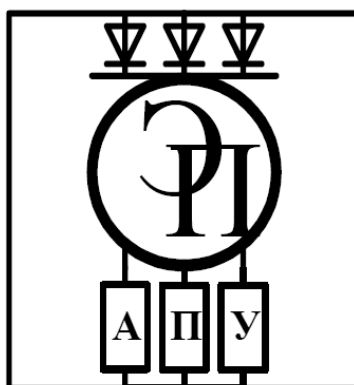


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2021

УДК 658.012.011.56:62-83
ББК 32.965:31.291
С40

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «20» ноября 2020 г., протокол № 4

Составитель канд. техн. наук В. А. Селиванов

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для выполнения лабораторных работ по курсу «Системы управления электроприводами». Предназначены для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» очной и заочной форм обучения.

Учебно-методическое издание

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Ответственный за выпуск	Г. С. Ленеvский
Корректор	А. А. Подошеvко
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2021

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Изучение релейно-контакторного управления двигателем постоянного тока.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Изучение релейно-контакторного управления двигателем переменного тока с фазным ротором.....	9
3 Лабораторная работа № 3. Изучение автоматизированного электропривода, выполненного по системе ЭМУ–Д.....	12
4 Лабораторная работа № 4. Изучение автоматизированного электропривода, выполненного по системе МУ–Д.....	16
5 Лабораторная работа № 5. Исследование СУЭП с совместным управлением группами вентиляей.....	19
6 Лабораторная работа № 6. Исследование СУЭП с отдельным управлением группами вентиляей.....	21
7 Лабораторная работа № 7. Исследование СУЭП с двухзонным регулированием скорости двигателя постоянного тока.....	24
8 Лабораторная работа № 8. Исследование электропривода постоянного тока с однофазным тиристорным преобразователем.....	27
9 Лабораторная работа № 9. Исследование системы ТРН–АД.....	30
10 Лабораторная работа № 10. Исследование системы ТПЧ–АД.....	33
11 Лабораторная работа № 11. Исследование трёхконтурной системы электропривода постоянного тока.....	37
12 Лабораторная работа № 12. Исследование позиционного электропривода.....	40
13 Лабораторная работа № 13. Исследование следящего электропривода.....	44
Список литературы.....	48

Введение

Современный автоматизированный электропривод (ЭП) является основным звеном автоматизации и механизации всех отраслей народного хозяйства. Уровень развития ЭП определяет решение задач, направленных на повышение производительности, точности работы оборудования, а также на создание производственных комплексов энергосберегающих и безлюдных технологий.

Особенность систем автоматизированного ЭП состоит в том, что преобразование силовой энергии и процесс регулирования осуществляются в них автоматически. Благодаря применению автоматизированного ЭП человек освобождается от тяжелого физического труда, с него снимаются функции переработки информации и принятия решений по управлению. Отсюда, в частности, следуют результаты, которые в совокупности обеспечивают улучшение условий труда занятых в производственном процессе работников, а также приводят к замечательному росту эффективности процесса производства в масштабах всего общества.

Широкое применение быстродействующих регулируемых комплектных систем ЭП привело к коренному изменению и упрощению конструкций металлорежущих станков, механизмов и рабочих машин. Происходит резкое повышение технического уровня оборудования за счет нетрадиционного, принципиально нового исполнения приводов; электрический двигатель ЭП вплотную приблизился к исполнительному органу (ИО) рабочей машины.

Данные методические рекомендации ориентированы на закрепление теоретических сведений из курса «Системы управления электроприводами» (СУЭП) и приобретение практических навыков исследования и настройки замкнутых СУЭП различного типа.

1 Лабораторная работа № 1. Изучение релейно-контакторного управления двигателем постоянного тока

Цель работы: исследование статических и динамических характеристик двигателей постоянного тока (ДПТ) при пуске в функции электродвижущей силы (ЭДС).

Теоретические сведения

Под термином «релейно-контакторные системы управления» (РКСУ) понимают логические системы управления, построенные на релейно-контакторной элементной базе и предназначенные для автоматизации работы двигателей. С помощью РКСУ автоматизируются следующие операции: включение и отключение двигателя; выбор направления и скорости вращения; пуск и торможение двигателя; создание временных пауз в движении; защитное отключение двигателя и остановка механизма. Данные операции необходимы для выполнения движения рабочего органа механизма по технологическим условиям.

Непосредственный объект управления для РКСУ – это двигатель, питаемый от сети. Электропривод, выполненный на такой основе, представляет собой простой нерегулируемый ЭП, в основном общепромышленного применения (например, ЭП кранов, тихоходных лифтов, конвейеров, компрессоров, вентиляторов, насосов, некоторых транспортных устройств и т. п.).

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка, схема электрическая принципиальная которой приведена на рисунке 1.1, позволяет управлять пуском исследуемого двигателя в три ступени и динамическим торможением. Управление производится в функции ЭДС. Нагрузка на валу исследуемого двигателя $M1$ создается при помощи нагрузочной машины $M2$. В якорной цепи двигателя имеются три пусковых реостата $R5–R7$ и сопротивление динамического торможения $R4$. Частота вращения машины $M1$ измеряется с помощью тахогенератора $BR1$ по прибору $Pn1$. Реле напряжения $KV1–KV3$ позволяют вводить добавочные сопротивления в цепь якоря.

Резисторы необходимы для ограничения пускового тока. По мере разгона двигателя пусковые резисторы поочередно выводятся. Когда пуск закончится, резисторы будут полностью зашунтированы и двигатель перейдет работать на естественную механическую характеристику (рисунок 1.2). При пуске двигатель разгоняется по искусственной характеристике 1, затем по искусственной характеристике 2, а после шунтирования сопротивления – по естественной характеристике 3.

Рассмотрим подробнее работу схемы лабораторной установки. Пуск осуществляется следующим образом. Включается автоматический выключатель $QF1$, обмотка возбуждения двигателя подключается к источнику питания. Нажимается кнопка $SB2$ «Пуск», после чего контактор $K1$ срабатывает и

подключает двигатель к источнику питания. Контактор $K1$ становится на само питание. Двигатель разгоняется с резисторами $R5-R7$ в цепи якоря двигателя.

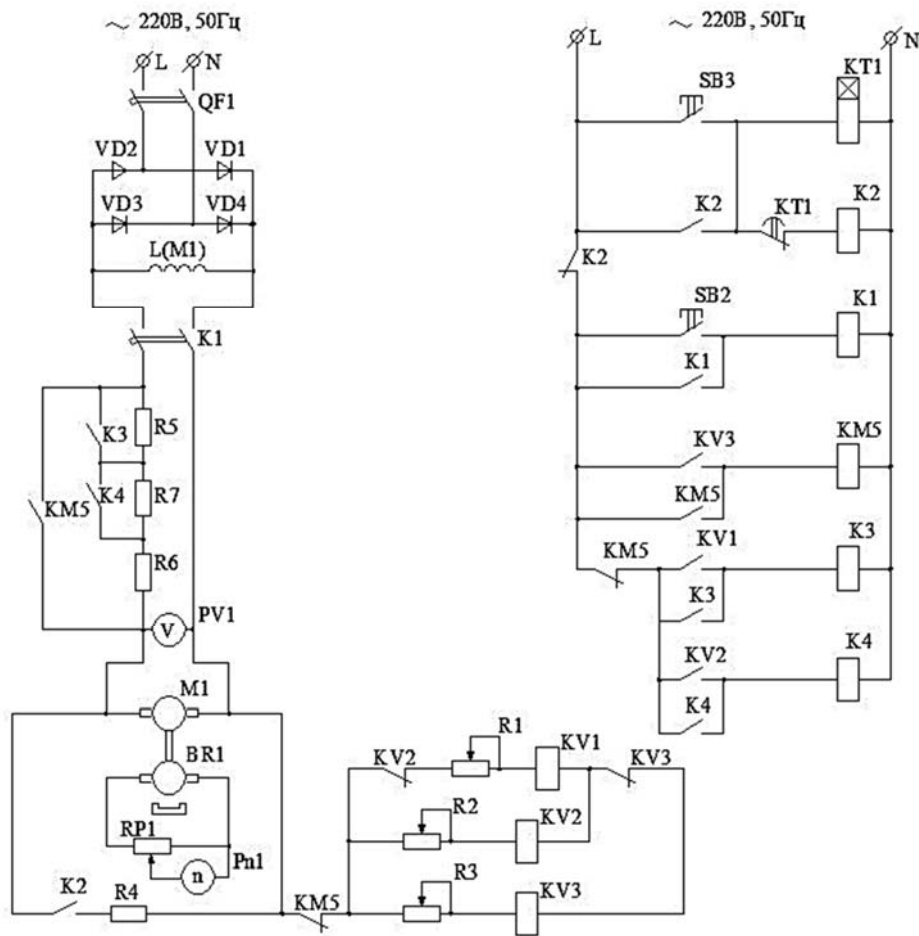
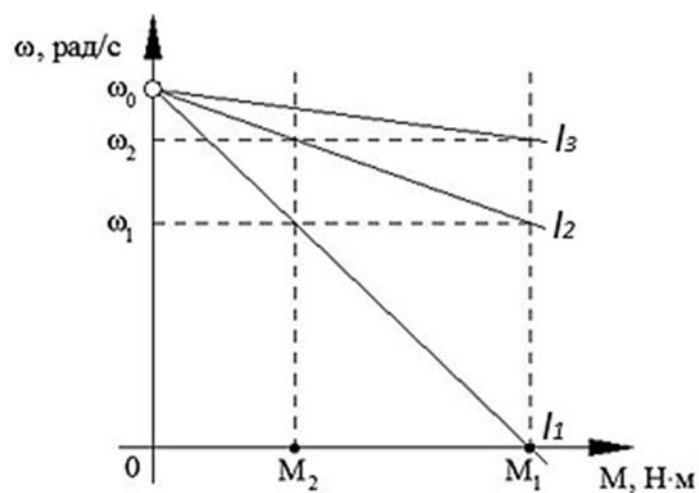


Рисунок 1.1 – Схема электрическая принципиальная лабораторной установки



ω – угловая скорость вращения; I_1, M_1 – пиковый ток и момент двигателя; I_2, M_2 – ток и момент переключения

Рисунок 1.2 – Механические и электромеханические характеристики ДПТ параллельного возбуждения

Частота вращения двигателя отображается прибором $Pn1$.

Управление в функции ЭДС (или скорости) осуществляется реле, напряжения и контакторами. Реле напряжения настроены на срабатывание при различных значениях ЭДС якоря.

При включении контактора $K1$ напряжения на реле $KV1$ – $KV3$ в момент пуска недостаточно для срабатывания. Двигатель работает на характеристике 1 (см. рисунок 1.2).

По мере разгона двигателя (вследствие роста ЭДС двигателя) поочередно срабатывают реле $KV1$, $KV2$ (напряжения срабатывания реле имеют соответствующие значения), тем самым подключая реле $K3$, $K4$, которые в свою очередь шунтируют в цепи якоря $R5$, $R7$ соответственно. Двигатель переходит на характеристику 2 . Реле $K3$, $K4$ становится на само питание. Последним срабатывает $KV3$, который шунтирует посредством контактора $KM5$ резистор $R6$. Также отключаются $KV1$, $KV2$, $K3$, $K4$ и затем $KV3$. Двигатель выходит на естественную характеристику 3 .

Для правильной работы схемы необходимо настроить реле напряжения $KV1$ на срабатывание при ЭДС, соответствующей скорости ω_1 , реле напряжения $KV2$ на срабатывание при скорости ω_2 , реле напряжения $KV3$ при скорости ω_3 .

Для перевода двигателя в режим динамического торможения следует нажать кнопку $SB3$ «Стоп», после чего реле $K2$ становится на само питание и замыкает якорь двигателя на сопротивление динамического торможения. После выдержки времени, осуществляемой $KT1$, $K2$ отключается и двигатель останавливается. Для обесточивания схемы нужно отключить автоматический выключатель $QF1$.

Для включения лабораторной установки необходимо:

- включить $QF1$;
- нажать $SB2$.

Для отключения лабораторной установки необходимо:

- нажать $SB3$;
- выключить $QF1$.

Пуск в функции ЭДС

Наиболее часто и просто в таких схемах скорость двигателя можно контролировать косвенным путём, т. е. через его ЭДС (для машин постоянного тока) или через ЭДС и частоту тока в роторе для асинхронных и синхронных машин.

Контролировать скорость ДПТ через его ЭДС можно благодаря тому, что при постоянном магнитном потоке в якоре возникает ЭДС, пропорциональная скорости якоря. Катушки реле ускорения можно включать на напряжение якоря, превышающее ЭДС только на величину падения напряжения в якоре ($I \cdot R_{\text{я}}$). При определенных значениях напряжения поочередно срабатывает реле (контакторы) ускорения, закорачивая ступени пускового сопротивления, значит, контакторы ускорения в данном случае являются также и аппаратами, контроли-

рующими ЭДС якоря двигателя. На рисунке 1.3 приведены схема и графики автоматического пуска ДПТ параллельного или независимого возбуждения.

