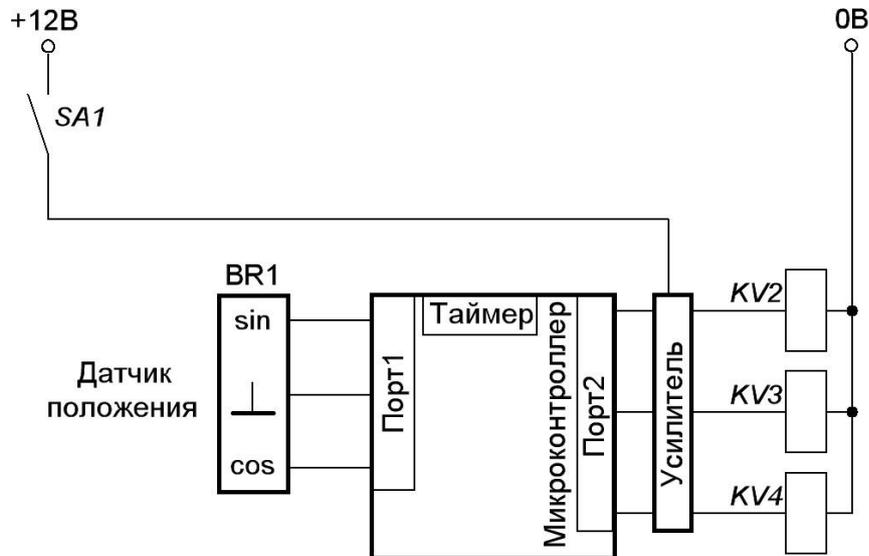


Рисунок 3.8.4 – Релейно-контактная схема управления динамическим торможением ДПТ.

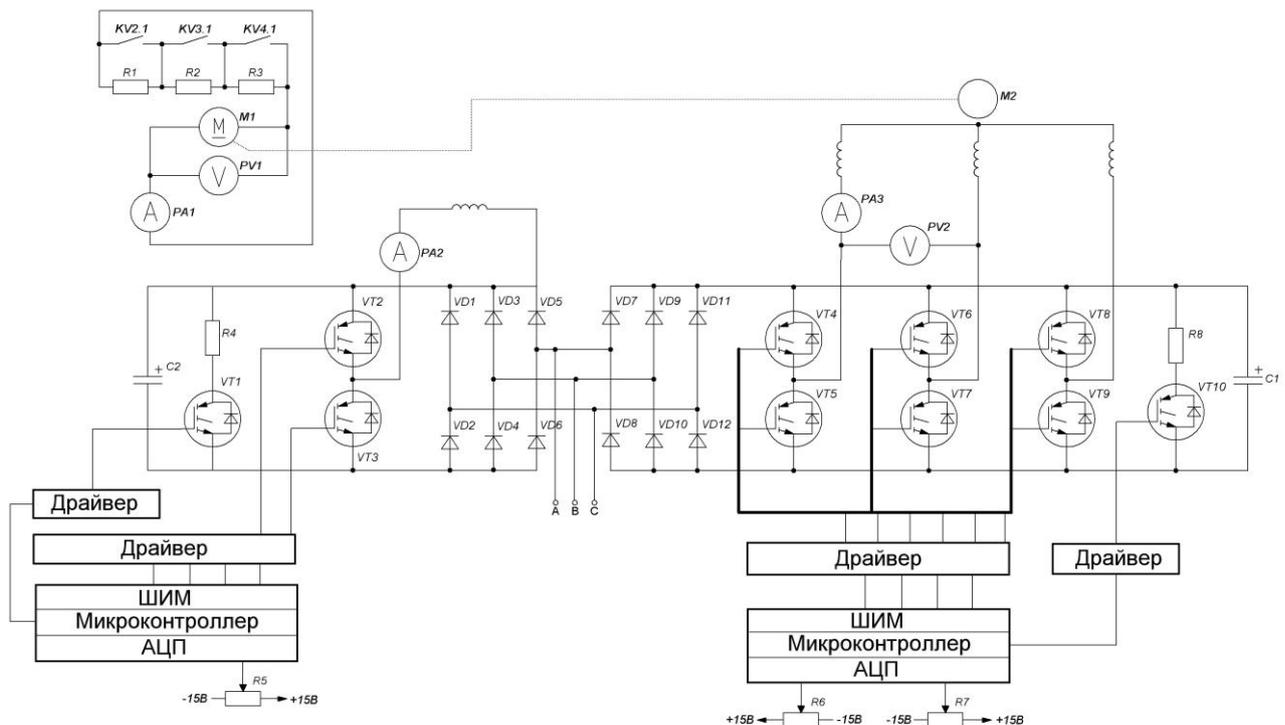


Рисунок 3.8.5 – Схема лабораторной установки для исследования динамического торможения ДПТ

На трех левых индикаторах задать значения срабатывания реле K2..K4 (при пуске в функции тока - одно значение на левом индикаторе).

Задать режим работы инвертора « $U/f=const$ », задать частоту равной 50Гц.

Включить тумблер SA1.

Включить ШИП возбуждения и задать ток возбуждения равным 0.18 А.

Выключить ШИП возбуждения, при этом не изменять положение ручки задания.

Включить инвертор, нажав кнопку «Назад».

После разгона двигателей необходимо быстро выполнить следующую последовательность действий:

Нажать кнопку "Стоп", для отключения инвертора. Начинается свободный выбег.

Нажать кнопку SB73 для запуска РКУ.

Включить ШИП возбуждения ДПТ. Начинается динамическое торможение.

Наблюдайте изменение тока двигателя.

После остановки двигателя отключить ШИП возбуждение ДПТ, отключить пускатель K5 кнопкой SB73.

Проведите опыты для динамического торможения в функции тока, скорости, времени.

3.8.3 Контрольные вопросы

1. Перечислите тормозные режимы электродвигателей.
2. Какие особенности применения различных тормозных режимов?
3. Для чего необходимо использовать реле контроля скорости при торможении противовключением?
4. Какова механическая характеристика двигателя постоянного тока в режиме динамического торможения?
5. До какой скорости можно снизить скорость вращения при рекуперативном торможении?
6. Какой из тормозных режимов является наиболее экономичным? Наиболее эффективным?

3.9 Лабораторная работа №9. Исследование замкнутых систем управления.

Цель работы: Изучить принципы построения и функционирования замкнутых схем управления электроприводом.

3.9.1 Теоретические сведения

Разомкнутые системы регулирования скорости вращения нашли применение лишь в относительно дешевых электроприводах, не требующих высокой точности регулирования. Учитывая высокую стоимость комплектных тиристорных электроприводов с высокомоментными двигателями в них целесообразно производить регулирование скорости исключительно в замкнутых системах автоматического регулирования для создания высокоточных электроприводов.

Наибольшее применение в комплектных электроприводах нашел принцип подчиненного управления. Электроприводы с системой управления, построенной по подчиненному принципу, имеют, как правило, два контура регулирования: контур тока и контур скорости.

Структурная схема такого электропривода представлена на рисунке 3.9.1. Подчиненное регулирование основано на том, что внешний контур вырабатывает сигнал задания для внутреннего контура. Внутренний контур является звеном внешнего контура и его параметры учитываются при оптимизации последнего.

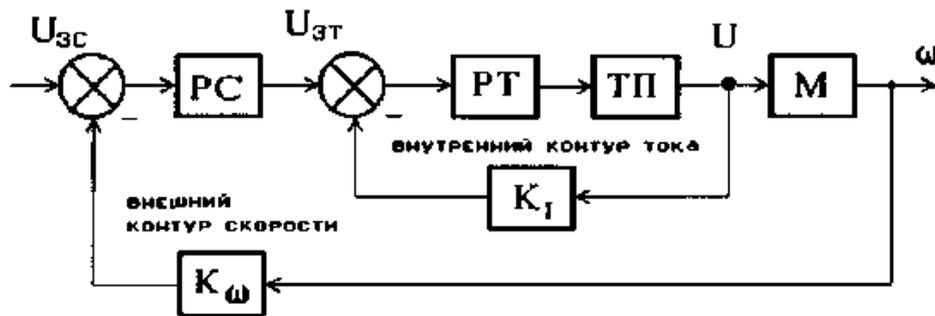


Рисунок 3.9.1 - Структурная схема электропривода с двухконтурным подчиненным регулированием скорости.

PC – регулятор скорости; PT – регулятор тока;
 TP – тиристорный преобразователь; M – ДПТ;
 K_i – коэффициент передачи датчика тока;
 K_ω – коэффициент передачи датчика скорости.

Оба контура регулирования постоянного тока находятся во взаимодействии и переключения отсутствуют. Применение простых регуляторов возможно только в случае, если регулируемый объект может быть разделен на отдельные блоки и каждый контур может содержать лишь одну постоянную времени, которая должна быть скомпенсирована при коррекции контуров.

В качестве регуляторов могут использоваться пропорциональные (П), пропорционально-интегральные (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы. Необходимо отметить, что выходное напряжение ПИ-регулятора перестанет изменяться и будет сохранять постоянное значение лишь в случае, когда входной сигнал регулятора становится равным нулю, т.е. при помощи ПИ-регулятора достигается принцип астатизма, при котором сигнал управления изменяется до тех пор, пока в системе имеется рассогласование. Устойчивой работы привода можно достичь и при пропорциональном регуляторе скорости. Однако при этом в контуре появляется статическая ошибка, то есть в установившемся состоянии скорость двигателя будет отличаться от заданного значения. Особенно это отличие будет проявляться при нагруженном двигателе.

В системе подчиненного регулирования появляется возможность отдельного регулирования переменных - тока и скорости - и их последовательной настройки, начиная с первого внутреннего контура.