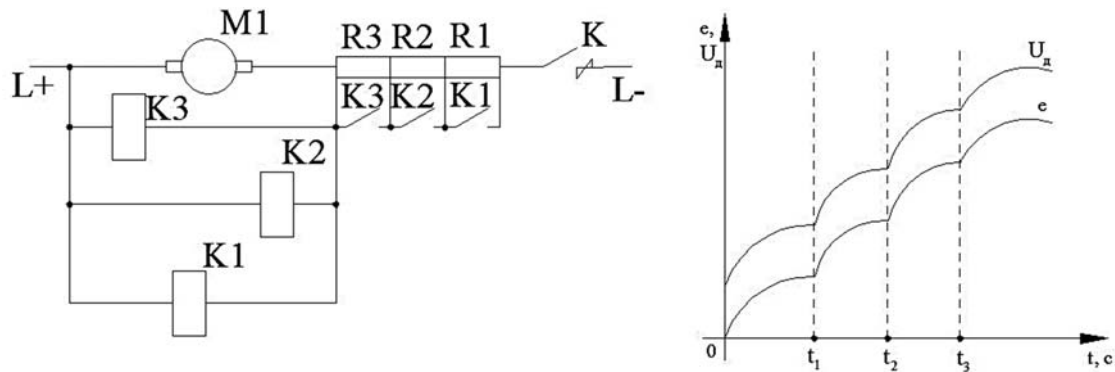


Рисунок 1.3 – Схема пуска и графики пуска двигателя в функции ЭДС

Каждый из контакторов ускорения, включенных в схему, настроен на определенное значение напряжения стягивания. Пуск начинается после включения линейного контактора K . В начале пуска напряжение на катушках контакторов $K1$, $K2$, $K3$ мало и равно падению напряжения на якоре.

Выполнение лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки.
- 2 Рассчитать по паспортным данным естественные механические характеристики (МХ) двигателя.
- 3 Рассчитать время пуска, тормозные и пусковые сопротивления.
- 4 Рассчитать зависимости $\omega = f(\mathcal{E})$, $I = f(\mathcal{E})$, $\omega = f(t)$, $E = f(t)$, $\omega = f(I)$, $\omega = f(M)$.
- 5 Определить частоту вращения двигателя прибором $Pn1$.
- 6 Настроить реле напряжения на срабатывание при различных значениях ЭДС якоря.
- 7 Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
 - 2 Краткий обзор изученных вопросов.
 - 3 Схемы электрические принципиальные лабораторной установки.
 - 4 Рассчитанные статические характеристики.
 - 5 Экспериментально снятые статические характеристики.
 - 6 Анализ работы лабораторной установки.
- Отчет должен быть оформлен на листах формата А4.

Контрольные вопросы

- 1 Какие существуют схемы пуска машины постоянного тока?
- 2 Какими способами можно контролировать скорость двигателя? Какой способ наиболее оптимальный?
- 3 Перечислить способы торможения машины постоянного тока и дать им сравнительную характеристику.
- 4 Что произойдет, если оборвать цепь обмотки возбуждения при работе машины на холостом ходу и под нагрузкой? Нарисовать график зависимости $\omega = f(t)$ при $M_C = 0$ и при $M_C = M_H$; $I = f(t)$ при $M_C = 0$ и при $M_C = M_H$.
- 5 Как ускорить реостатный пуск ДПТ?
- 6 Чем обуславливается выбор числа ступеней пускового реостата?
- 7 Как зависит время торможения от величины сопротивления тормозного резистора?

2 Лабораторная работа № 2. Изучение релейно-контакторного управления двигателем переменного тока с фазным ротором

Цель работы: исследование принципов контакторного управления двигателем переменного тока с фазным ротором (АД с ФР); исследование и изучение статических и динамических характеристик АД с ФР.

Теоретические сведения

Релейно-контакторные системы управления осуществляют автоматизированный или дистанционный пуск и остановку двигателя, управление разгоном, торможением, реверсом, а также блокировочные связи с двигателями других механизмов. Основными аппаратами релейно-контакторных систем являются электромагнитные контакторы, разного рода реле (реле тока, напряжения, времени и т. д.) и другие контактные аппараты (кнопочные посты, командо-контроллеры и т. д.).

Релейно-контакторное управление позволяет осуществить автоматический, дистанционный пуск, изменение частоты вращения, останов, реверсирование, торможение и защиту двигателя. Этот вид управления относится к разомкнутым системам в том смысле, что он не охвачен обратными связями (ОС).

В результате этого возмущающее воздействие (например, изменение нагрузки на валу двигателя) изменяет заданный режим, т. е. приводит к изменению частоты вращения вала двигателя.

Для сложных приводов применяют замкнутые системы, т. е. системы автоматического регулирования (САР), охваченные ОС.

В таких системах поддерживается заданный режим работы при наличии возмущающих воздействий (изменение нагрузки, напряжения питания и т. д.).

Описание лабораторной установки

Схема электрическая принципиальная приведена на рисунке 2.1.

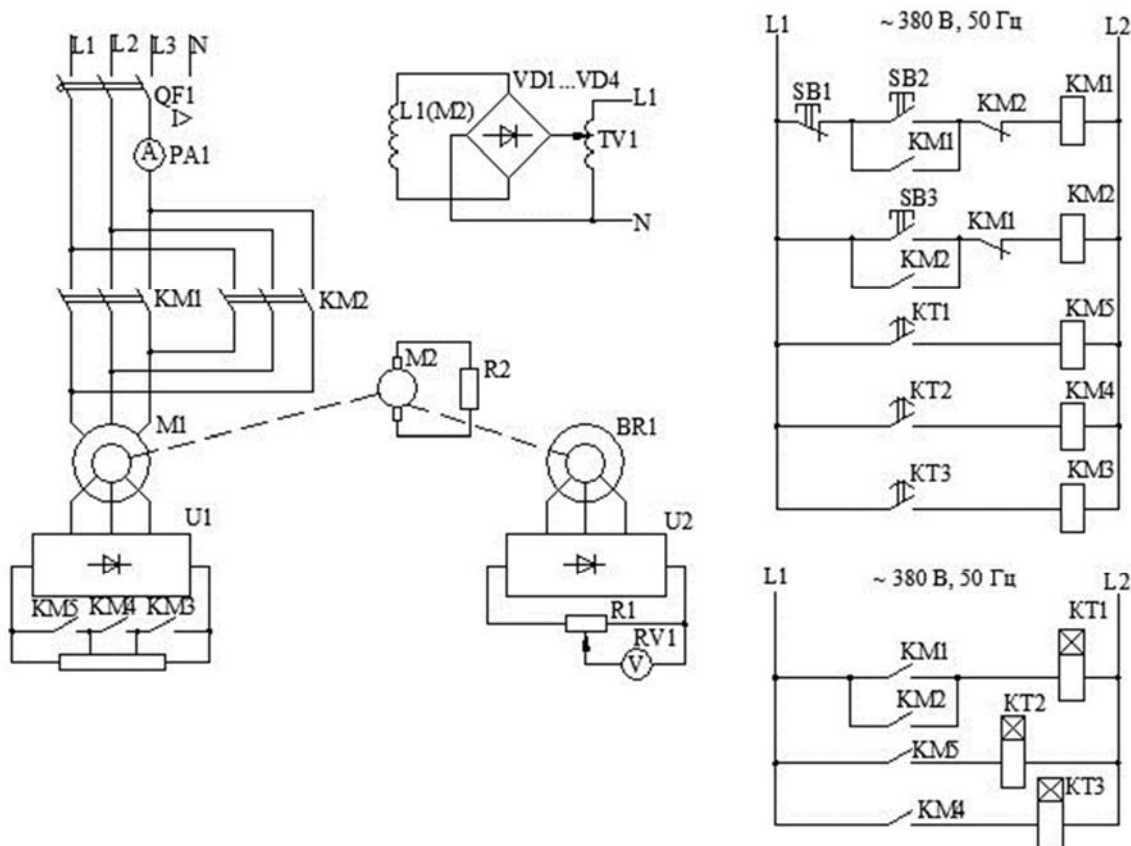


Рисунок 2.1 – Схема электрическая принципиальная стенда лабораторного

Для согласования напряжения питающей цепи с входным напряжением обмотки возбуждения нагрузочного двигателя $M2$ используется лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) $TV1$, с которого напряжение поступает на выпрямительный мост $VD1-VD4$. Автоматический выключатель $QF1$ осуществляет подключение и отключение сети, а также защиту от токов короткого замыкания и длительной токовой перегрузки.

Исследуемый двигатель $M1$ закреплен на одном валу с нагрузочной машиной $M2$. Нагрузка подключается автоматическим выключателем $QF1$. В роторной цепи исследуемого двигателя имеются ступени пусковых реостатов.

Пуск осуществляется нажатием кнопки $SB2$. Срабатывает $KM1$, который запускает реле времени $KT1$, которое по истечении времени своим контактом включает $KM5$, вводя первую ступень. Аналогично вводятся оставшиеся реле.

Торможение двигателя – противовключением. Осуществляется нажатием кнопки $SB3$.

Для измерения тока якоря двигателя $M1$ в его якорной цепи установлен амперметр $PA1$. $PV1$ установлен в цепи машины $M2$.

Данные исследуемого АД с ФР: МТ011-6.

$$P_H = 1,4 \text{ кВт}; n_H = 885 \text{ об/мин}; \frac{M_K}{M_H} = 2,3; \cos \varphi_H = 0,7;$$

$$I_{CT} = 4,8 \text{ А}; R_1 = 5,98 \text{ Ом}; X_1 = 3,93 \text{ Ом}; E_{2H} = 112 \text{ В};$$

$$I_{2H} = 9,3 \text{ А}; R_2 = 0,695 \text{ Ом}; X_2 = 0,57 \text{ Ом}; K_E = 9,85;$$

$$J = 0,085 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Данные нагрузочного ДПТ СВ: П-41.

$$P_H = 3,2 \text{ кВт}; n_H = 1500 \text{ об/мин}; I_H = 18,4 \text{ А}; R_{Я} + R_{ДПТ} = 1,032 \text{ Ом};$$

$$R_{ПАР} = 198 \text{ Ом}; N = 972; w_{ПАР} = 1750; \Phi = 4 \text{ мВб};$$

$$I_B = 0,84 \text{ А}; J = 0,15 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Выполнение лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки, записать паспортные данные электродвигателей.
- 2 Подключить лабораторный стенд к сети.
- 3 Подать напряжение на оборудование стенда.
- 4 Разогнать исследуемый двигатель до $W_{НОМ}$.
- 5 Снять статическую характеристику $\omega = f(I)$.
- 6 Снять динамические характеристики $\omega = f(t)$ и $I = f(t)$.
- 7 Рассчитать и построить искусственные характеристики при введении добавочных сопротивлений в цепь ротора.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Краткий обзор изученных вопросов.
- 3 Схемы электрические принципиальные лабораторной установки.
- 4 Рассчитанные статические характеристики.
- 5 Экспериментально снятые статические характеристики.
- 6 Анализ работы лабораторной установки.

Контрольные вопросы

- 1 Способы торможения асинхронных двигателей (сравнительная оценка).
- 2 Торможение противовключением. Преимущества и недостатки.
- 3 Динамическое торможение. Особенности.
- 4 Рекуперативное торможение. Области применения.

5 Влияние колебаний напряжения сети и колебаний нагрузки на характер пусковых диаграмм.

6 Каким образом можно изменить момент динамического торможения?

7 Как ускорить пуск исследуемого двигателя?

3 Лабораторная работа № 3. Изучение автоматизированного электропривода, выполненного по системе ЭМУ–Д

Цель работы: исследование статических и динамических характеристик системы автоматического управления (САУ) скоростью вращения двигателя по системе ЭМУ–Д и изучение формирования этих характеристик при помощи жестких (линейных и нелинейных) обратных связей.

Теоретические сведения

Электромашинным усилителем (ЭМУ) называется генератор постоянного тока, предназначенный для усиления по мощности сигналов, подаваемых на обмотку возбуждения. Обычный генератор тоже является ЭМУ, однако он не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ЭМУ, т. к. не обладает достаточным быстродействием и имеет низкий коэффициент усиления. Для получения большого коэффициента усиления и малой инерционности схема обмоток и конструкция ЭМУ должны существенно отличаться от применяемых в обычных генераторах постоянного тока.

Системы автоматического ЭП с ЭМУ нашли широкое применение благодаря следующим *достоинствам*:

- возможности получения больших коэффициентов усиления по мощности (10000 и более) и напряжению (до 1000);
- значительной выходной мощности (до 10 кВт и выше);
- способности суммирования управляющих сигналов и удобству ведения обратных связей, особенно при использовании нескольких обмоток укрепления.

Однако эти системы обладают рядом недостатков, что является причиной их замены на более современные.

К *недостаткам* можно отнести: наличие щеточного контакта, нелинейность характеристики намагничивания и внешних характеристик, наличие гистерезисной петли, обуславливающей неоднозначность выходного сигнала.

По режиму работы системы управления в ЭМУ делятся на две группы:

- 1) работающие преимущественно в условиях пуска и торможения;
- 2) работающие в режиме поддержания заданной скорости или изменения ее по определенному закону.

В первом случае основной функцией ЭМУ является создание переходных процессов с целью их формирования или замедления.

Во втором случае ЭМУ выполняет функции регулятора скорости.