Это в значительной степени упрощает расчет таких систем и техническую настройку электроприводов после установки их на рабочих механизмах.

Задающим сигналом для второго внешнего контура является сигнал задания угловой скорости $U_{зс}$, а для первого - сигнал с выхода регулятора скорости РС - $U_{зт}$.

Настройку каждого контура производят так, чтобы получить технически оптимальный переходной процесс.

На рисунке 3.9.2 приведен пример технически оптимального переходного процесса. Настройка на технический оптимум осуществляется так, чтобы время выхода на установившийся режим t_1 было минимальным при условии, что перерегулирование не будет превышать 4...10%.

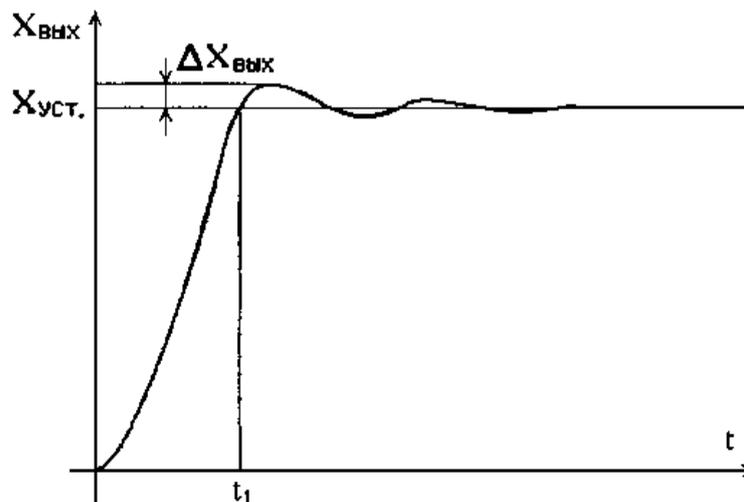


Рисунок 3.9.2 - Технически оптимальный переходной процесс при $\Delta X_{\text{ВЫХ}} < 4...10\%$, где $X_{\text{ВЫХ}}$ - выходной сигнал контура управления.

В результате реализации системы подчиненного регулирования ДПТ утрачивает свои естественные свойства. Процесс пуска протекает в системе следующим образом. Контур регулирования тока первоначально вынуждает ток ДПТ следовать задающему сигналу, угловая скорость же вращения ДПТ ω устанавливается в соответствии с нагрузкой. Внешний контур осуществляет регулирование ω согласно заданному значению и, исходя из ошибки регулирования $\Delta\omega$, вырабатывает сигнал задания тока $U_{зт}$, в соответствии с которым устанавливается ток ДПТ.

Ограничение заданного тока приводит к ограничению тока двигателя. Если заданная ω изменяется скачком на значительную величину, то возникает такая ошибка регулирования, что вступает в действие ограничение задания тока. ДПТ разгоняется при одновременном ограничении тока, пока ошибка регулирования ω не уменьшится настолько, что значение тока станет меньше предельно допустимого значения. В связи с этим становится возможным прямой пуск ДПТ без проявлений недопустимых перегрузок привода. Однако при работе токоограничения фактически размыкается контур регулирования скорости и разгон (торможение) идет с постоянным ускорением, что затягивает переходные процессы.

3.9.2 Программа работы

1. В качестве силовой части замкнутой системы управления выступает ШИП. Соберите схему в соответствии с рисунком 3.9.3.

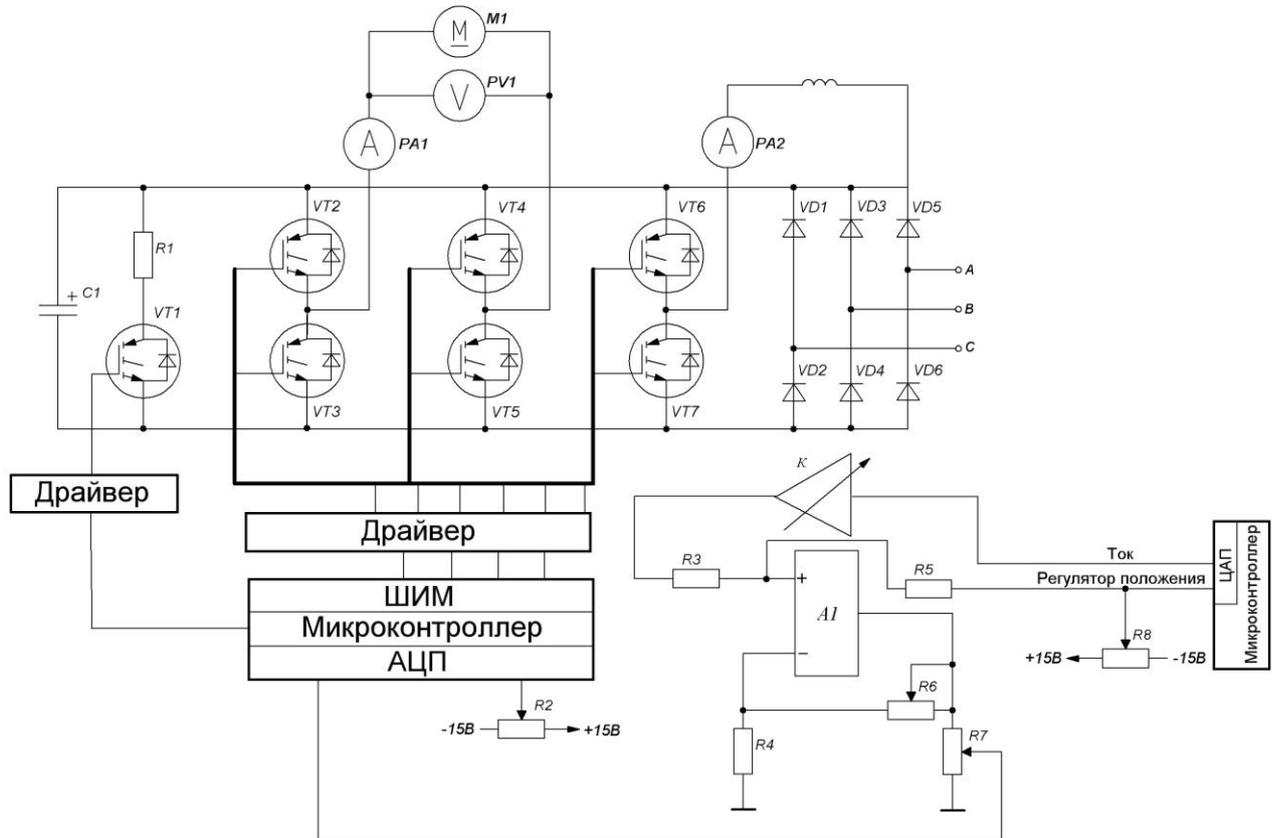


Рисунок 3.9.3 – Замкнутая система с П-регулятором тока

Задать симметричный режим работы ШИП.

Подключите двигатель к ШИП.

2. Регулятор тока ДПТ

Собрать схему в соответствии с рисунком 43. Вывести резистор R6 в крайнее левое положение. При этом скважность якоря должна быть около 50%.

Задать с помощью резистора R8 напряжение задания равное нулю (измерить вольтметром).

2.1 Исследование с системы с П-регулятором тока

Включить ШИП. Плавно вывести резистор R8 в правое положение. Задать выбранное значение тока.

В качестве возмущения для контура тока используется противоЭДС двигателя. Для этого включить возбуждение двигателя и задать ток возбуждения равным 0.18 А. Двигатель должен начать разгоняться, поддерживая заданное значение тока с заданным коэффициентом статической ошибки.

Не допуская разгона двигателя выше номинальной скорости уменьшить задание тока.

Исследовать характеристику замкнутой системы с различными параметрами регулятора:

- коэффициент усиления регулятора;
- коэффициент усиления обратной связи по току;
- уровень насыщения регулятора (резистор R6).

2.2 Исследование системы с ПИ-регулятором тока

Изменить схему в соответствии с рисунком 3.9.4. Для этого убрать переключку, шунтирующую конденсатор в регуляторе тока.

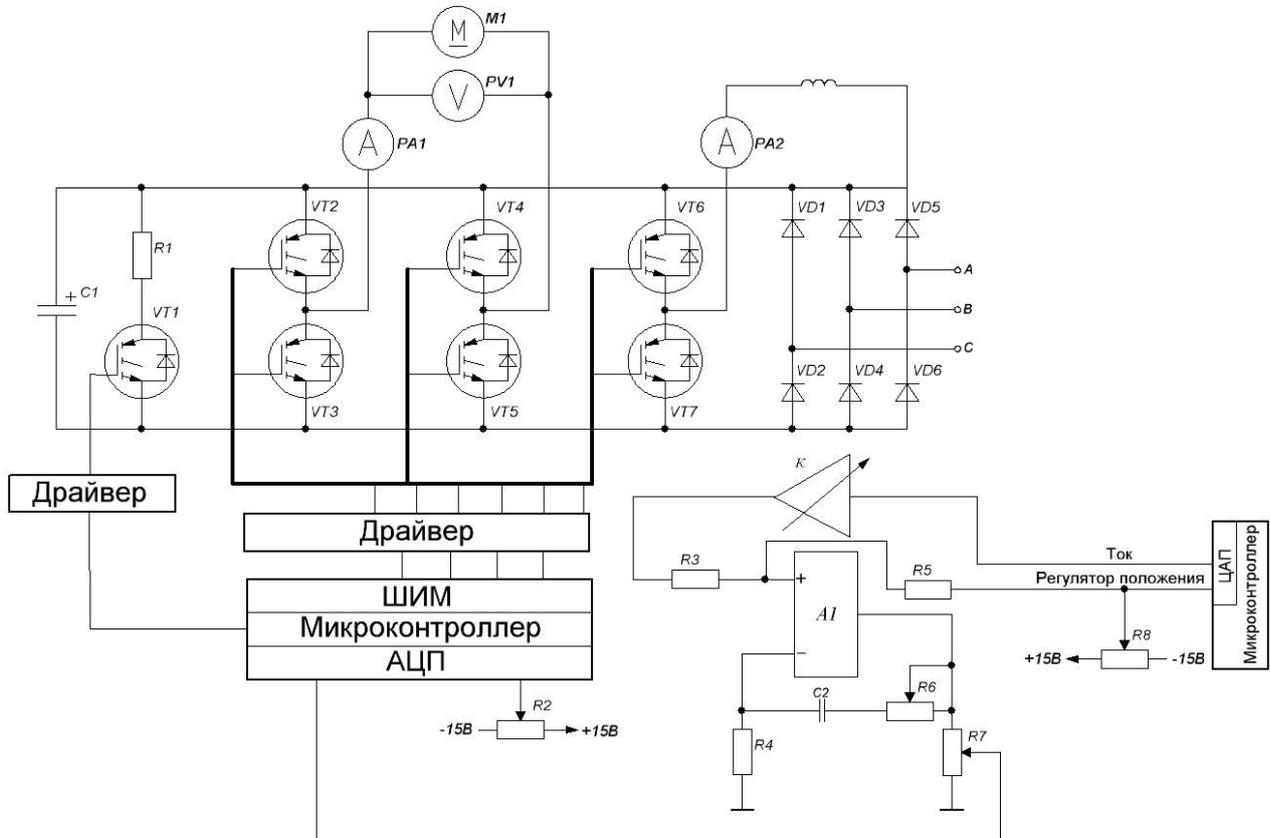


Рисунок 3.9.4 – Замкнутая система с ПИ-регулятором тока

Исследование ПИ-регулятора тока производится аналогично П-регулятору. Главное отличие заключается во включении системы: на входе регулятора всегда присутствует какое-то напряжение. Это напряжение интегрируется интегральной составляющей, и на выходе регулятора в начальный момент времени присутствует максимальное (положительное или отрицательное) напряжение. Поэтому перед подключением регулятора необходимо вывести резистор R6 (уровень насыщения регулятора) в крайнее левое положение. После включения ШИП якоря необходимо плавно вывести резистор в крайнее правое положение.

3. Регулятор скорости

Соберите схему в соответствии с рисунком 3.9.5.

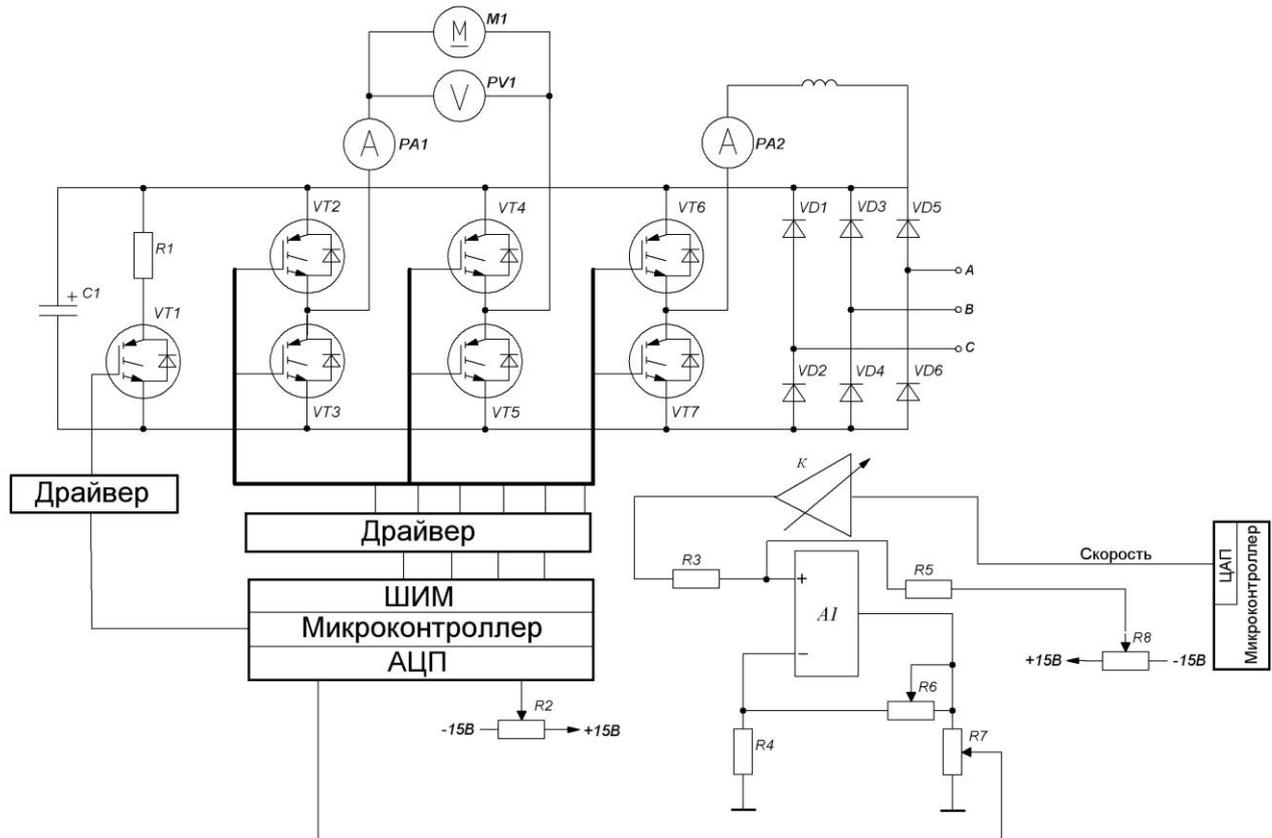


Рисунок 3.9.5 – Замкнутая система с ПИ-регулятором скорости

Проведите исследование схемы аналогично пункту 2.1.

С помощью регулятора скорости можно организовать одноконтурную или двухконтурную системы стабилизации скорости.

3.1 Двухконтурная система стабилизации скорости

Соберите схему в соответствии с рисунком 3.9.6.

Исследовать механическую характеристику системы при различных параметрах регуляторов:

- коэффициент усиления регулятора скорости;
- уровень ограничения регулятора скорости, осуществляющего ограничение тока в динамических режимах;
- коэффициент усиления обратной связи по скорости;
- коэффициент и тип регулятора тока.

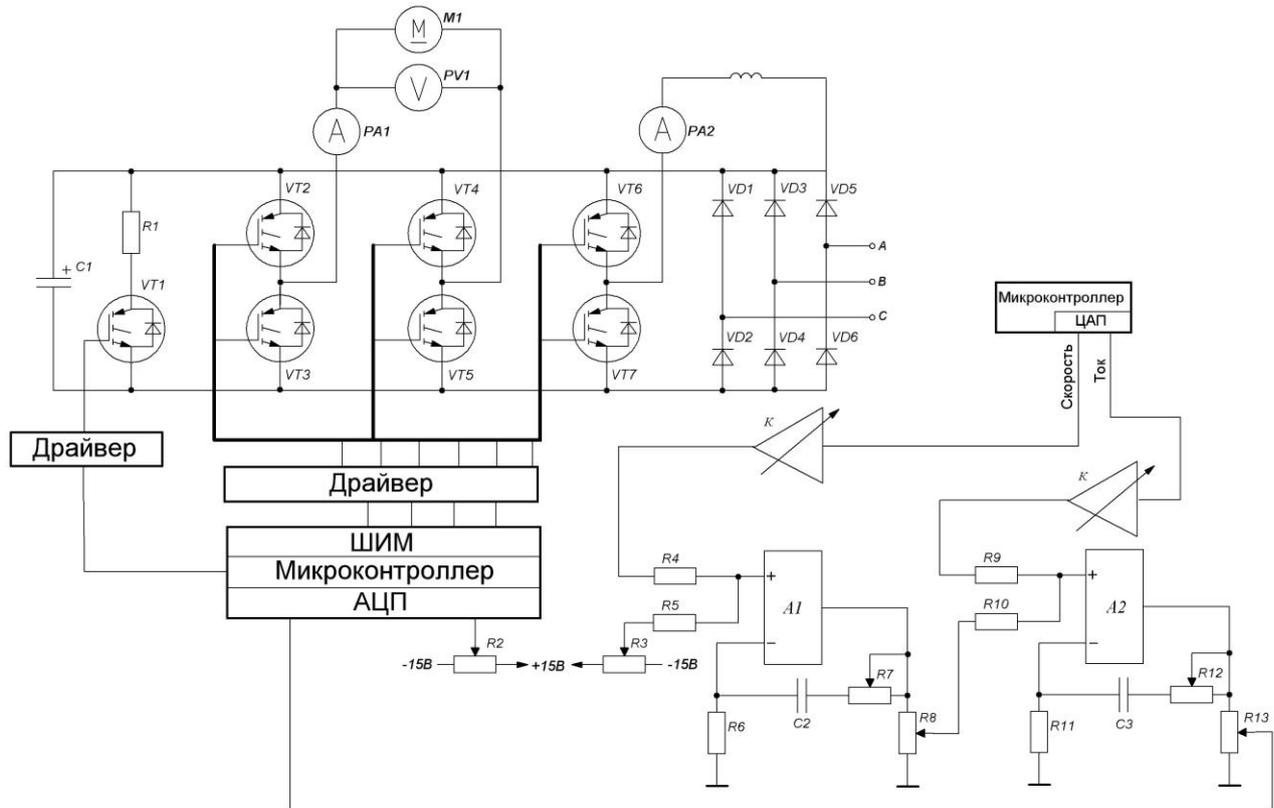


Рисунок 3.9.6 – Двухконтурная замкнутая система с ПИ-регуляторами скорости и тока

В качестве возмущения (нагрузки) для системы стабилизации скорости ДПТ выступает асинхронный двигатель. Он может работать как в режиме рекуперативного торможения, так и в режиме динамического торможения (смотри лабораторную работу №5).