Для системы группы II необходимо введение различных обратных связей с целью повышения точности при удовлетворительных показателях качества процесса регулирования.

Обратные связи позволяют стабилизировать контролируемые параметры ЭП и получать необходимый диапазон регулирования выходной величины (например, скорости двигателя).

При проектировании САУ проводятся статический и динамический расчеты.

Для статического расчета обычно указывается требуемая статическая точность при необходимом диапазоне регулирования. Исходя из этого, определяются следующие коэффициенты: усиления разомкнутой системы заданной части системы и, если нужно, той части, которой следует дополнить САУ с целью выполнения требований задания.

Расчет динамики заключается в определении условий устойчивости, синтеза типа и параметров корректирующего устройства, а также возможностей улучшения динамических показателей качества процесса регулирования.

Описание лабораторной установки

Схема электрическая принципиальная лабораторной установки приведена на рисунке 3.1.

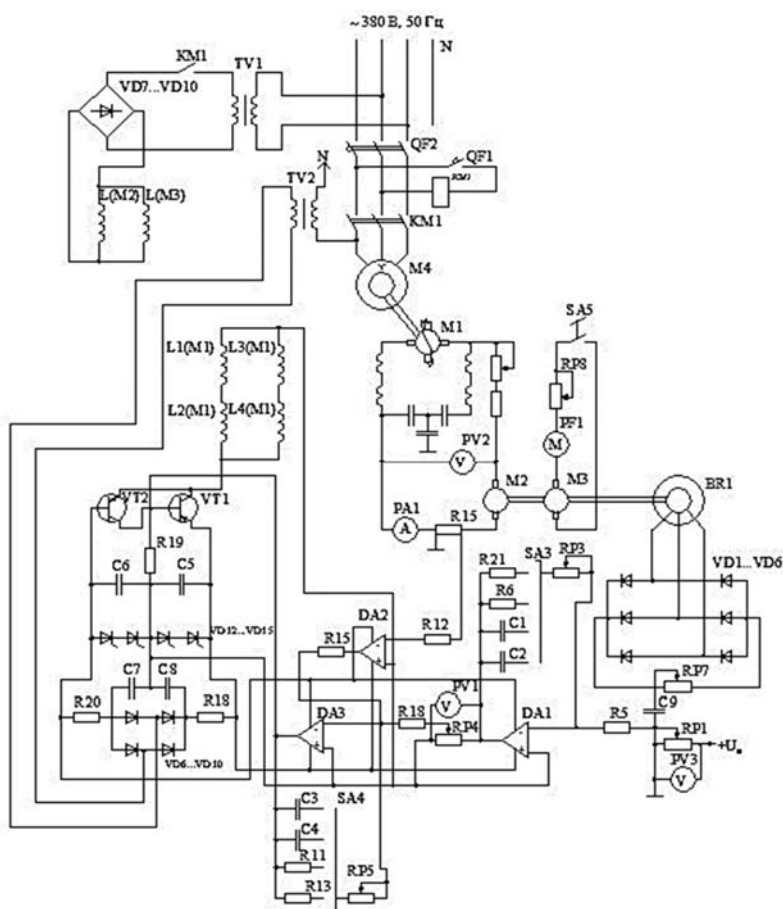


Рисунок 3.1 – Схема лабораторной установки

Исследуемый двигатель $M2$ получает питание от ЭМУ, состоящего из ЭМУ поперечного поля $M1$ и приводного асинхронного двигателя $M4$, сопряженных на общем валу и в общем корпусе. В качестве нагрузочной машины используется двигатель постоянного тока $M3$. Нагрузка $SA5$ регулируется резистором $RP6$. Резисторы $RP3$ – $RP5$ и переключатели $SA3$, $SA4$ служат для изменения настройки регулятора тока и скорости.

Выполнение лабораторной работы

1 Выполнить статический расчет, обеспечивающий максимальный диапазон регулирования и расчет характеристик $\omega = f(I_y)$.

2 Установить расчетные параметры и снять статические характеристики.

3 Экспериментально определить диапазон регулирования скорости для каждого случая.

4 На электронном осциллографе посмотреть и зарисовать кривые переходных процессов при различных коэффициентах обратных связей.

5 Построить расчетные и экспериментальные характеристики системы и оценить влияние обратных связей на статику и динамику замкнутых систем регулирования.

6 Сделать выводы о диапазоне регулирования, статизме и влиянии обратных связей на качество переходных процессов.

7 При выполнении лабораторной работы использовать данные из таблиц 3.1–3.3/

Таблица 3.1 – Показатели гонного двигателя и ЭМУ

Тип машины	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А	Скорость вращения, об/мин
Гонный двигатель	1,68	380/220	3,15/5,4	2850
ЭМУ	1	115	8,7	2850

Таблица 3.2 – Обмоточные данные ЭМУ

Элемент	Число витков	Номинальный ток, мА	Длительный ток, А	$R_{КОМ}$, Ом	Постоянные времени, с
Якорь	348	–	8,7×5	0,565	–
Добавочный полюс	–	–	8,7×5	0,096	–
КО	69	–	8,7×5	0,508	–
<i>Обмотки управления</i>					
ОУ1	675	94	0,24	184	0,07
ОУ2	900	70	0,35	155	0,06
ОУ3	675	94	0,24	184	0,07
ОУ4	900	70	0,35	155	0,06
КЗ виток	–	–	–	–	0,07
Компенсационная обмотка	–	–	–	–	0,14

Таблица 3.3 – Электрические характеристики приводного двигателя

Параметры	Величина
Напряжение, В	110
Ток, А	10,4
Скорость, об/мин	2900
Мощность, кВт	0,95
Напряжение возбуждения, В	110
Число параллельных ветвей якоря	2
Ток возбуждения, А	0,16
Момент инерции якоря, кг·м ²	0,13
Электромеханическая постоянная времени, с	0,42
Электромагнитная постоянная времени, с	0,03

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Краткий обзор изученных вопросов.
- 3 Схемы электрические принципиальные лабораторной установки.
- 4 Основные расчетные формулы.
- 5 Рассчитанные статические характеристики.
- 6 Графики переходных процессов при различных коэффициентах обратных связей.
- 7 Оценка влияния обратных связей на статику и динамику замкнутых систем регулирования.
- 8 Экспериментально снятые статические характеристики.
- 9 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Пояснить принцип действия ЭМУ с поперечным полем. Отличие от ЭМУ с продольным полем.
- 2 Назначение обратных связей в ЭМУ.
- 3 Дать сравнительную оценку ЭМУ–МПТ с МУ–ДПТ, ТП–ДПТ.
- 4 В чем различие между жесткой и гибкой обратной связью (ОС).
- 5 Записать и проанализировать выражение для астатизма характеристики:
 - а) при питании двигателя от сети бесконечной мощности;
 - б) в разомкнутой системе ЭМУ–Д;
 - в) в системе ЭМУ–Д с отрицательной ОС по скорости.

4 Лабораторная работа № 4. Изучение автоматизированного электропривода, выполненного по системе МУ–Д

Цель работы: исследование статических и динамических характеристик системы МУ–Д.

Теоретические сведения

В магнитных усилителях (МУ) используется свойство катушки с ферромагнитным сердечником изменять индуктивное сопротивление при подмагничивании сердечника постоянным током.

МУ используются для управления и регулирования величины тока, напряжения, полного сопротивления, мощности, частоты вращения, температуры и пр.

В обычном исполнении самый простой дроссельный МУ состоит из двух пакетов стали, на каждом из которых размещаются обмотки переменного тока, а обмотки управления (постоянного тока) охватывают оба пакета.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка, схема электрическая принципиальная которой приведена на рисунке 4.1, позволяет исследовать работу разомкнутой и замкнутой системы МУ–МПТ.

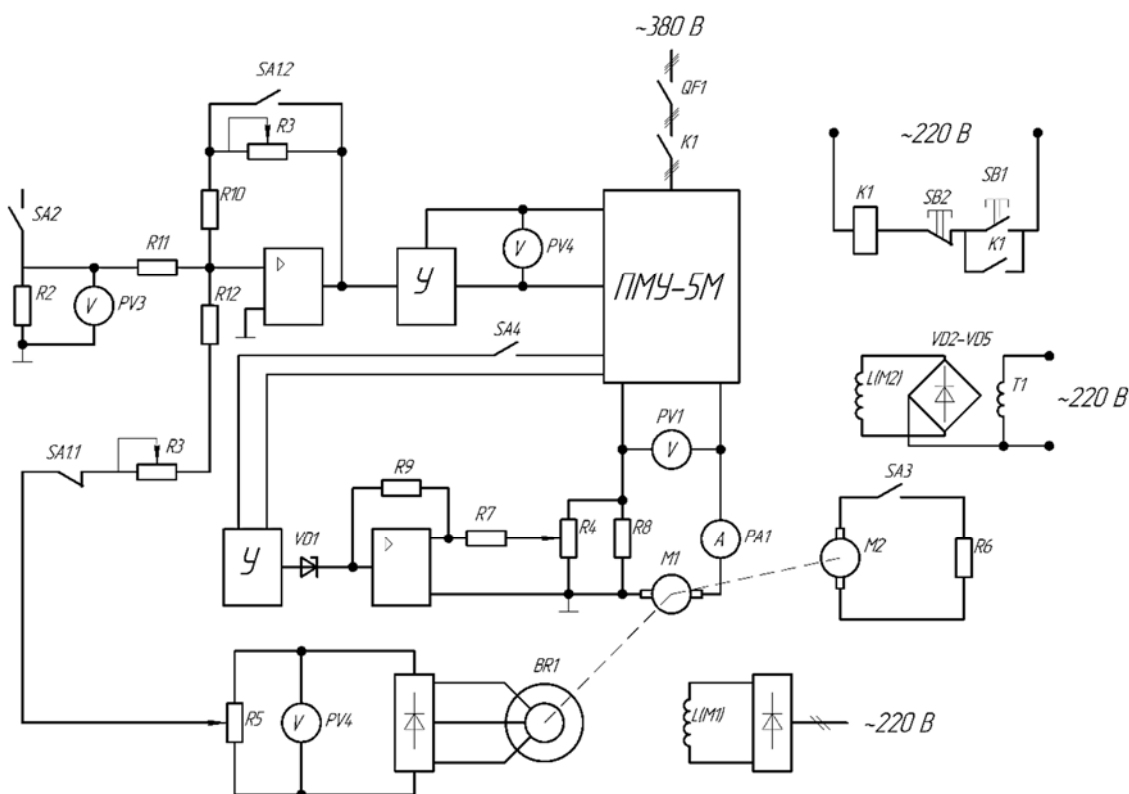


Рисунок 4.1 – Схема принципиальная лабораторного стенда

Нагрузка на валу исследуемого двигателя $M2$ создается при помощи нагрузочной машины $M1$, якорь которой переключателем $SA3$ подключается к нагрузочному резистору $R4$. Частота вращения машины $M2$ изменяется с помощью тахогенератора $BR1$ по прибору $PV1$. Переключатель $SA1$ позволяет исследовать разомкнутую и замкнутую по скорости системы. Переключатель $SA4$ подключает отсечку по току. Для включения лабораторной установки необходимо:

- включить $QF1$;
- включить $SA2$ и резистором $R2$ установить требуемое напряжение управления;
- нажать $SB1$.

Выполнение лабораторной работы

1 Изучить схему электрическую принципиальную (см. рисунок 4.1), которая позволяет исследовать работу разомкнутой и замкнутой системы МУ–Д.

2 Включить лабораторную установку.

3 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки.

4 Рассчитать по паспортным данным статические характеристики системы МУ–Д.

5 Для $\omega = 0,5\omega_{ном}$ и $\omega = \omega_{ном}$ снять статические характеристики $\omega = f(t)$ и $U = f(t)$ системы без обратной связи по скорости.

Исходное положение аппаратов:

$SA1$ – отключено;

$SA2$ – включено;

$SA3$ – отключено;

$SA4$ – отключено.

Нагрузку изменять автотрансформатором $TV1$, при этом статический ток двигателя не должен превышать значения номинального тока.

6 Для $\omega = 0,5\omega_{ном}$ и $\omega = \omega_{ном}$ снять статические характеристики $\omega = f(I)$ и $U = f(I)$ системы с обратной связью по скорости.

Исходное положение аппаратов:

$SA1$ – отключено;

$SA2$ – включено;

$SA3$ – отключено;

$SA4$ – отключено.

Перед снятием характеристики необходимо резисторами установить требуемые коэффициенты усиления и обратной связи по скорости, полученные в результате расчета по п. 2. Нагрузку изменять автотрансформатором $TV1$, при этом ток исследуемого двигателя не должен превышать значения номинального тока.

7 Для разомкнутой системы снять зависимость $U_0 = f(U_y)$ и определить коэффициент усиления системы.

Исходное положение аппаратов:

$SA1$ – отключено;

$SA2$ – включено;

SA3 – отключено;

SA4 – отключено.

Изменяя напряжение задания, которое контролируется по прибору *PV4*, снять показания по прибору *PV1*.

8 Для $\omega = 0,5\omega_{ном}$ и $\omega = \omega_{ном}$ снять статические характеристики замкнутой по скорости системы с отсечкой по току.