3.9.3 Контрольные вопросы

1. Как изменяется механическая характеристика двигателя в замкнутой системе регулирования тока?
2. Как изменяется механическая характеристика двигателя в замкнутой системе регулирования скорости?
3. Изменяется ли жесткость характеристики двигателя при включении в замкнутую систему регулирования тока? Скорости?
4. Почему при использовании ПИ регулятора статическая погрешность равна 0?
5. Как влияют параметры регулятора на характеристики регулятора?

3.10. Лабораторная работа №10. Исследование механических характеристик двигателя постоянного тока.

Цель работы: Приобретение практических навыков исследования электроприводов постоянного тока, исследование рабочих и механической характеристик двигателей постоянного тока.

Программа работы:

1. Собрать схему в соответствии с рисунками 46, 47, 48, 49, а также в соответствии с рисунком 50.

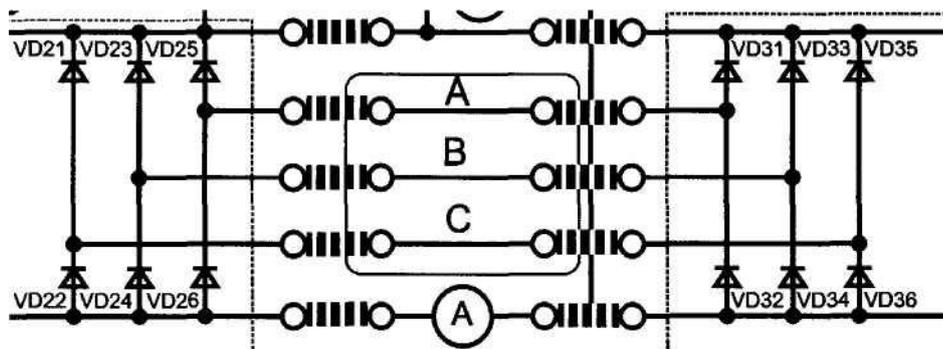


Рисунок 46. Подключение напряжения к преобразователям с организацией общей сети постоянного тока

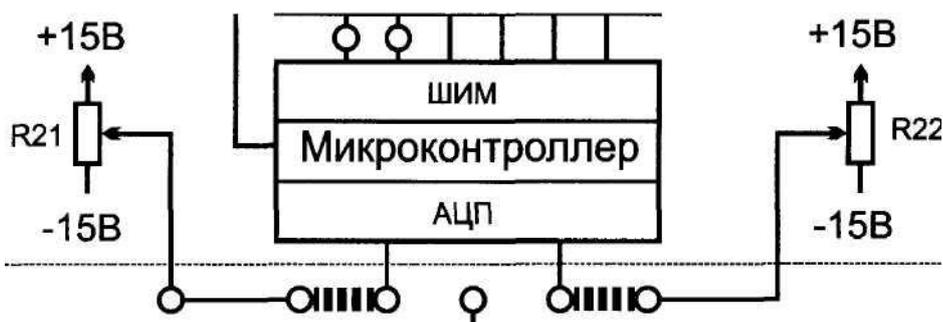


Рисунок 47. Подключение задания для ШИП.

Включить ШИП возбуждения и задать резистором R22 ток возбуждения, равный 0.18А.

Включить тумблер SA70. Включить пускатель K5 с помощью кнопки SB74.

Задать скважность якоря равную 50%. Задать режим работы ШИП якоря "Симметричный".

Разогнать двигатель постоянного тока до скорости 200 рад/с. Выключить ШИП якоря. Положение резистора R21 не изменять.

Тумблером SA71 включить схему соединений обмоток статора «треугольник». Задать режим работы инвертора: " $U/f=const$ ". Задать частоту инвертора равную нулю. Включить инвертор кнопкой SB70 «Вперед». Плавно разогнать асинхронный двигатель до скорости 200 рад/с.

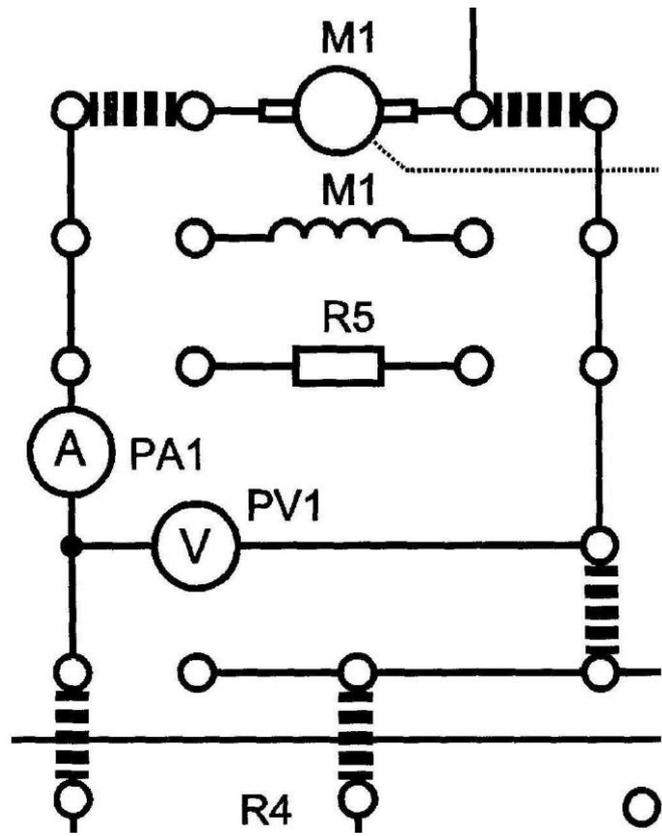


Рисунок 48. Подключение якоря ДПТ к ШИП.

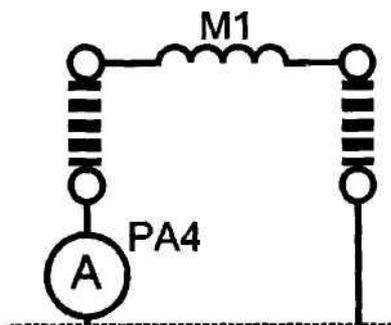


Рисунок 49. Подключение обмотки возбуждения.

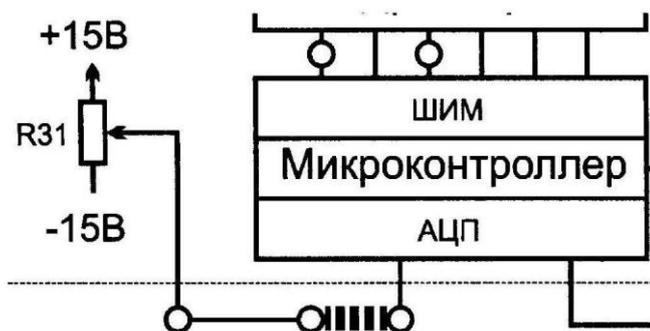


Рисунок 50. Подключение задания к инвертору.

1. Естественная характеристика.
Включить ШИП якоря.

Резистором R31 подстроить частоту инвертора так, чтобы ток якоря стал равным нулю.

1.1 Двигательный режим

Уменьшая частоту инвертора резистором R31, снять часть механической характеристики двигателя постоянного тока в первом квадранте. Измеряйте показания тока, напряжения и скорости вращения двигателей. Измеренные данные занесите в таблицу 11.

Таблица 11

Механическая характеристика двигателя постоянного тока
в двигательном режиме

ω , с ⁻¹					
$U_{\text{ДПТ}}$, В					
$I_{\text{ДПТ}}$, А					
f , Гц					
$U_{\text{АД}}$, В					
$I_{\text{АД}}$, А					
M , Н·м					

Рассчитайте значение момента, внесите в таблицу.

В этом режиме асинхронный двигатель переходит в генераторный режим, и его энергия через инвертор и звено постоянного тока передается широтно-импульсному преобразователю. Об этом сигнализирует амперметр РА2. Если вместо схемы, представленной на рисунке 12, собрать схемы 4.2 и 5.2, то энергия будет сбрасываться на тормозном (сбросовом) резисторе R33.

После снятия характеристики увеличить частоту инвертора так, чтобы ток якоря стал равным нулю.

1.2 Генераторный режим

Увеличивая частоту инвертора резистором R31, снять часть механической характеристики двигателя постоянного тока во втором квадранте.

Измеряйте показания тока, напряжения и скорости вращения двигателей. Измеренные данные занесите в таблицу 12.

Таблица 12

Механическая характеристика двигателя постоянного тока в двигательном
Режиме

ω , с ⁻¹					
$U_{\text{ДПТ}}$, В					
$I_{\text{ДПТ}}$, А					
f , Гц					
$U_{\text{АД}}$, В					
$I_{\text{АД}}$, А					
M , Н·м					

Рассчитайте значение момента, внесите в таблицу.

В этом режиме ДПТ переходит в генераторный режим, и его энергия через ШИП и звено постоянного тока передается инвертору. Об этом сигнализирует амперметр РА2. Если вместо схемы, представленной на рисунке 12, собрать схемы 4.2 и 5.2, то энергия будет сбрасываться на тормозном (сбросовом) резисторе R23.

После снятия характеристики уменьшить частоту инвертора так, чтобы ток якоря стал равным нулю.

Выключить инвертор кнопкой SB72 «Стоп». Выключить ШИП якоря. Выключить ШИП возбуждения. Выключить пускатель K5 кнопкой SB73.