Исходное положение аппаратов:

SA1 – отключено;

SA2 – включено;

SA3 – отключено;

SA4 – отключено.

Резистором *R3* установить ток отсечки равным номинальному току. Нагрузку изменять автотрансформатором *TV1*.

Снять динамические характеристики $I = f(t)$ и $\omega = f(t)$ разомкнутой и замкнутой по скорости системы.

Исходное положение аппаратов:

SA1 – отключено;

SA2 – включено;

SA3 – отключено;

SA4 – отключено.

Установить резистором *R2* номинальную скорость двигателя, а автотрансформатором *TV1* – номинальный ток. Динамические характеристики снимают при пуске двигателя (включая и отключая *SA2*) и при сбросе и набросе нагрузки (включая и отключая *SA3*). Затем установить замкнутую систему (включить *SA1*) и повторить снятие характеристик.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Краткий обзор изученных вопросов.

3 Схемы электрические принципиальные лабораторной установки.

4 Рассчитанные статические характеристики.

5 Основные расчетные формулы.

6 Графики переходных процессов при различных коэффициентах обратных связей.

7 Оценка влияния обратных связей на статику и динамику замкнутых систем регулирования.

8 Экспериментально снятые статические характеристики.

9 Выводы.

Контрольные вопросы

1 На чем основан принцип действия МУ?

2 При какой магнитной проницаемости индуктивность катушки, намотанной на сердечнике, будет большей?

3 Составные части и принцип работы преобразователя ЭПУ 1-2М.

4 Для какой цели в силовом блоке электропривода ЭПУ 1-2М параллельно тиристорным группам ставят RC -цепи?

5 Чем отличается система импульсно-фазового управления (СИФУ) горизонтального управления от СИФУ вертикального управления?

5 Лабораторная работа № 5. Исследование СУЭП с совместным управлением группами вентиляей

Цель работы: изучение статических и динамических характеристик системы ТП–ДПТ с совместным управлением групп вентиляей, выполненного на базе тиристорного преобразователя ЭТ-6.

Теоретические сведения

Система ТП–Д – электропривод, в котором ДПТ получает питание от тиристорного преобразователя (ТП) переменного тока в постоянный. Позволяет регулировать угловую скорость двигателя, вращающий момент и другие параметры. Применяется в основном совместно с САР. Обладает хорошими регулировочными характеристиками, высокими надёжностью и КПД (обусловлен КПД тиристорного преобразователя – до 99 %). Мощность от единиц киловатт до несколько мегаватт.

Выполнение лабораторной работы

1 Изучить схему электрическую принципиальную (рисунок 5.1), которая позволяет исследовать статические и динамические характеристики системы ТП–ДПТ при различных настройках регулятора скорости и тока.

2 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки, записать паспортные данные электродвигателей, изучить паспорт на ЭТ-6.

3 По паспортным данным рассчитать настройки регуляторов тока и скорости. Регулятор тока настраивать на модульный оптимум (МО), а регулятор скорости на МО и симметричный оптимум (СО).

4 Используя данные п. 2 настроить регуляторы тока и скорости на лабораторном стенде.

5 Снять статическую характеристику $\omega = f(I)$ при настройке регулятора скорости на МО и СО.

6 Снять динамические характеристики $\omega = f(t)$ и $I = f(t)$ при набросе и сбросе номинального момента и при скачкообразном сигнале задания скорости. Характеристики снять для случаев настройки регулятора скорости на МО и СО.

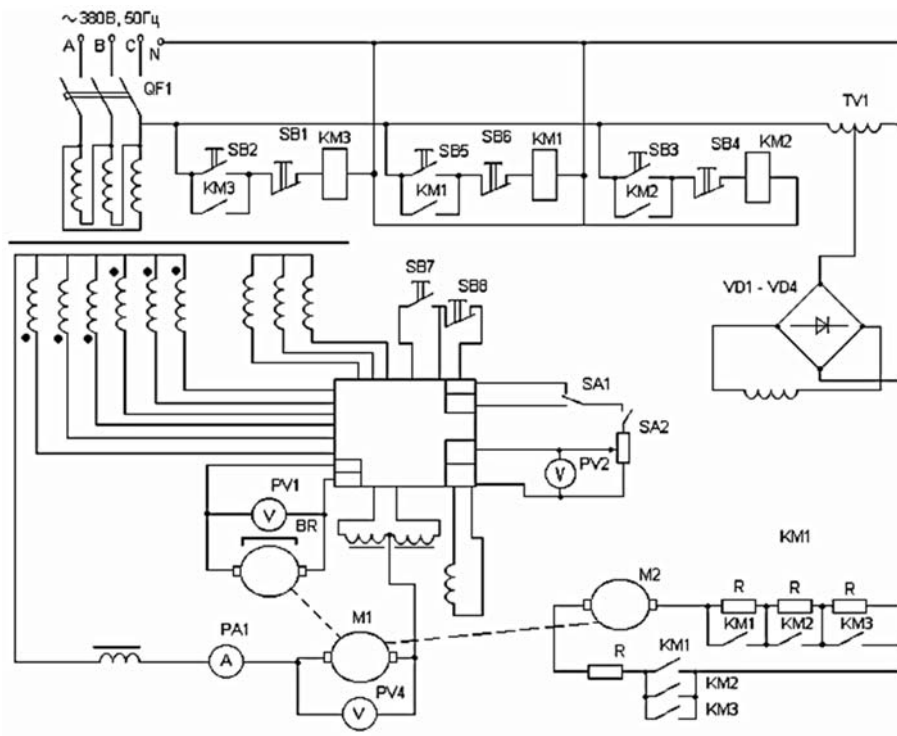


Рисунок 5.1 – Схема электрическая принципиальная лабораторного стенда

Содержание отчета

- 1 Схема электрическая принципиальная лабораторной установки.
- 2 Расчет регуляторов тока и скорости.
- 3 Расчет статических характеристик.
- 4 Основные расчетные формулы.
- 5 Экспериментально снятые статические и динамические характеристики.
- 6 Вывод о работе системы.

Контрольные вопросы

- 1 На чем основан принцип действия системы ТП–Д?
- 2 Основной тип преобразователей, применяемых в настоящее время для управления ДПТ.
- 3 Дать сравнительную оценку настроек регулятора скорости и регулятора тока.
- 4 Дать сравнительную оценку схем соединения силовой части ТП–Д (при раздельном и совместном управлении) групп вентиляей.

6 Лабораторная работа № 6. Исследование СУЭП с раздельным управлением группами вентиляей

Цель работы: исследование, изучение и анализ статических и динамических характеристик реверсивной системы ТП–ДПТ с раздельным управлением, выполненной на базе тиристорного преобразователя ЭПУ 1-2М.

Теоретические сведения

Общие сведения о системах электропривода с раздельным управлением группами вентиляей. Для реверсивного ЭП используются специальные схемы ТП, подразделяемые на схемы с одной группой тиристоров и переключением полярности в цепи нагрузки с помощью контактных или бесконтактных переключателей и с двумя группами вентиляей, среди которых различают перекрестную и встречно-параллельную. Мостовая реверсивная схема является разновидностью встречно-параллельной схемы.

Для ЭП с малым временем реверса и при необходимости получения двигательного и тормозного режимов работы при одном направлении вращения используются схемы с двумя группами тиристоров.

Система управления ТП должна обладать высоким быстродействием и обеспечивать формирование импульсов управления с определенными параметрами: амплитуда – не менее 200...400 мА, продолжительность – 10...15 эл. град, крутизна переднего фронта – порядка 10 А/с. Диапазон регулирования угла управления составляет 150°...160°. Кроме того, СИФУ должна обеспечивать ограничение минимальных и максимальных углов управления и блокировку подачи импульсов на тиристоры.

При раздельном управлении отпирающие импульсы поступают только на одну из групп тиристоров, другая группа оказывается закрытой. Это позволяет устранить уравнительные токи и исключить уравнительные реакторы. Специфической особенностью ТП с раздельным управлением является логическое переключающее устройство. Для реализации раздельного управления используются следующие способы переключения выпрямительных групп: в функции напряжения управления, в функции тока якоря и в функции управляющего напряжения и тока якоря.

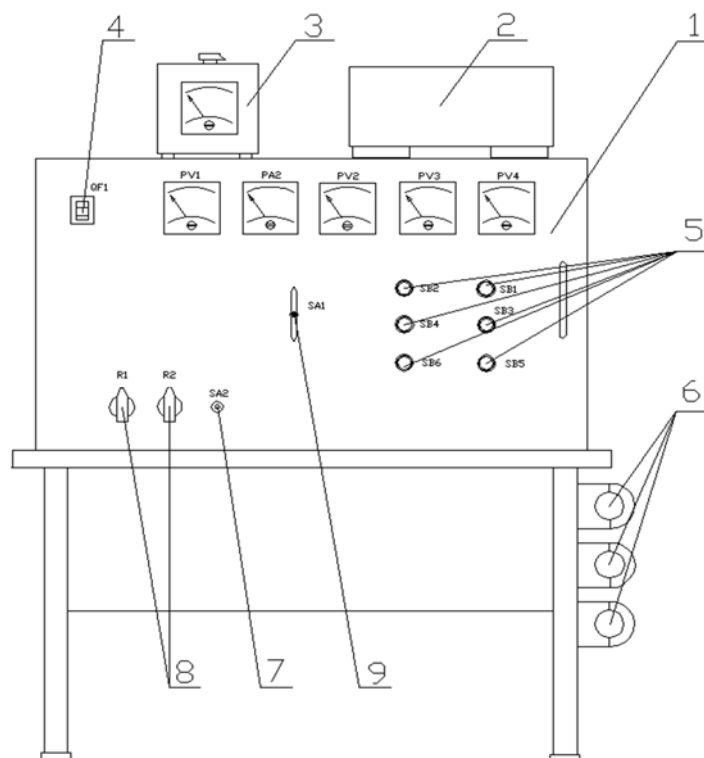
Достоинства раздельного управления: исключение из силовой схемы преобразователя уравнительных реакторов; возможность использования силового трансформатора на полную мощность, поскольку в выпрямительном режиме допускается нулевой угол управления.

Среди *недостатков* следует отметить неоднозначность регулировочных характеристик, ограниченность диапазона частот управляющего сигнала величиной $f_{cp} < 1/2\tau_{п}$ независимо от амплитуды этого сигнала по сравнению с согласованным управлением группами преобразователя.

Для быстродействующих ЭП небольшой мощности (до 10 кВт) более целесообразным является применение согласованного управления, а для приводов средней и большой мощности – раздельного управления.

Описание лабораторного стенда

Сведения о лабораторной установке. Лабораторный стенд, общий вид которого представлен на рисунке 6.1, имеет схему электрическую принципиальную (рисунок 6.2). Он предназначен для исследования статических и динамических характеристик системы ТП–ДПТ.



1 – стенд лабораторный; 2 – тиристорный преобразователь ЭПУ 1-2М; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – автоматический выключатель; 5 – кнопки управления нагрузочными реостатами; 6 – нагрузочные реостаты; 7 – переключатель; 8 – подстроечные резисторы; 9 – переключатель L1

Рисунок 6.1 – Общий вид стенда лабораторного

Выполнение лабораторной работы

1 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки, записать паспортные данные электродвигателей, изучить паспорт на преобразователь ЭПУ 1-2М.

2 Подключить лабораторный стенд к сети.

3 Подать напряжение на оборудование стенда.

4 Разогнать исследуемый двигатель до $W_{ном}$.

5 Снять статическую характеристику $w = f(I)$.

6 Снять динамические характеристики $w = f(t)$ и $I = f(t)$.

7 Исследовать влияние индуктивности $L1$ на $w = f(I)$ и $I = f(t)$.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите составные части и объясните принцип работы преобразователя ЭПУ 1-2М.
- 2 Для какой цели в силовом блоке электропривода ЭПУ 1-2М параллельно тиристорным группам ставят RC -цепи?
- 3 Чем отличается СИФУ горизонтального управления от СИФУ вертикального управления?
- 4 Объясните принцип работы СИФУ электропривода ЭПУ 1-2М.
- 5 Почему для нормальной работы электропривода СИФУ должна формировать два импульса, сдвинутых на 60° ?
- 6 Объясните по каким критериям выбираются начальный, максимальный и минимальный углы управления.
- 7 Для каких целей служит логическое устройство электропривода ЭПУ 1-2М?
- 8 Опишите систему регулирования электропривода ЭПУ 1-2М.
- 9 Перечислите и объясните принцип работы защит, встроенных в электропривод ЭПУ 1-2М.

7 Лабораторная работа № 7. Исследование СУЭП с двухзонным регулированием скорости двигателя постоянного тока

Цель работы: исследование двухзонного регулирования для ЭП с двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ).

Теоретические сведения

В ЭП постоянного тока регулирование ниже номинальной скорости осуществляется за счет изменения напряжения на якоре, а регулирование выше номинальной скорости – за счет ослабления поля двигателя. Поэтому двухзонный ЭП состоит из двух подсистем: одна изменяет напряжение на якоре, другая изменяет поле двигателя. Управление этими подсистемами может быть зависимым и независимым. Современные системы ЭП зависимые, т. е. ослабление поля начинается при достижении напряжения или ЭДС на якоре номинальных значений.