По измеренным данным постройте механическую характеристику двигателя постоянного тока.

2. Торможение противовключением.

Дополнительно собрать схему в соответствии с рисунком 51.

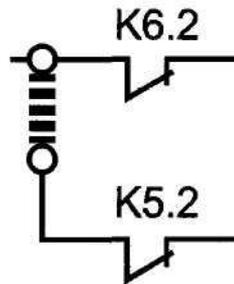


Рисунок 51. Релейная схема торможения противовключением ДПТ.

Включить ШИП возбуждения и задать резистором R22 ток возбуждения, равный 0.18А. Задать скважность якоря равную 80%. Задать режим работы ШИП якоря "Симметричный". Включить тумблер SA70.

Тумблером SA71 включить схему соединений обмоток статора «треугольник».

Задать режим работы инвертора: " $U/f=const$ ". Задать частоту инвертора равную нулю.

Включить инвертор кнопкой SB70 «Вперед». Разогнать асинхронный двигатель до скорости 20 рад/с. Включить пускатель K6 с помощью кнопки SB73.

Увеличивая с помощью инвертора скорость двигателей, снять механическую характеристику двигателя постоянного тока при торможении противовключением. Измеряйте показания тока, напряжения и скорости вращения двигателей. Измеренные данные занесите в таблицу 13.

Таблица 13

Механическая характеристика двигателя постоянного тока
в двигательном режиме

$\omega, \text{с}^{-1}$					
$U_{\text{ДПТ}}, \text{В}$					
$I_{\text{ДПТ}}, \text{А}$					
$f, \text{Гц}$					
$U_{\text{АД}}, \text{В}$					
$I_{\text{АД}}, \text{А}$					
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$					

Рассчитайте значение момента, внесите в таблицу.

Выключить инвертор кнопкой SB72 «Стоп». Выключить ШИП якоря. Выключить ШИП возбуждения.

По данным таблиц 11, 12, 13 постройте механическую характеристику ДПТ.

3. Динамическое торможение.

Вместо схем рисунков 48, 50 собрать схему в соответствии с рисунком 52.

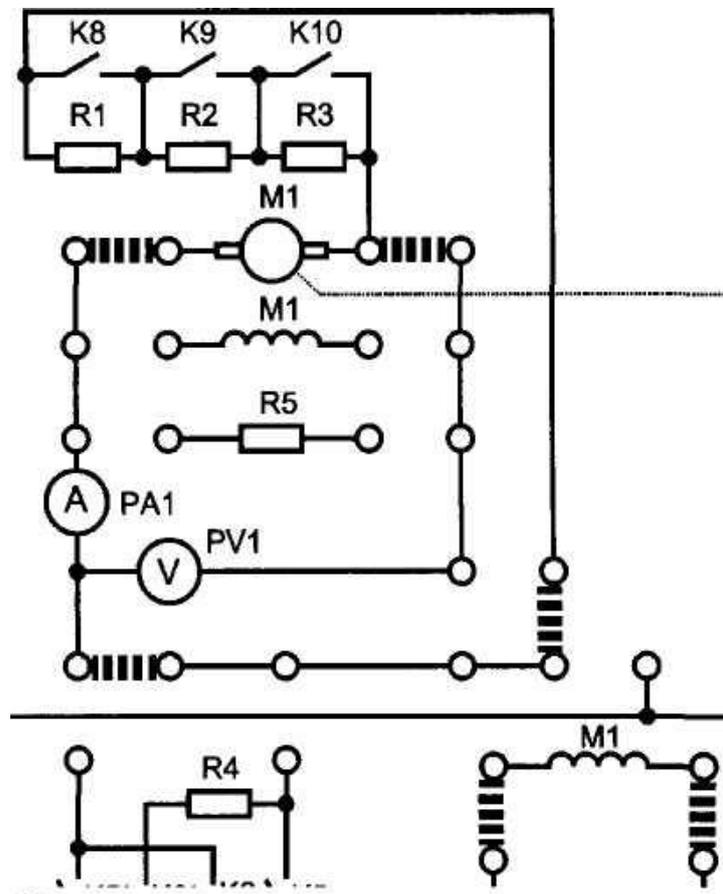


Рисунок 52. Динамическое торможение ДПТ.

Включить ШИП возбуждения и задать резистором R22 ток возбуждения, равный 0.18А.

Включить тумблер SA70.

Тумблером SA71 включить схему соединений обмоток статора «треугольник».

Задать режим работы инвертора: " $U/f=const$ ". Задать частоту инвертора равную нулю.

Включить инвертор кнопкой SB70 «Вперед».

С помощью инвертора (резистор R31) увеличивать скорость двигателей. Снять механическую характеристику при динамическом торможении двигателя постоянного тока. Измеренные данные занесите в таблицу 14.

Рассчитайте значение момента, внесите в таблицу.

Выключить инвертор кнопкой SB72 «Стоп». Выключить ШИП якоря. Выключить ШИП возбуждения. Выключить тумблер SA70.

Механическая характеристика двигателя постоянного тока в режиме динамического торможения

$\omega, \text{с}^{-1}$					
$U_{\text{ДПТ}}, \text{В}$					
$I_{\text{ДПТ}}, \text{А}$					
$f, \text{Гц}$					
$U_{\text{АД}}, \text{В}$					
$I_{\text{АД}}, \text{А}$					
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$					

По измеренным данным постройте механическую характеристику.

Контрольные вопросы:

1. Какой вид имеют механические характеристики двигателей постоянного тока параллельного и смешанного возбуждений?
2. Какие вы знаете режимы работы двигателя постоянного тока?
3. Какие вы знаете режимы торможения двигателей постоянного тока?
4. Все ли типы двигателей постоянного тока допускают рекуперативный режим торможения?
5. Сравните тормозные режимы по их эффективности и экономичности.
6. Объясните назначение элементов в схеме лабораторной установки.

3.11. Лабораторная работа №11. Исследование регулировочных характеристик двигателя постоянного тока

Цель работы: Приобретение практических навыков исследования электроприводов постоянного тока, исследование регулировочных характеристик двигателя постоянного тока.

Программа работы:

1. Собрать схемы 53, 54, 55, 56, 57.

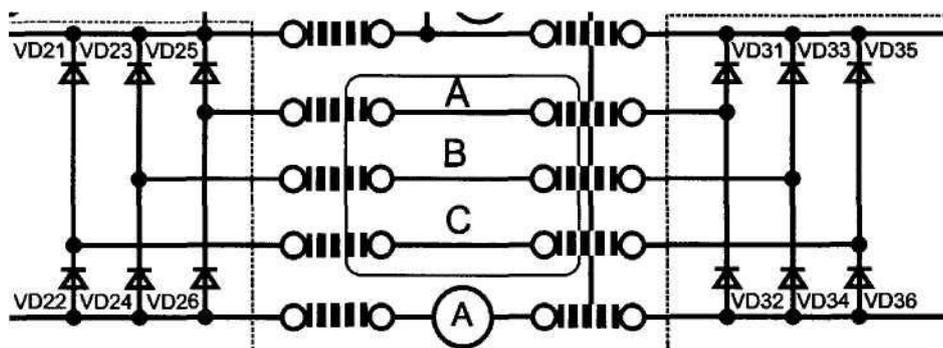


Рисунок 53. Подключение напряжения к преобразователям с организацией общей сети постоянного тока