Работа ЭП с двухзонным регулированием скорости в общем случае характеризуется следующей системой уравнений:

$$M - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}; \quad (7.1)$$

$$E_{np} = IR + L \frac{dI}{dt} + e; \quad (7.2)$$

$$M = k \cdot \Phi \cdot I; \quad (7.3)$$

$$e = k \cdot \Phi \cdot \omega; \quad (7.4)$$

$$F = i_B \cdot W_\epsilon + i_{BT} \cdot W_{BT} = F_B + F_{BT}; \quad (7.5)$$

$$e_B = i_B \cdot r_B + 2 \cdot p_B \cdot \sigma \cdot W_\epsilon \cdot \frac{d\Phi}{dt}; \quad (7.6)$$

$$0 = i_{BT} \cdot r_{BT} + 2 \cdot p_n \cdot \sigma \cdot W_{BT} \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7.7)$$

где J_Σ – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя, кг·м²;

M_c – статический момент нагрузки, Н·м;

M – электромагнитный вращающий момент двигателя, Н·м;

e – ЭДС двигателя, В;

E_{np} – ЭДС преобразователя, В;

ω – скорость вращения двигателя, с⁻¹;

I – ток якоря двигателя, А;

i_B – ток в обмотке возбуждения, А;

i_{BT} – вихревые токи, А;

W_ϵ – количество витков обмотки возбуждения;

Φ – магнитный поток, Вб.

На основании данных уравнений строится структурная схема системы двухзонного регулирования, состоящая из объекта управления (ДПТ НВ) и управляющего устройства (рисунок 7.1). На рисунке приняты следующие обозначения:

U_{zc} – напряжение задания скорости;

PC – регулятор скорости с передаточной функцией W_{PC} ;

$РТЯ$ – регулятор тока якоря с передаточной функцией $W_{РТЯ}$;

$ТПЯ$ – тиристорный преобразователь якоря;

$k_{ТПЯ}$ – коэффициент усиления преобразователя якоря;

$ДС$ – датчик скорости с коэффициентом передачи $k_{ДС}$;

$ДТЯ$ – датчик тока якоря с коэффициентом передачи $k_{ДТЯ}$;

$ЯЦ$ – якорная цепь двигателя;

R_ϵ – полное сопротивление якорной цепи;

T_ϵ – электромагнитная постоянная времени двигателя;

J_Σ – суммарный момент инерции, приведенный к валу двигателя;

$U_{z\epsilon}$ – напряжение задания ЭДС;

$РЭ$ – регулятор ЭДС с передаточной функцией $W_{РЭ}$;

$РП$ – регулятор потока возбуждения с передаточной функцией $W_{РП}$;

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Краткий обзор изученных вопросов.
- 3 Схема электрическая принципиальная лабораторной установки.
- 4 Расчет статических характеристик.
- 5 Основные расчетные формулы.
- 6 Экспериментально снятые статические и динамические характеристики.
- 7 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 За счет изменения каких параметров осуществляется регулирование скорости выше номинальной и ниже номинальной?
- 2 Из каких подсистем состоит двухзонный ЭП?
- 3 Из каких элементов состоит структурная схема системы двухзонного регулирования?
- 4 Нарисуйте структурную схему внутреннего контура тока.
- 5 Нарисуйте структурную схему контура скорости.
- 6 В двухзонном АЭП при уменьшении потока уменьшается коэффициент в объекте регулирования контура скорости – за счет чего?

8 Лабораторная работа № 8. Исследование электропривода постоянного тока с однофазным тиристорным преобразователем

Цель работы: исследование, изучение и анализ статических и динамических характеристик СУЭП постоянного тока с однофазным ТП, выполненной на базе тиристорного преобразователя БУ-3509.

Теоретические сведения

Тиристорный преобразователь – устройство, предназначенное для преобразования переменного напряжения в постоянное. Основными элементами преобразователя являются трансформатор и вентили, с помощью которых обеспечивается одностороннее протекание тока в цепи нагрузки, в результате чего переменное напряжение преобразуется в пульсирующее. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения к выходным зажимам преобразователя подключают электрический сглаживающий фильтр. В выпрямительном режиме, характеризующимся отдачей мощности в цепь нагрузки, напряжение вторичной обмотки трансформатора и анодный ток вентилей имеют одинаковое направление (это соответствует работе сети переменного тока в качестве генератора энергии).

В зависимости от числа фаз питающего напряжения различают однофазные, трехфазные и многофазные схемы питания. Независимо от мощности

выпрямители подразделяют на однотактные и двухтактные.

К однотактным относят схемы, у которых по вторичным обмоткам трансформатора ток протекает только один раз за полный период (полупериод или его части). Отношение частоты пульсаций выпрямленного напряжения к частоте сети в однотактных схемах равно числу фаз вторичных обмоток трансформатора. В таких схемах, кроме простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя, обязательно выводится нулевая точка трансформатора.

К двухтактным относят схемы, у которых в каждой фазе вторичных обмоток трансформатора ток протекает дважды за один период. Кратность пульсаций выпрямленного напряжения в таких системах в 2 раза больше, чем число фаз вторичных обмоток трансформатора.

Мостовые схемы выпрямителей, относящихся к двухтактным. В мостовых схемах ток во вторичной цепи всегда проходит последовательно по двум вентилям.

Схемы преобразователей делят на простые и сложные. Простыми являются схемы, упомянутые ранее. К простым относят также схемы с умножителем напряжения, в которых в качестве умножителей используют заряженные конденсаторы. В сложных схемах несколько простых схем выпрямителей соединены последовательно или параллельно.

В зависимости от назначения преобразователи могут быть управляемые и неуправляемые. Входные параметры выпрямителя, диапазон регулирования, условия работы вентиля и трансформатора по току и напряжению существенно зависят от характера нагрузки, определяющегося типом нагрузки или первым элементом фильтра.

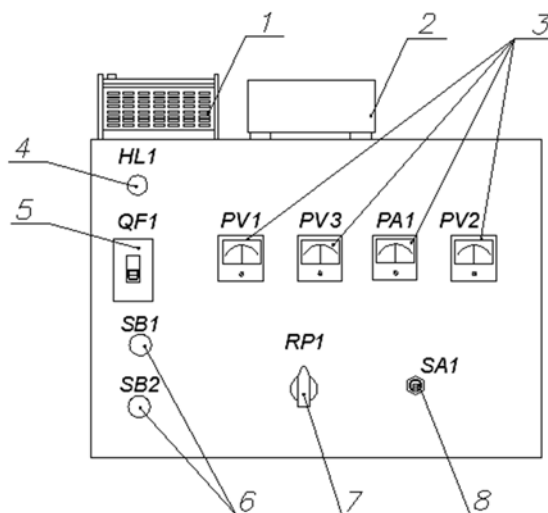
Различают следующие режимы работы выпрямителя:

- работа на индуктивную нагрузку;
- работа на нагрузку с противоЭДС;
- работа на активно-емкостную нагрузку.

Инвертор – это устройство, предназначенное для преобразования постоянного тока в переменный. В преобразовательных установках инверторный режим часто чередуется с выпрямительным, т. е. одна и та же преобразовательная установка может быть и выпрямителем, и инвертором. Это имеет место, например, в ЭП постоянного тока. В двигательном режиме преобразовательная установка выполняет функции выпрямителя, передавая мощность ДПТ. При переходе машины в генераторный режим (движение под уклон, спуск груза, торможение и т. д.) преобразователь работает в инверторном режиме, отдавая мощность, генерируемую машиной постоянного тока, в сеть переменного тока. Таким образом, при инвертировании источник постоянного напряжения работает как генератор электрической энергии, характеризующийся тем, что направления его ЭДС и тока совпадают, а нагрузка (сеть переменного тока) – как потребитель, у которого направления ЭДС и тока противоположны, т. е. напряжение вторичной обмотки трансформатора и анодный ток вентиля имеют разное направление.

Описание лабораторной установки

Общий вид лабораторного стенда представлен на рисунке 8.1, а его принципиальная схема – на рисунке 8.2. Он предназначен для исследования статических и динамических характеристик системы ДПТ и однофазного ТП.



1 – нагрузочный реостат; 2 – тиристорный преобразователь БУ-3509; 3 – приборы измерительные; 4 – лампа сигнальная; 5 – автоматический выключатель; 6 – кнопки «Пуск» и «Стоп»; 7 – подстроечный резистор; 8 – переключатель

Рисунок 8.1 – Общий вид лабораторного стенда

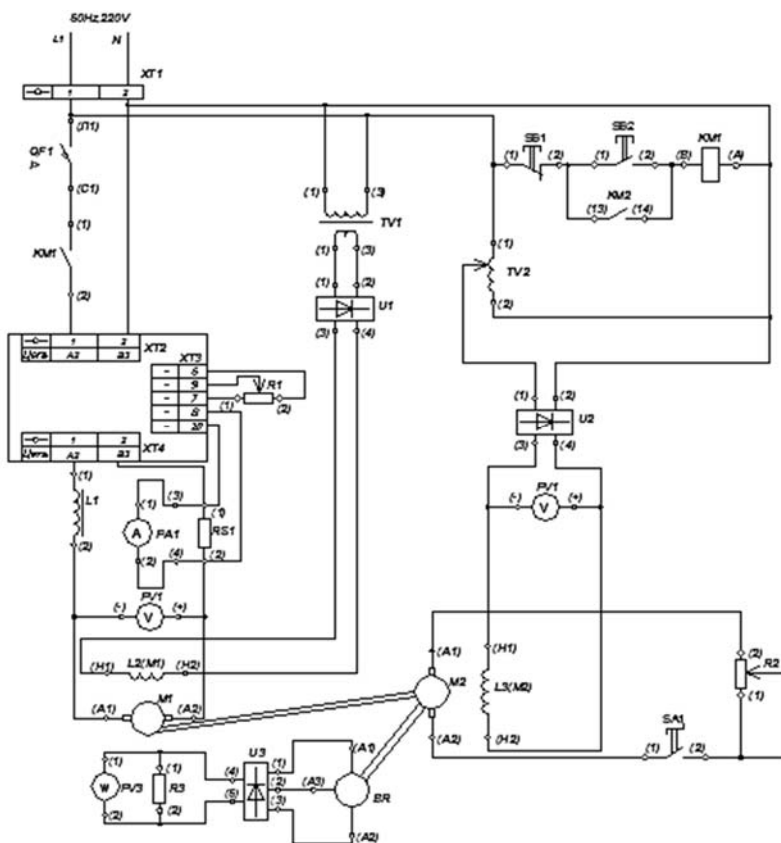


Рисунок 8.2 – Схема электрическая принципиальная лабораторного стенда

Выполнение лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки, записать паспортные данные электродвигателей, изучить паспорт на преобразователь БУ-3509.
- 2 Подключить лабораторный стенд к сети.
- 3 Подать напряжение на оборудование стенда.
- 4 Разогнать исследуемый двигатель до $W_{ном}$.
- 5 Снять статическую характеристику $w = f(I)$.
- 6 Снять динамические характеристики $w = f(t)$ и $I = f(t)$.
- 7 Исследовать влияние индуктивности $L1$ на $w = f(I)$ и $I = f(t)$.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Краткий обзор изученных вопросов.
- 3 Схема электрическая принципиальная лабораторной установки.
- 4 Расчет статических характеристик.
- 5 Основные расчетные формулы.
- 6 Экспериментально снятые статические и динамические характеристики.
- 7 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Перечислите составные части и объясните принцип работы преобразователя БУ-3509.
- 2 Для какой цели в силовом блоке электропривода БУ-3509 параллельно тиристорным группам ставят RC -цепи?
- 3 Объясните принцип работы СИФУ электропривода БУ-3509.
- 4 Объясните по каким критериям выбираются начальный, максимальный и минимальный углы управления.
- 5 Опишите систему регулирования электропривода БУ-3509.
- 6 Перечислите и объясните принцип работы защит, встроенных в электропривод БУ-3509.

9 Лабораторная работа № 9. Исследование системы ТРН–АД

Цель работы: исследование и изучение статических и динамических характеристик системы ТРН–АД.

Теоретические сведения

Одним из возможных способов регулирования частоты вращения асинхронных двигателей является изменение напряжения на зажимах его

статора, при этом частота такого напряжения постоянна и равна частоте промышленной сети переменного тока.