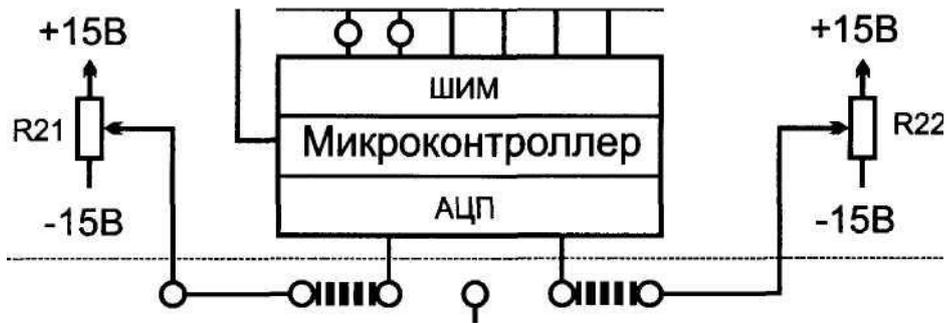


Рисунок 54. Подключение задания для ШИП

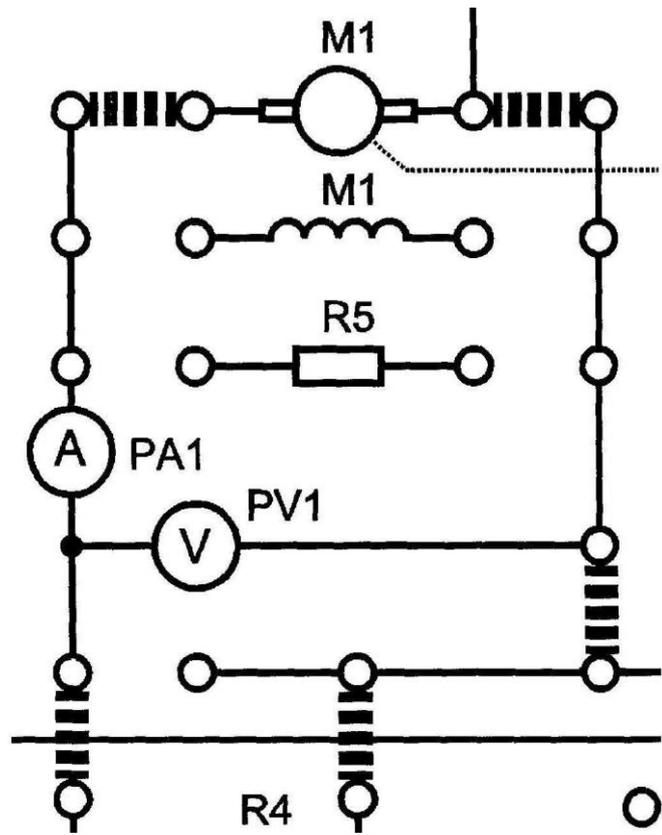


Рисунок 55. Подключение якоря ДПТ к ШИП

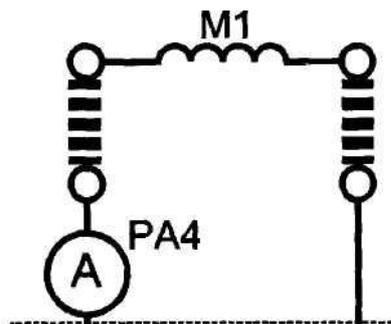


Рисунок 56. Подключение обмотки возбуждения

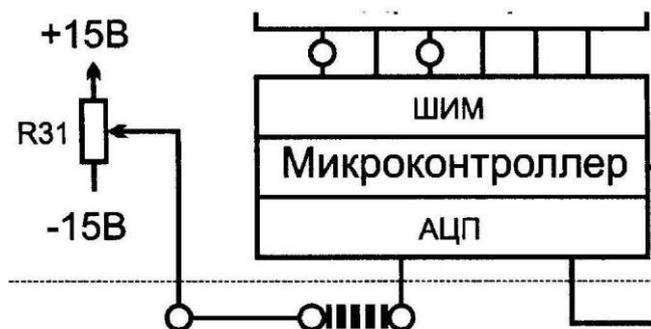


Рисунок 57. Подключение задания к инвертору

2. Изменение напряжения обмотки якоря

Включить ШИП возбуждения и задать резистором R22 ток возбуждения, равный 0.18А.

Включить тумблер SA70. Включить пускатель К5 с помощью кнопки SB74.

Задать скважность якоря равную 50%. Задать режим работы ШИП якоря "Симметричный".

Разогнать двигатель постоянного тока до скорости 50 рад/с. Выключить ШИП якоря. Положение резистора R21 не изменять.

Тумблером SA71 включить схему соединений обмоток статора «треугольник».

Задать режим работы инвертора: " $U/f=const$ ". Задать частоту инвертора равную нулю. Включить инвертор кнопкой SB70 «Вперед». Плавно разогнать асинхронный двигатель до скорости 50 рад/с.

Включить ШИП якоря.

Резистором R31 подстроить частоту инвертора так, чтобы ток якоря стал равным нулю.

Уменьшая частоту инвертора резистором R31, снять часть механической характеристики двигателя постоянного тока в первом квадранте. Измеряйте показания тока, напряжения и скорости вращения двигателей. Измеренные данные занесите в таблицу 15.

Таблица 15

Искусственная механическая характеристика двигателя постоянного тока

ω , с ⁻¹					
$U_{ДПТ}$, В					
$I_{ДПТ}$, А					
f , Гц					
$U_{АД}$, В					
$I_{АД}$, А					
M , Н·м					

Рассчитайте значение момента, внесите в таблицу.

Выполнить пункт 2 для скорости холостого хода равной: 100 рад/с, 150 рад/с.

По результатам измерений постройте искусственные механические характеристики двигателя.

3. Изменение напряжения обмотки возбуждения

Повторить пункт 2 для тока возбуждения ДПТ равного: 0,1 А, 0,15А, 0,2 А. В качестве скорости холостого хода использовать значение равное 150 рад/с.

Построить искусственные характеристики двигателя.

4. Реостатные характеристики

Измените схемы 55, 56 на схему изображенную на рисунке 58.

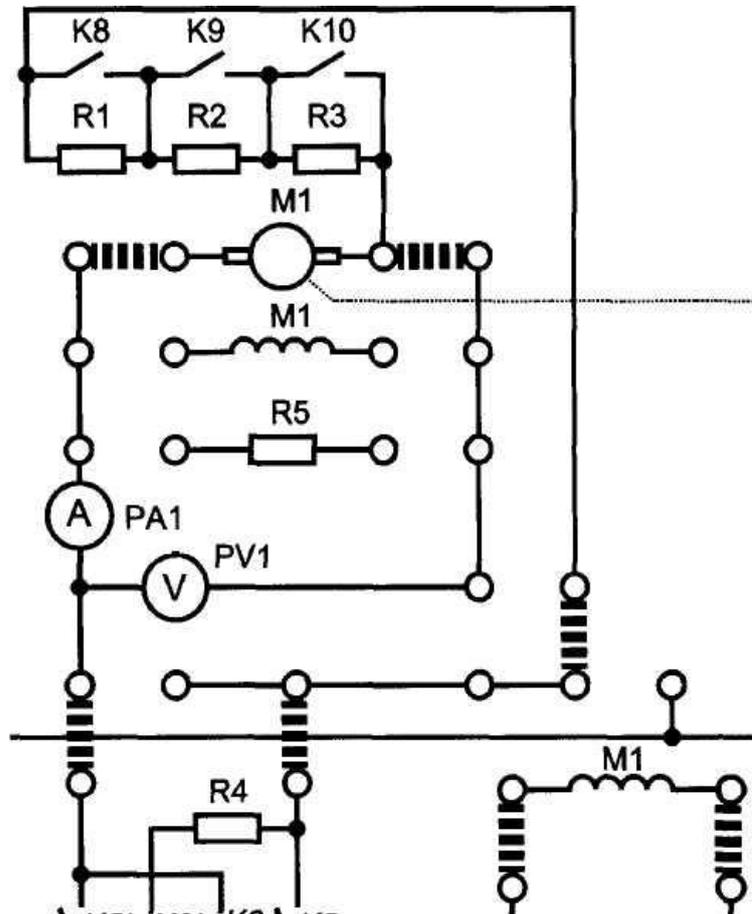


Рисунок 58. Исследование реостатного пуска ДПТ.

В качестве ступеней реостата выступают резисторы R1..R3

Для того чтобы включить пускатели K8..K10, которые шунтируют соответствующие пусковые резисторы нужно:

- с помощью панели РКУ выбрать меню rcu-Strt;
- задать режим SEC.
- для тех пускателей, которые нужно включить, задать время срабатывания 0 секунд;
- для тех пускателей, которые нужно оставить включенными задать время срабатывания больше 10 секунд.

Повторить пункт 2. После пуска двигателей на небольшую скорость, в обмотке якоря появляется ток. Включить РКУ кнопкой SB74 (при этом включится пускатель K5; его можно сразу выключить кнопкой SB73). После пуска

РКУ включаются те реле, значение срабатывание которых было установлено равным нулю. Об этом сигнализируют светодиоды. Эти реле выключатся при условии: «прошло 10 секунд» и «ток якоря равен нулю». На панели РКУ отображаются данные соответствующие реостатному пуску. По истечении 10 секунд выбрать режим Prib (для навигации по меню РКУ см. пункт 4.2.3)

Увеличивая скорость двигателей с помощью инвертора снять реостатную характеристику двигателя.

Выключить инвертор кнопкой SB72 «Стоп». Выключить ШИП якоря. Выключить ШИП возбуждения. Выключить тумблер SA70.

Повторить лабораторную работу при различных комбинациях пусковых реостатов.

По результатам измерений построить механические характеристики.

Контрольные вопросы:

1. Какие вы знаете способы регулирования скорости двигателей постоянного тока?
2. Как влияет изменение напряжения якорной цепи на жесткость механических характеристик?
3. Является ли экономичным реостатный способ регулирования скорости? Почему?
4. Какой из способов регулирования скорости позволяет увеличить скорость вращения?
5. В каких режимах работал асинхронный двигатель в лабораторной установке?

3.12. Лабораторная работа №12. Исследование механических характеристик асинхронного двигателя

Цель работы: Приобретение практических навыков исследования электроприводов переменного тока, исследование рабочих и механической характеристик асинхронных двигателей.

Программа работы:

1. Собрать схему в соответствии с рисунками 59, 60, 61, 62, 63.

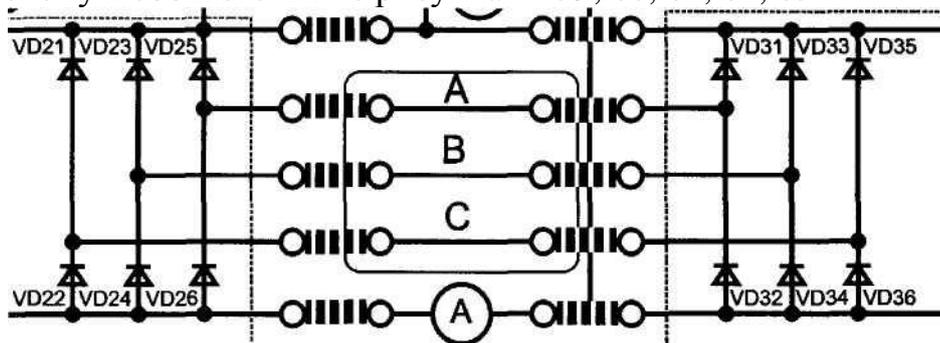


Рисунок 59. Подключение напряжения к преобразователям с организацией общей сети постоянного тока