На рисунке 9.1, *a* приведена принципиальная блок-схема рассматриваемого ЭП. Между зажимами питающей сети и статором асинхронного двигателя включен преобразователь напряжения, при использовании которого изменяется напряжение, подводимое к статору двигателя. Возможность регулирования частоты вращения АД с помощью изменения фазного напряжения следует из анализа формулы

$$M = \frac{2 \cdot M_k \cdot (1 + a \cdot s_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \cdot a \cdot s_k}, \quad (9.1)$$

где

$$M_k = \frac{3 \cdot U_\phi^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2)^2} \right]}. \quad (9.2)$$

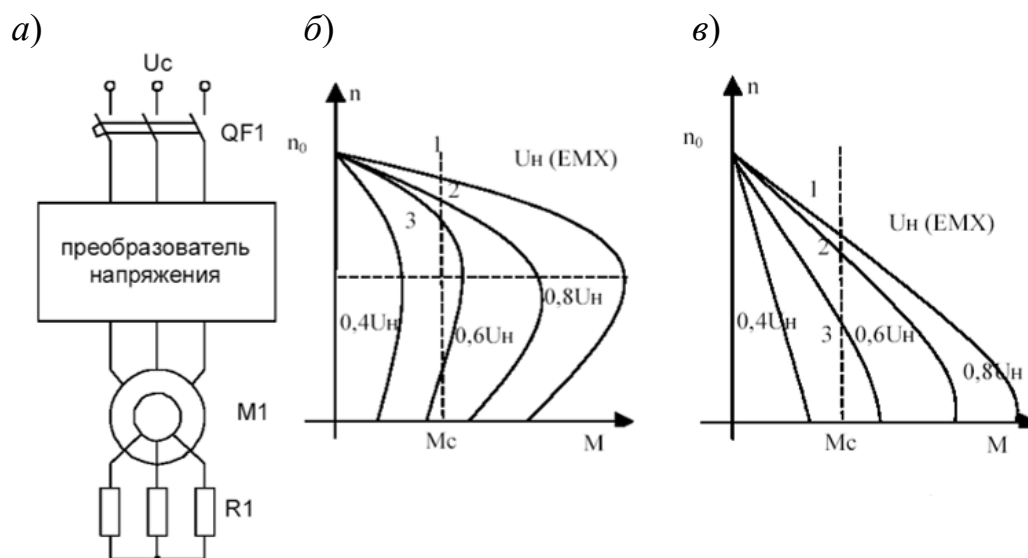


Рисунок 9.1 – Блок-схема (*a*) и механические характеристики при регулировании напряжением для случаев отсутствия (*б*) и наличия (*в*) добавочного сопротивления в роторе

Очевидно, что критическое скольжение не зависит от напряжения, поэтому оно при изменении U_ϕ остается неизменным. Критический момент пропорционален квадрату напряжения и при уменьшении U_ϕ уменьшается.

На рисунке 9.1, *б* и *в* приведены механические характеристики, соответственно, при отсутствии и наличии добавочных активных сопротивлений $R1$ в цепи обмотки ротора. Из рисунка 9.1, *б* следует, что при постоянном моменте M_c нагрузки в случае короткого замыкания ротора частота вращения двигателя изменяется в небольших пределах между точками 1 и 3, а из графиков на рисун-

ке 9.1, в видно, что пределы возможного изменения частоты вращения в случае наличия добавочного сопротивления в роторе более широкие.

Выполнение лабораторной работы

1 Ознакомиться с оборудованием и приборами на рабочем месте. Записать паспортные данные машин.

2 Получить естественную механическую характеристику.

3 Экспериментально снять статические характеристики разомкнутой системы ТРН–АД.

4 Экспериментально снять статические характеристики замкнутой системы ТРН–АД.

5 Экспериментально снять динамические характеристики системы ТРН–АД и определить показатели качества.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Краткий обзор изученных вопросов.

3 Схема электрическая принципиальная лабораторной установки.

4 Расчет статических характеристик.

5 Основные расчетные формулы.

6 Экспериментально снятые статические и динамические характеристики.

7 Выводы.

Контрольные вопросы

1 Принцип действия и назначение узлов тиристорного регулятора напряжения (ТРН).

2 Области применения ТРН. Типы комплексных ТРН.

3 Принцип вертикального управления в СИФУ.

4 Показатели качества, характеризующие работу системы в динамических режимах. Их определение.

5 Основные различия между статическими характеристиками разомкнутой и замкнутой системами ТРН–АД.

10 Лабораторная работа № 10. Исследование системы ТПЧ–АД

Цель работы: изучение принципа построения и оптимальной настройки системы подчиненного регулирования (СПР) асинхронным двигателем. Расчет статических и динамических характеристик системы ТПЧ–АД.

Теоретические сведения

Одним из главных признаков классификации СПР является тип преобразователя частоты, в соответствии с которыми выделяются три типа СПР на основе:

- 1) автономного инвертора тока (АИТ);
- 2) непосредственного преобразователя частоты (НПЧ);
- 3) автономного инвертора напряжения.

Формулами, характеризующими управляемость асинхронных двигателей, являются:

$$W = WI \cdot (1 - S); \quad (10.1)$$

$$WI = \frac{2Pf}{p}, \quad (10.2)$$

где W – скорость ротора АД;

WI – скорость магнитного поля;

S – скольжение.

Из (10.1) и (10.2) видно, что скорость приводного двигателя можно регулировать изменением частоты питающего напряжения f , числом пар полюсов p , либо скольжения. Изменение скольжения может быть получено за счет изменения подводимого напряжения питания или включением в цепь ротора дополнительного сопротивления, а также введением добавочной ЭДС в эту цепь.

Максимальный момент двигателя (пренебрегая сопротивлением $R1$)

$$M_{\max} = mU^2 / (ZWI \cdot X_k). \quad (10.3)$$

Учитывая (10.2) и что $X1 = 2\pi fL1$, $X2 = 2\pi fL2$, получим

$$M_{\max} = mU^2 / f2. \quad (10.4)$$

Отношение моментов M_{\max} при разных частотах следующее:

$$\frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} \cdot \sqrt{\frac{M_{\max(2)}}{M_{\max(1)}}} = \frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}}. \quad (10.5)$$

Если необходимо при регулировании поддерживать постоянство момента, то из (10.5)

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} = \text{const.} \quad (10.6)$$

Если необходимо регулирование с постоянством мощности, то M_{\max} должен изменяться обратно пропорционально частоте вращения ротора, а следовательно, и частоте питающего напряжения:

$$\frac{M_{\max(2)}}{M_{\max(1)}} = \frac{\omega_{(1)}}{\omega_{(2)}} = \frac{f_{1(1)}}{f_{1(2)}}; \quad (10.7)$$

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \sqrt{\frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}}}. \quad (10.8)$$

Выражения (10.5) и (10.8) являются приближенными, т. к. не учитывают влияние сопротивления $R_{1\max}$, что наиболее сильно сказывается на низких частотах.

Рассчитать электромеханические и механические характеристики АД при частотном регулировании можно по следующим формулам:

$$I_1 = U_1 \cdot \sqrt{\frac{(R_2' / X_{\mu}) \cdot S_a^2}{2 \cdot R_1 \cdot R_2' \cdot f_* \cdot S_a + [R_1^2 + f_*^2 \cdot X_k^2] \cdot S_a^2 + R_2'^2 \cdot f_*^2}}; \quad (10.9)$$

$$M = \frac{m \cdot U_1^2 \cdot R_2' \cdot S_a}{\omega_{1H} \cdot (2R_1 \cdot R_2' \cdot f_* \cdot S_a + (R_1^2 + X_k^2 \cdot f_*^2) \cdot S_a^2 + R_2'^2 \cdot f_*^2)}, \quad (10.10)$$

где U_1 – фазное напряжение при частоте f ;

S_a – относительная частота ротора,

$$S_a = \frac{(W_I - W)}{W_H};$$

f_* – относительная частота статора,

$$f_* = \frac{f_1}{f_{1H}}.$$

Полная структурная схема ЭП с преобразователем частоты (ПЧ) приведена на рисунке 10.1.

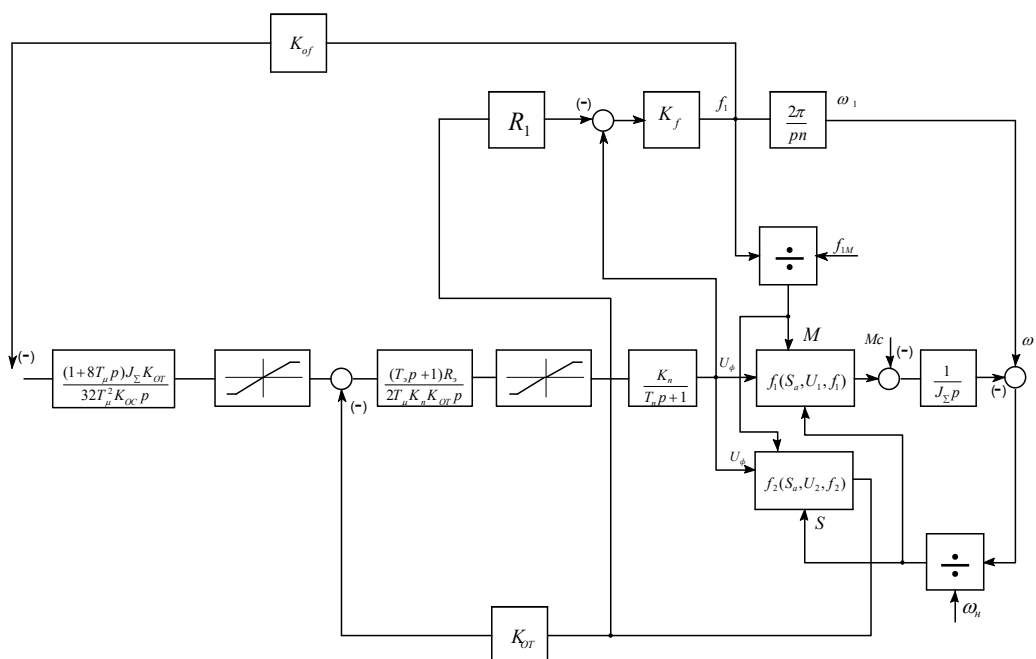


Рисунок 10.1 – Структурная схема

Рассчитать параметры структурной схемы можно по следующим формулам:

– эквивалентная электромагнитная постоянная времени системы управляемого вентильного преобразователь-двигателя (УВП Д)

$$T_{\vartheta} = \frac{L_{\vartheta}}{R_{\vartheta}},$$

где

$$R_{\vartheta} = R_{\partial} + 3 \cdot (R_1 + R_2 L_m^2 / L_2) K_i^2 / 2; \quad (10.11)$$

$$L_{\vartheta} = L_{\partial} + 3 \cdot (L_i + L_m^2 / L_2) K_i^2 / 2; \quad (10.12)$$

$R_{\partial}, L_{\partial}$ – активное сопротивление и индуктивность звена постоянного тока;

K_i – модуль коммутационной функции, $K_i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}$;

– передаточная функция контура тока

$$W_{opt}(p) = \frac{K_n}{T_n \cdot p + 1} + \frac{1/R_{\vartheta}}{T_{\vartheta} \cdot p + 1}; \quad (10.13)$$

– желаемая передаточная функция при настройке на технический оптимум

$$W_{жс}(p) = \frac{1/K_{ог}}{a_T \cdot T_\mu \cdot p \cdot (T_\mu \cdot p + 1)}; \quad (10.14)$$

$$W_{рм}(p) = W_{жс}(p) / W_{опт}(p). \quad (10.15)$$

При синтезе регулятора частоты необходимо учесть, что внутренний контур настроен на технический оптимум и скорость двигателя пропорциональна частоте питающего напряжения. Тогда объект регулирования контура частоты имеет вид:

$$W_{опч}(p) = W_{з.пт}(p) \cdot \frac{1}{J_\Sigma \cdot p} = \frac{1/K_{ог}}{2T_\mu \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{J_\Sigma \cdot p}; \quad (10.16)$$

– желаемая передаточная функция при настройке на СО имеет вид:

$$W_{жс}(p) = \frac{1 + 8T_\mu \cdot p}{8T_\mu \cdot p} \cdot \frac{1/K_{of}}{4T_\mu \cdot p(2T_\mu \cdot p + 1)}; \quad (10.17)$$

$$W_{рч}(p) = W_{жс}(p) / W_{опч}(p); \quad (10.18)$$

$$L_m = X_m / 2\Pi f; \quad L_2 = X_2 / 2\Pi f; \quad L_1 = X_1 / 2\Pi f;$$

$$K_{ом} = U_{эм} / I_{макс}; \quad K_{of} = f_{макс} / U1.$$

Выполнение лабораторной работы

1 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки.

2 Рассчитать по паспортным данным статические и динамические характеристики системы ТПЧ–АД.

3 Для $W = 0,5$ и $1W_n$ снять статические характеристики $W = f(M)$. Регулирование статического момента осуществляется изменением тока возбуждения двигателя постоянного тока $M2$.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Краткий обзор изученных вопросов.

3 Схема электрическая принципиальная лабораторной установки.

4 Расчет статических характеристик.

5 Основные расчетные формулы.

6 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Принцип действия и назначение узлов тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ).
- 2 Области применения ТПЧ. Типы комплексных ТПЧ.
- 3 Принцип вертикального управления в СИФУ.
- 4 Показатели качества, характеризующие работу системы в динамических режимах. Их определение.
- 5 Основные различия между статическими характеристиками разомкнутой и замкнутой системами ТПЧ–АД.
- 6 Какой привод называют регулируемым?
- 7 Какие величины определяют качественные показатели регулируемого ЭП при работе его в статических и динамических режимах?
- 8 Что называется частотой среза в логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) и что можно по ней определить?
- 9 Можно ли в приводе обойтись одним контуром тока или контуром скорости?

11 Лабораторная работа № 11. Исследование трёхконтурной системы электропривода постоянного тока

Цель работы: изучение принципа работы и построения трехконтурной системы управления электродвигателем; расчет и настройка регуляторов; моделирование системы в среде Simulink (MatLab).