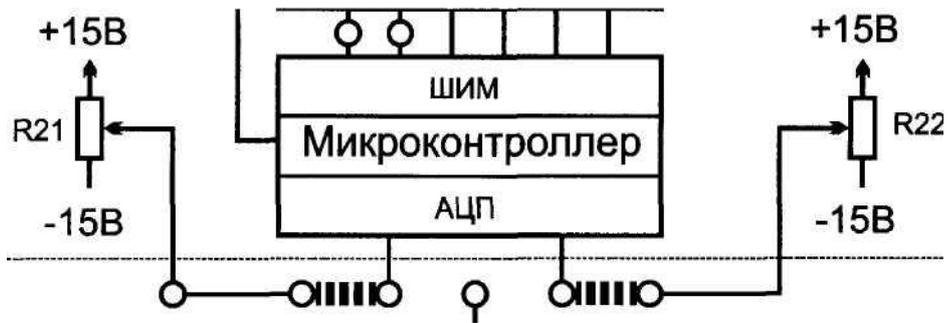


Рисунок 60. Подключение задания для ШИП

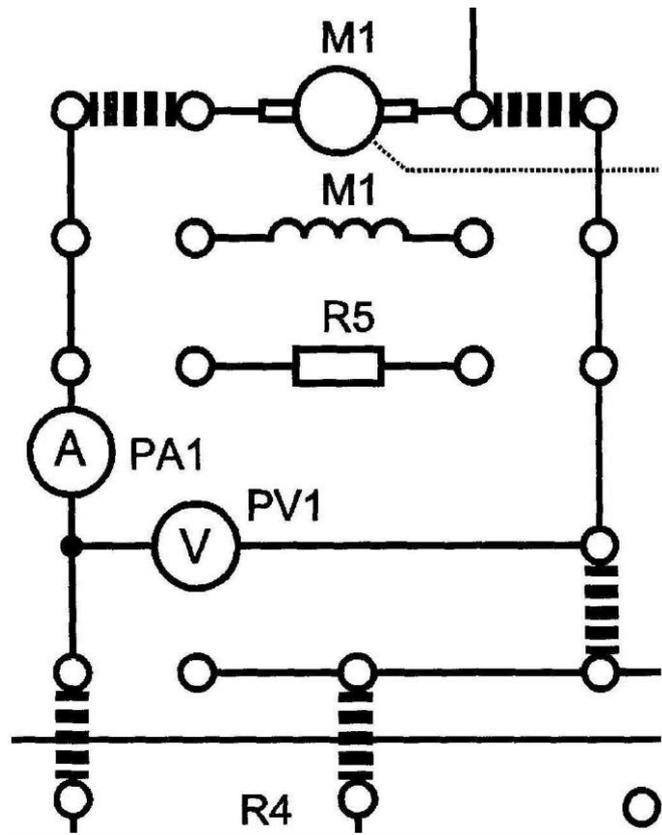


Рисунок 61. Подключение якоря ДПТ к ШИП

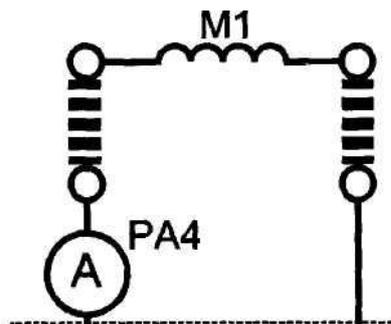


Рисунок 62. Подключение обмотки возбуждения

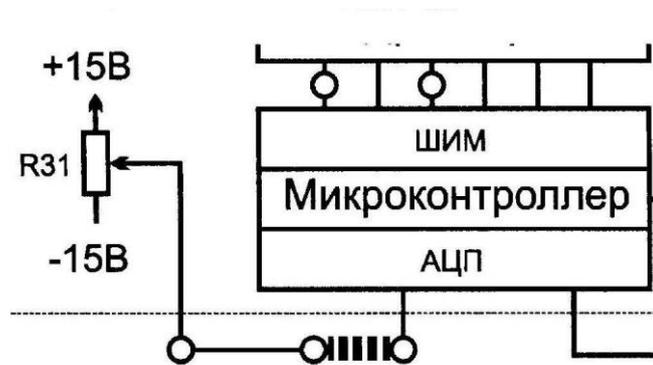


Рисунок 63. Подключение задания к инвертору

2. Естественная характеристика.

Включить ШИП возбуждения и задать резистором R22 ток возбуждения, равный 0.18А.

Включить тумблер SA70. Включить пускатель К5 с помощью кнопки SB74.

Задать скважность якоря равную 50%. Задать режим работы ШИП якоря "Симметричный".

Разогнать двигатель постоянного тока до скорости 200 рад/с. Выключить ШИП якоря. Положение резистора R21 не изменять.

Тумблером SA71 включить схему соединений обмоток статора «треугольник».

Задать режим работы инвертора: " $U/f=const$ ". Задать частоту инвертора равную нулю. Включить инвертор кнопкой SB70 «Вперед». Плавно разогнать асинхронный двигатель до скорости 200 рад/с. При этом обмотки статора асинхронного двигателя должны быть соединены в «звезду».

Изменяя с помощью ШИП якоря скорость двигателей, снять механическую характеристику асинхронного двигателя.

После снятия характеристики выключить инвертор кнопкой SB72 «Стоп». Выключить ШИП якоря. Выключить ШИП возбуждения. Выключить пускатель К5 кнопкой SB73.

Измеряйте показания тока, напряжения и скорости вращения двигателей. Измеренные данные занесите в таблицу 16.

Таблица 16

Механическая характеристика двигателя постоянного тока в двигательном режиме

$\omega, \text{с}^{-1}$					
$U_{\text{ДПТ}}, \text{В}$					
$I_{\text{ДПТ}}, \text{А}$					
$f, \text{Гц}$					
$U_{\text{АД}}, \text{В}$					
$I_{\text{АД}}, \text{А}$					
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$					

Рассчитайте значение момента, внесите в таблицу.

По измеренным данным постройте механическую характеристику двигателя постоянного тока.

3. Динамическое торможение

Дополнительно собрать схему в соответствии с рисунком 6.2.

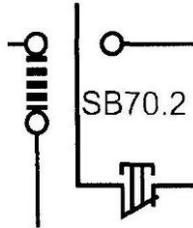


Рисунок 64. Релейная схема для динамического торможения

Включить ШИП возбуждения и задать резистором R22 ток возбуждения, равный 0.18А.

Задать скважность ШИП якоря равную 50%. Включить ШИП якоря.

Включить пускатель K5 кнопкой SB74.

С помощью ШИП якоря разогнать двигатели до скорости 20 рад/с.

Задать режим работы инвертора: "Независимое управление напряжением и частотой". Вывести резистор R32 «задание напряжения» в крайнее левое положение. Включить инвертор с помощью кнопки SB72 «Стоп». Инвертор перейдет в режим динамического торможения.

Напряжение динамического торможения регулируется с помощью резистора R32.

Изменяя с помощью ШИП якоря, скорость двигателей снять механическую характеристику асинхронного двигателя в режиме динамического торможения. Напряжение динамического торможения задается резистором R32 «задание напряжения».

Измеряйте показания тока, напряжения и скорости вращения двигателей. Измеренные данные занесите в таблицу 17.

Таблица 17

Механическая характеристика двигателя постоянного тока в двигательном режиме

$\omega, \text{с}^{-1}$					
$U_{\text{ДПТ}}, \text{В}$					
$I_{\text{ДПТ}}, \text{А}$					
$f, \text{Гц}$					
$U_{\text{АД}}, \text{В}$					
$I_{\text{АД}}, \text{А}$					
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$					

Рассчитайте значение момента, внесите в таблицу.

После снятия характеристики выключить ШИП якоря. Выключить ШИП возбуждения. Выключить пускатель K5 кнопкой SB73.

4. Торможение противовключением

Вместо схемы рисунок 6.2 собрать схему в соответствии с рисунком 6.1.

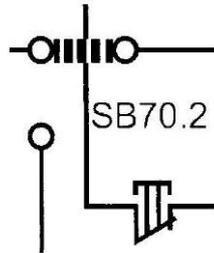


Рисунок 65. - Релейная схема торможения противовключением.

Как и в пункте 3 разогнать двигатели до скорости 20 рад/с.

Задать режим работы инвертора: " $U/f=const$ ". Задать частоту инвертора, равную 50 Гц.

Включить инвертор кнопкой SB72 «Стоп». Инвертор перейдет в режим торможения противовключением.

Изменяя с помощью ШИП якоря скорость двигателей снять механическую характеристику асинхронного двигателя в режиме динамического торможения.

После снятия характеристики выключить ШИП якоря. Выключить ШИП возбуждения. Выключить пускатель К5 кнопкой SB73.

Контрольные вопросы:

1. Что такое естественная механическая характеристика асинхронного двигателя?
2. Изобразить на одном графике естественную и искусственную с добавочным сопротивлением в цепи ротора механические характеристики АСД.
3. Как изменится вид механической характеристики АСД при замене его короткозамкнутого медного ротора на алюминиевый?
4. Перечислить режимы торможения, реализуемые в АСД?
5. Что такое динамический момент электропривода ?
6. Как рассчитать максимально допустимое снижение напряжения на зажимах двигателя?
7. Как определить коэффициент мощности электропривода?
8. Как оценить достоверность экспериментального определения КПД электропривода?
9. Может ли механическая характеристика асинхронного двигателя пересекать ось частоты вращения?

3.13. Лабораторная работа №13. Исследование регулировочных характеристик асинхронного двигателя

Цель работы: Приобретение практических навыков исследования электроприводов переменного тока, исследование искусственных характеристик асинхронных двигателей.

Программа работы:

1. Регулировочная характеристика при изменении частоты инвертора.
Собрать схему в соответствии с рисунками 66, 67, 68, 69, 70.