Теоретические сведения

Данные двигателя для моделируемой системы.

Тип: ПБСТ-23МУХЛ4.

Номинальное напряжение: 220 В.

Номинальный ток: 7,2 А.

Номинальная мощность: 1,3 кВт.

Возбуждение: независимое.

Напряжение обмотки возбуждения: 220 В.

Ток обмотки возбуждения: 0,31 А.

КПД: 80,3 %.

Номинальная скорость вращения: 3000/1000 об/мин.

Режим работы: S1.

11.1 Расчетная часть

11.1.1 *Функциональный анализ и составление функциональной схемы системы автоматического регулирования (САР).*

Функциональная схема 3-контурной системы регулирования имеет вид, представленный на рисунке 11.1.

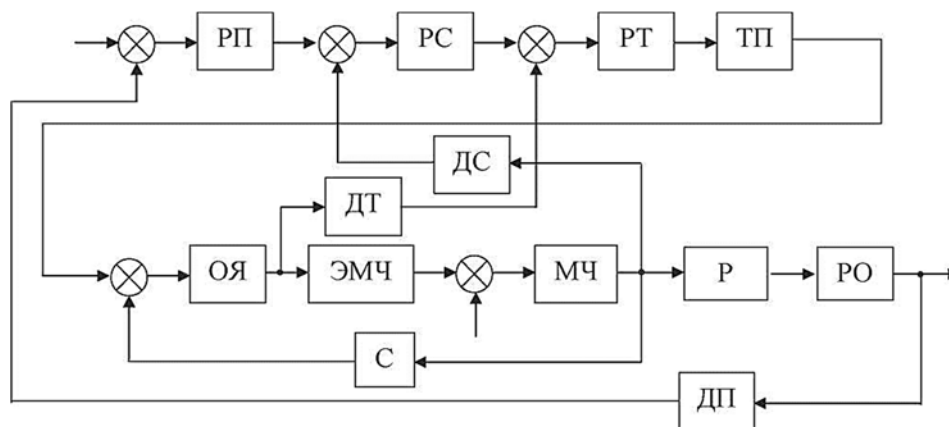


Рисунок 11.1 – Функциональная схема 3-контурной системы регулирования

Входными сигналами регулятора положения являются: сигнал задания положения и отрицательный сигнал, поступающий от датчика положения. Далее сигнал регулятора положения поступает на регулятор скорости.

Входными сигналами регулятора скорости являются: сигнал задания скорости и отрицательный сигнал, поступающий от датчика скорости. Далее сигнал регулятора скорости поступает на регулятор тока, на который также поступает сигнал от датчика тока.

Выходной сигнал регулятора тока является управляющим для ТП. ТП состоит из блока управления (СИФУ) и силовой части (УВ). Выходной величиной преобразователя является напряжение якоря ДПТ (в нашем случае – машины $M1$). С помощью изменения напряжения якоря производится изменение электромагнитного момента ДПТ, а следовательно, и скорости. $M1$ через редуктор вращает валик.

11.1.2 *Математическое описание элементов САР и определение их передаточных функций.*

11.1.2.1 Тиристорный преобразователь.

Тиристорный преобразователь в зависимости от типа управления группами вентилях, возможности реверса, режима его работы, описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Если рассматривать его как элемент системы управления, то его динамика отличается следующими особенностями:

- 1) преобразователь управляется не непрерывно, а дискретно;
- 2) преобразователь является полууправляемым устройством, т. к. тиристор открывается в момент подачи управляющего импульса, а закрывается – когда ток, протекающий через него, станет равным нулю.

Нелинейность ТП вызывает появление низкочастотных биений при воздействии сигналов с частотой, большей частоты питающей сети, субгармонических колебаний в замкнутых системах, при попытке организовать высокое быстродействие. Поэтому ТП, работающий в режиме непрерывного тока, с достаточной точностью можно представить одним динамическим безинерционным звеном с чистым запаздыванием, передаточная функция которого имеет вид:

$$W_{ТП}(p) = k_{ТП} \cdot e^{-\tau_3 \cdot p}, \quad (11.1)$$

где τ_3 – общее время запаздывания, $\tau_3 = \tau_{cn} + \tau_{yy}$;

τ_{yy} – время запаздывания устройства управления, которое принимают равным: $\tau_{yy} = 0,07$ – для полупроводниково-емкостного устройства; $\tau_{yy} = 0$ – для СИФУ вертикального типа;

τ_{cn} – время запаздывания силового преобразователя, которое принимается равным половине максимального времени запаздывания:

$$\tau_{cn} = \frac{1}{2 \cdot f_{сети} \cdot m_6}, \quad (11.2)$$

где $f_{сети}$ – частота сети;

m_6 – число фаз выпрямления.

С достаточной точностью ТП, работающий в режиме непрерывного тока, можно представить инерционным звеном:

$$W_{ТП}(p) = \frac{K_{ТП}}{T_{ТП} \cdot p + 1}. \quad (11.3)$$

Если блок управления тиристорами имеет на входе фильтр для защиты от высокочастотных помех, то передаточная функция ТП примет вид:

$$W_{ТП}(p) = \frac{K_{ТП}}{(T_{ТП} \cdot p + 1) \cdot (T_{\phi} \cdot p + 1)}. \quad (11.4)$$

Если нет данных о постоянной времени фильтра, то её можно принять равной $T_{\phi} = 0,005 \dots 0,01$ с.

Для упрощения расчетов ТП представляется инерционным звеном с передаточной функцией:

$$W_{mn}(p) = \frac{k_{mn}}{T_{mn} \cdot p + 1}. \quad (11.5)$$

Выполнение лабораторной работы

- 1 Ознакомиться с электрооборудованием лабораторной установки.
- 2 Рассчитать по паспортным данным статические и динамические характеристики трёхконтурной системы регулирования.
- 3 Для $W = 0,5$ и $1W_H$ снять статические характеристики $W = f(M)$. Регулирование статического момента осуществляется изменением тока возбуждения двигателя постоянного тока $M2$.
- 4 Составить модель трехконтурной системы регулирования и определить динамические показатели.

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Краткий обзор изученных вопросов.
- 3 Схема электрическая принципиальная лабораторной установки.
- 4 Расчет статических характеристик.
- 5 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Определение передаточного отношения редуктора.
- 2 Принцип действия фазочувствительного выпрямителя.
- 3 Назначение обратных связей в трехконтурной системе.
- 4 Назначение и принцип действия RC -цепей в ТП.
- 5 В чем различие между жесткой и гибкой обратными связями?
- 6 Какими параметрами характеризуется быстродействие трехконтурной системы?
- 7 Какое влияние оказывает положительная обратная связь по току якоря в трехконтурной системе регулирования?

12 Лабораторная работа № 12. Исследование позиционного электропривода

Цель работы: разработка алгоритма формирования управляющих сигналов для систем позиционного ЭП постоянного тока с независимым и нерегулируемым возбуждением.

Теоретические сведения

Следящим называется ЭП, который обеспечивает (воспроизводит) с заданной точностью движение ИО рабочей машины в соответствии с произвольно изменяющимся входным сигналом управления. Этот сигнал может изменяться в

широких пределах по произвольному временному закону и иметь механическую или электрическую природу. Чаще всего входной сигнал представляет собой скорость или угол поворота оси или вала задающего устройства. Следящий ЭП применяется для антенн радиотелескопов и систем спутниковой связи, в металлообрабатывающих станках, для привода роботов и манипуляторов, в автоматических измерительных устройствах и во многих других случаях.

Позиционный ЭП – частный случай следящего ЭП, когда требуется перемещение рабочего органа из одного фиксированного положения в другое за минимальное время без перерегулирования при высокой точности позиционирования без требований к точности траектории перемещения.

Наилучшим считается такой процесс обработки перемещения, при котором скорость изменяется по треугольному или трапецеидальному графику. Это позволяет в полной мере использовать перегрузочную способность двигателя и исключает перерегулирование по положению.

Различают три случая при перемещении:

- 1) малые перемещения без насыщения регуляторов;
- 2) средние перемещения при насыщении регулятора скорости;
- 3) большие перемещения при насыщении регулятора скорости и положения.

Позиционной системой (ПС) называется замкнутая по положению СУЭП, предназначенная для перевода исходно неподвижного ИО рабочего механизма из некоторого начального положения в заданное конечное с остановкой в конце перемещения. Традиционно ПС строится на основе трехконтурной СПР с внешним контуром регулирования положения и внутренними контурами регулирования скорости и тока.

Описание лабораторной установки

Лабораторный стенд, схема которого приведена на рисунке 12.1, предназначен для исследования статических и динамических характеристик следящего ЭП и позиционного ЭП постоянного тока.

Для снятия характеристик необходимо с помощью автоматических выключателей $QF1$ и $QF2$ подключить к сети двигатели $M1$ и $M2$. Соответственно, $M1$ – двигатель, задающий угол, а $M2$ – двигатель, обрабатывающий угол. Чтобы задать угол поворота (двигатель $M1$), необходимо включить магнитный пускатель. Для этого нужно нажать на $SB2$ – подается напряжение на катушку $KM1$ магнитного пускателя и его контакт зашунтируется, а силовая часть подключит к сети двигатель $M1$. В зависимости от того в какую сторону нужно произвести поворот (право или лево) нажимаем кнопку $SB3$ или $SB4$. При этом лампочки $HL1$ и $HL2$ сигнализируют о нажатии кнопок $SB3$ или $SB4$ и повороте двигателя. Через блок питания подается напряжение возбуждения на сельсин-датчик BE . При повороте двигателя $M1$ поворачивается ротор сельсин-датчика BE . Так как обмотка ротора в роторе создает поток, поворачивающийся вместе с ротором, то магнитный поток в обмотки возбуждения наводит соответствующее ЭДС в фазах обмотки статора, т. к. обмотки статора сельсин-датчика BE и сельсин-приемника BC соединены электрически, то это ЭДС

6 Экспериментально определить в установившемся режиме общую ошибку и скоростную ошибку.

7 С помощью осциллографа определить величину динамической ошибки при пуске системы.

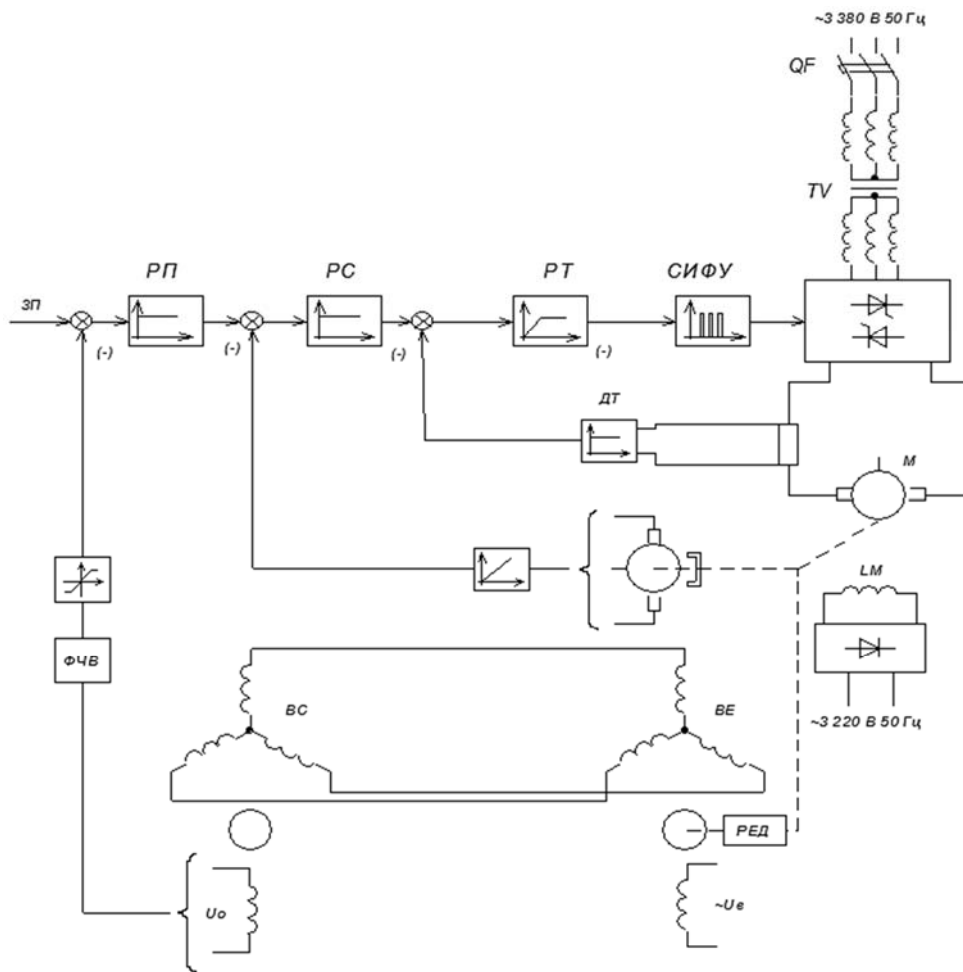


Рисунок 12.2 – Функциональная схема ЭП

Содержание отчета

- 1 Цель работы.
- 2 Краткий обзор изученных вопросов.
- 3 Схема электрическая принципиальная лабораторной установки.
- 4 Расчет настроек регуляторов тока и скорости.
- 5 Общий коэффициент усиления системы.
- 6 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое следящий электропривод?
- 2 Что такое позиционный электропривод?
- 3 Что такое позиционная система?
- 4 Какую функцию выполняет редуктор?

5 Назначение фазочувствительного выпрямителя.

6 Функции регуляторов тока и скорости.

7 Назначение датчика положения.

13 Лабораторная работа № 13. Исследование следящего электропривода

Цель работы: ознакомиться с устройством и принципом действия следящего ЭП постоянного тока; исследовать его в статических и динамических режимах.

Теоретические сведения

Описание лабораторной установки. Лабораторный стенд, схема которого приведена на рисунке 13.1, предназначен для исследования статических и динамических характеристик следящего ЭП постоянного тока.

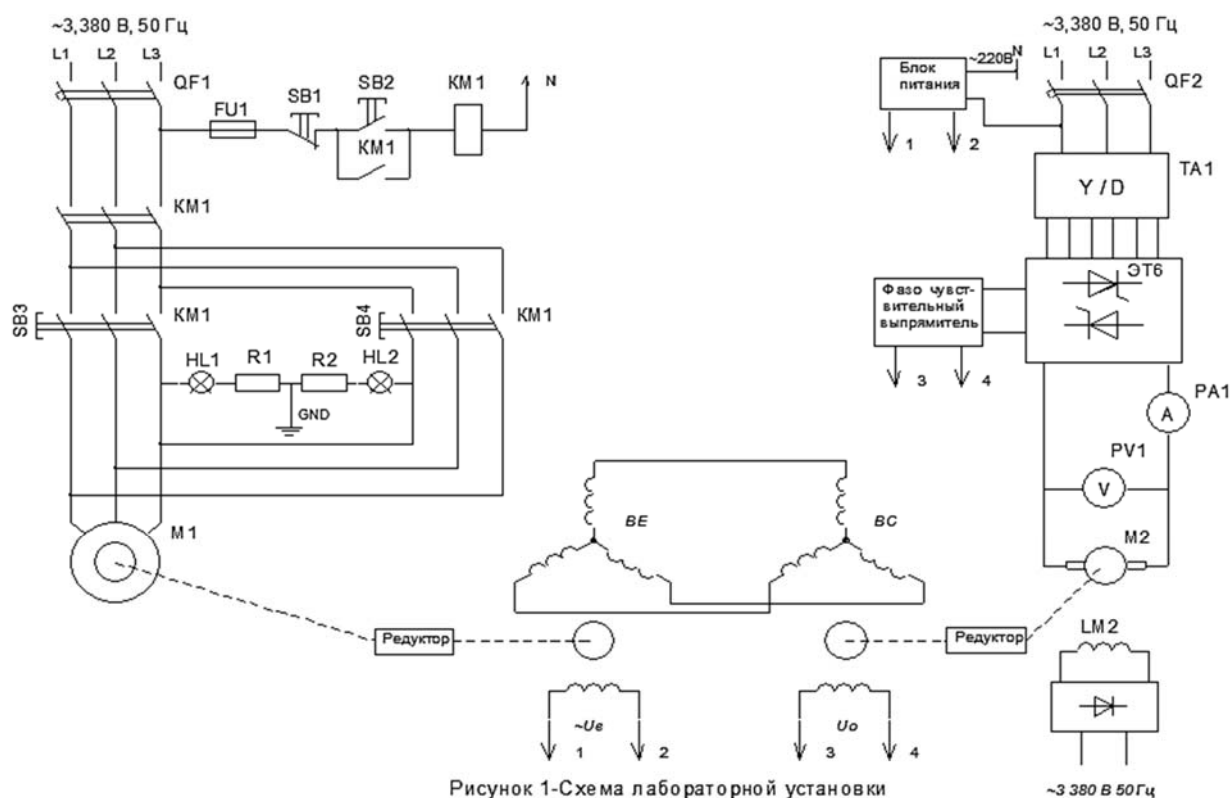


Рисунок 13.1 – Схема лабораторной установки

Для снятия характеристик необходимо с помощью автоматических выключателей $QF1$ и $QF2$ подключить к сети двигатели $M1$ и $M2$. Соответственно, $M1$ – двигатель, задающий угол, а $M2$ – двигатель, отрабатывающий угол. Чтобы задать угол поворота (двигатель $M1$), необходимо включить магнитный пускатель. Для этого нужно нажать на $SB2$ – подается напряжение на

катушку $KM1$ магнитного пускателя и его контакт зашунтируется, а силовая часть подключит к сети двигатель $M1$. В зависимости от того в какую сторону нужно произвести поворот (право или лево) нажимаем кнопку $SB3$ или $SB4$. При этом лампочки $HL1$ и $HL2$ сигнализируют о нажатии кнопок $SB3$ или $SB4$ и повороте двигателя. Через блок питания подается напряжение возбуждения на сельсин-датчик BE . При повороте двигателя $M1$ поворачивается ротор сельсин-датчика BE . Так как обмотка ротора в роторе создает поток, поворачивающийся вместе с ротором, то магнитный поток в обмотки возбуждения наводит соответствующее ЭДС в фазах обмотки статора, т. к. обмотки статора сельсин-датчика BE и сельсин-приемника BC соединены электрически, то это ЭДС возникает в обмотке статора сельсин-приемника BC , а на обмотке возбуждения, выполняющей роль обмотки управления, возникает выходное напряжение. Это напряжение поступает на фазочувствительный выпрямитель, а с него на преобразователь $ЭТ-6$. Преобразователь включает двигатель $M2$. Тот, вращаясь, поворачивает ротор сельсин-приемника BC , тем самым уменьшая рассогласование углов BE и BC , отрабатывая угол поворота. Требуемые характеристики необходимо построить посредством данных, полученных с помощью измерительных приборов, находящихся в цепи ДПТ: амперметра $PA1$ и вольтметра $PV1$.
Функциональная схема исследуемой установки представлена на рисунке 13.2.

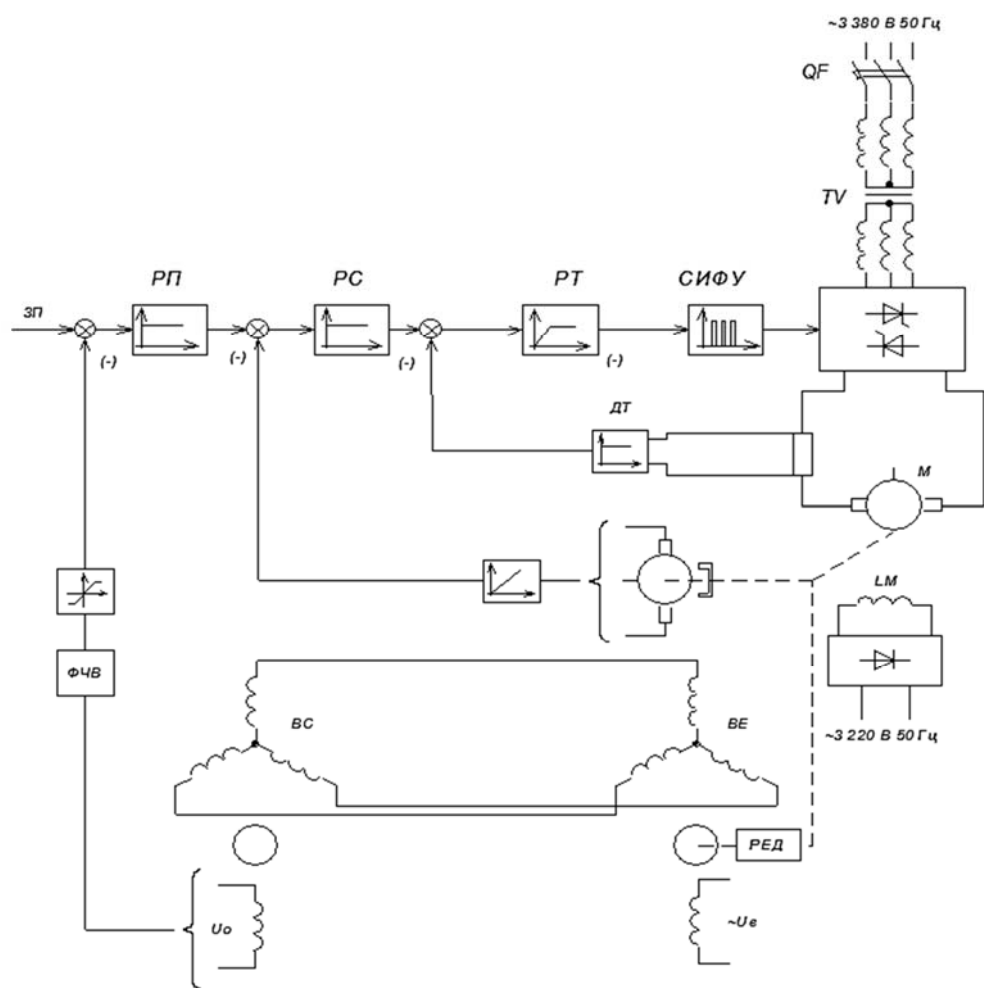


Рисунок 13.2 – Функциональная схема электропривода

В функциональную схему входят следующие блоки.

1 СИФУ – система импульсно-фазового управления управляемым выпрямителем, служащая для подачи отпирающих импульсов на тиристоры.

2 РТ – регулятор тока.

3 РС – регулятор скорости.

4 Регуляторы служат для преобразования управляющего сигнала, соответствующего математическим операциям, требуемым по условиям работы системы регулирования. К типовым требуемым операциям относится следующее: преобразование сигнала пропорциональное, пропорционально-интегральное.

5 РП – регулятор положения.

6 ДТ – датчик тока. Назначением датчика тока, включенного на шунт, является преобразование тока якоря в пропорциональное ему напряжение, соответствующее уровню стандартного напряжения элементов системы управления, а также гальваническая развязка силовой цепи и цепи управления.

7 ДС – датчик скорости. Назначением датчика скорости является преобразование скорости вращения двигателя в пропорциональное ему напряжение, соответствующее уровню стандартного напряжения элементов системы управления.

8 ДП – датчик положения. Назначением датчика положения является преобразование положения вала двигателя в пропорциональное ему напряжение, соответствующее уровню стандартного напряжения элементов системы управления.

9 UZ1 – управляемый выпрямитель ЭТ-6.

Входными сигналами регулятора положения являются: сигнал задания положения и отрицательный сигнал, поступающий от датчика положения. Далее сигнал регулятора положения поступает на регулятор скорости.

Входными сигналами регулятора скорости являются: сигнал задания скорости и отрицательный сигнал, поступающий от датчика скорости. Далее сигнал регулятора скорости поступает на регулятор тока, на который также поступает сигнал от датчика тока.

Выходной сигнал регулятора тока является управляющим для ТП. ТП состоит из блока управления (СИФУ) и силовой части (УВ). Выходной величиной преобразователя является напряжение якоря ДПТ (в нашем случае – машины $M1$). С помощью изменения напряжения якоря производится изменение электромагнитного момента ДПТ, а следовательно, и скорости. $M1$ через редуктор вращает валик.

Структурная схема следящей системы исследуемой установки представлена на рисунке 13.3.

Достоинствами следящих ЭП релейного принципа действия являются их простота, надежность и возможность получения оптимальных траекторий движения ИО рабочих машин.

К *недостаткам* таких систем следует отнести их склонность к колебаниям и наличие определенной нечувствительности (неточности) при слежении.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое следящий электропривод?
- 2 Из каких основных узлов состоит следящий электропривод?
- 3 Начертить структурную схему следящего электропривода.
- 4 Что такое добротность следящей системы?
- 5 Что такое передаточный коэффициент и как он определяется для различных элементов системы?
- 6 От чего зависит ошибка слежения?
- 7 Для чего служит сельсин-приемник и сельсин-датчик?
- 8 Какую функцию выполняет редуктор?
- 9 Назначение фазочувствительного выпрямителя.
- 10 Функции регуляторов тока и скорости.
- 11 Назначение датчика положения.

Список литературы

- 1 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод: учебник / Г. Б. Онищенко. – Москва: Академия, 2013. – 288 с.
- 2 **Епифанов, А. П.** Электропривод в сельском хозяйстве: учебное пособие / А. П. Епифанов, А. Г. Гуцинский, Л. М. Малайчук. – Санкт-Петербург: Лань, 2015. – 224 с.
- 3 **Москаленко, В. В.** Электрический привод: учебник / В. В. Москаленко. – Москва: Академия, 2009. – 368 с.
- 4 **Епифанов, А. П.** Основы электропривода: учебное пособие / А. П. Епифанов. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 192 с.
- 5 **Ильинский, Н. Ф.** Основы электропривода: учебное пособие / Н. Ф. Ильинский. – Москва: МЭИ, 2007. – 222 с.
- 6 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
- 7 **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока: учебник / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
- 8 **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учебное пособие / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с.
- 9 **Клиначев, Н. В.** Теория систем автоматического регулирования: учебно-методический комплекс / Н. В. Клиначев. – Москва: Академия, 2005.