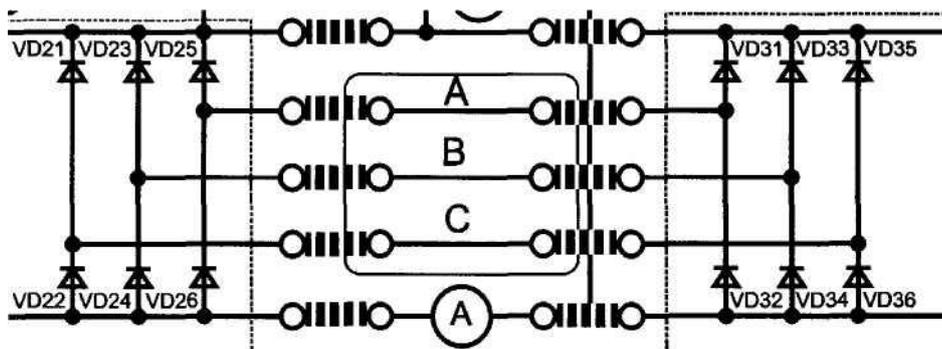


Рисунок 66. Подключение напряжения к преобразователям с организацией общей сети постоянного тока

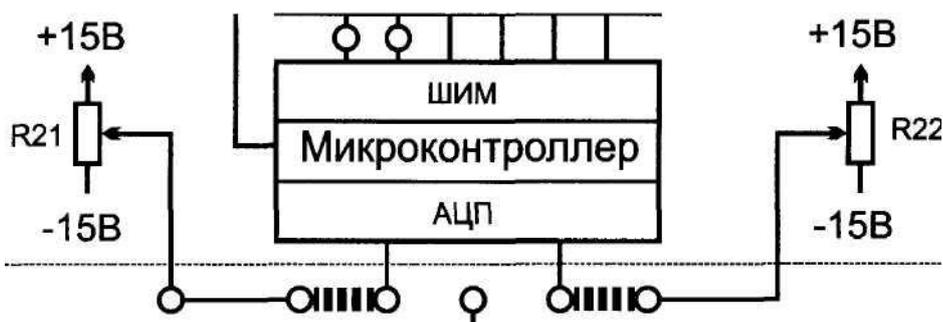


Рисунок 67. Подключение задания для ШИП

Включить ШИП возбуждения и задать резистором R22 ток возбуждения, равный 0.18А.

Включить тумблер SA70. Включить пускатель K5 с помощью кнопки SB74.

Задать скважность якоря равную 50%. Задать режим работы ШИП якоря "Симметричный".

Разогнать двигатель постоянного тока до скорости 200 рад/с. Выключить ШИП якоря. Положение резистора R21 не изменять.

Тумблером SA71 включить схему соединений обмоток статора «треугольник».

Включить режим работы инвертора «Независимое управление частотой и напряжением». При этом при разгоне асинхронного двигателя необходимо изменять частоту (резистор R31) и напряжение (резистор R32) инвертора.

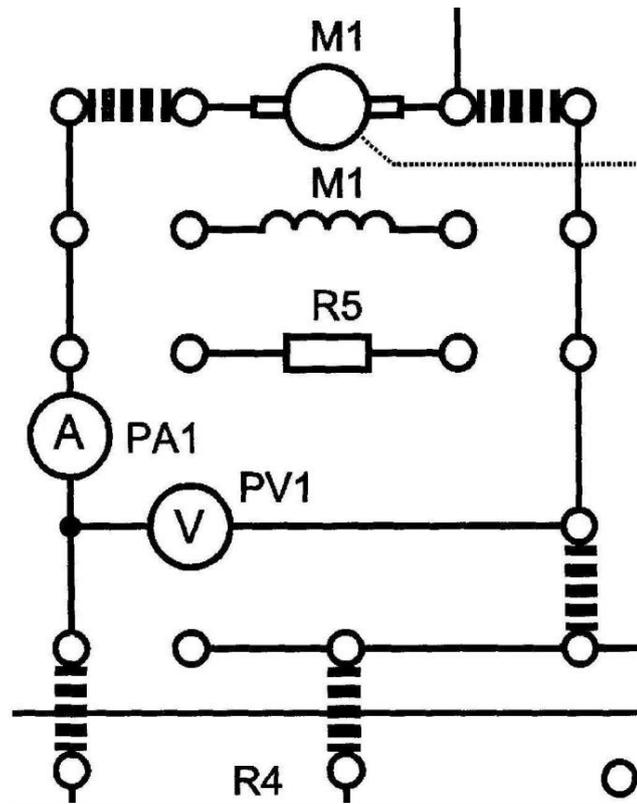


Рисунок 68. Подключение якоря ДПТ к ШИП

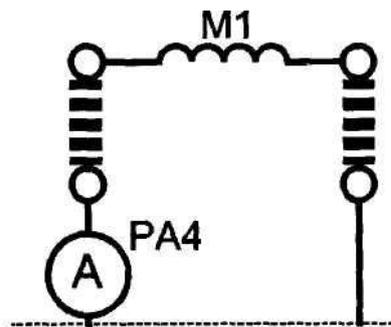


Рисунок 69. Подключение обмотки возбуждения



Рисунок 70. Подключение задания к инвертору

Задать частоту инвертора равную нулю. Включить инвертор кнопкой SB70 «Вперед». Плавно разогнать асинхронный двигатель до скорости 200 рад/с.

При этом обмотки статора асинхронного двигателя должны быть соединены в «звезду».

Изменяя с помощью ШИП якоря скорость двигателей, снять механическую характеристику асинхронного двигателя.

После снятия характеристики выключить инвертор кнопкой SB72 «Стоп». Выключить ШИП якоря. Выключить ШИП возбуждения. Выключить пускатель К5 кнопкой SB73.

Измеряйте показания тока, напряжения и скорости вращения двигателей. Измеренные данные занесите в таблицу 16.

Таблица 16

Механическая характеристика двигателя постоянного тока в двигательном режиме

$\omega, \text{с}^{-1}$					
$U_{\text{ДПТ}}, \text{В}$					
$I_{\text{ДПТ}}, \text{А}$					
$f, \text{Гц}$					
$U_{\text{АД}}, \text{В}$					
$I_{\text{АД}}, \text{А}$					
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$					

Рассчитайте значение момента, внесите в таблицу.

По измеренным данным постройте механическую характеристику двигателя постоянного тока.

Включить режим работы инвертора «Независимое управление частотой и напряжением». При этом при разгоне асинхронного двигателя необходимо изменять частоту (резистор R31) и напряжение (резистор R32) инвертора.

Повторить измерения для различных скоростей холостого хода (которая пропорциональна частоте инвертора).

2. Регулировочная характеристика при изменении напряжения инвертора.

Повторите измерения аналогично пункту 1 для различного напряжения на выходе инвертора.

Контрольные вопросы:

1. Что такое естественная механическая характеристика асинхронного двигателя? Искусственная характеристика?
2. Изобразить на одном графике естественную и искусственную характеристику при пониженной частоте питающего напряжения.
3. Каким образом влияет напряжение питания на вид механической характеристики асинхронного двигателя?
4. Почему асинхронный двигатель чувствителен к снижению питающего напряжения?
5. Какие вы знаете способы регулирования скорости двигателей переменного тока?
6. Сравните различные способы регулирования скорости по экономичности.

Литература

1. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1992.
2. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. СПб.: Энергоиздат Санкт-Петербургское отделение, 2000.
3. Кондратенков Н.И., Антони В.И., Ермолин М.Я. Электропривод сельскохозяйственных машин. Челябинск, 1999.
4. Практикум по электроприводу в сельском хозяйстве / П.И. Савченко, И.А. Гаврилюк, И.Н. Земляной, Н.В. Худобин. М.: Колос, 1996.
5. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981.
6. Шичков Л.П. Электрический привод – Основы электропривода: учебное пособие. М.: Изд-во РГАЗУ, 2003.
7. Шичков Л.П. Электропривод в сельском хозяйстве: учебное пособие. М.: Изд-во РГАЗУ, 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Назначение, характеристики, особенности работы стенда.....	3
2. Особенности работы стенда.....	5
3. Выполнение лабораторных работ.....	7
3.1. Лабораторная работа №1. Исследование трехфазного управляемого выпрямителя с микропроцессорной системой управления.....	7
3.2. Лабораторная работа №2. Исследование силовой части однофазного управляемого выпрямителя с аналоговой системой управления..	17
3.3. Лабораторная работа №3. Исследование аналоговой системы управления однофазного управляемого выпрямителя.....	20
3.4. Лабораторная работа №4. Исследование реверсивного широтно-импульсного преобразователя на IGBT-транзисторах.....	29
3.5. Лабораторная работа №5. Исследование трехфазного инвертора на IGBT-транзисторах.....	37
3.6. Лабораторная работа №6. Исследование релейных схем торможения асинхронного двигателя.....	41
3.7. Лабораторная работа №7. Исследование способов пуска асинхронного двигателя.....	45
3.8. Лабораторная работа №8. Исследование реостатного пуска двигателя постоянного тока.....	50
3.9. Лабораторная работа №9. Исследование способов торможения двигателя постоянного тока.....	54
3.10. Лабораторная работа №10. Исследование замкнутых систем управления.....	61
3.11. Лабораторная работа №11. Исследование регулировочных характеристик двигателя постоянного тока.....	66
3.12. Лабораторная работа №12. Исследование механических характеристик асинхронного двигателя.....	70
3.13. Лабораторная работа №13. Исследование регулировочных характеристик асинхронного двигателя.....	75
ЛИТЕРАТУРА.....	78

Учебное издание

Безик Валерий Александрович
Кубаткина Ольга Вячеславовна
Ковалев Виталий Витальевич

**Основы автоматизированного электропривода и
преобразовательной техники**

Методические указания по выполнению
лабораторных работ на стенде НТЦ 17
«Основы электропривода и преобразовательной техники»

Редактор Осипова Е.Н.

Подписано к печати 09.04.2018 г. Формат 60x84. 1/16.
Бумага офсетная. Усл. п. 4,65. Тираж 25 экз. Изд. № 5715.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