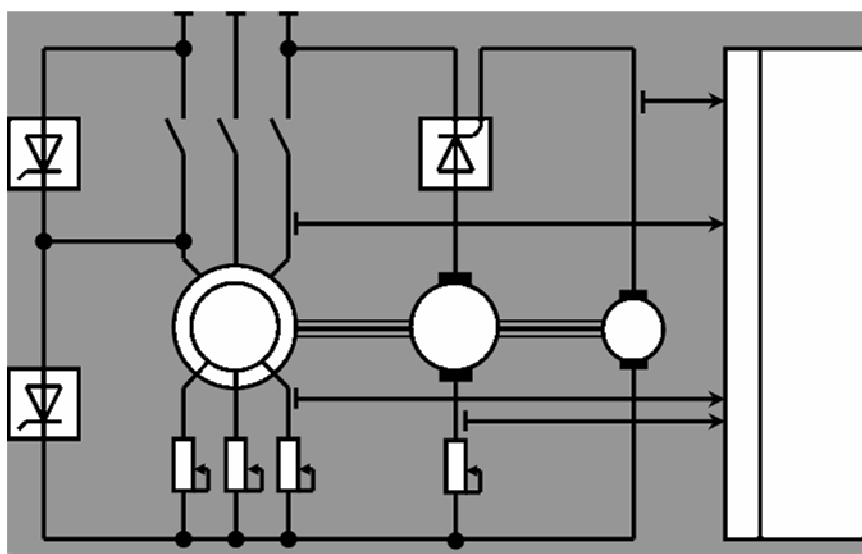


А.В. МИЩЕНКО, Н.П. МОТОРИНА

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА



◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

А.В. МИЩЕНКО, Н.П. МОТОРИНА

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Утверждено Учёным советом университета в качестве лабораторного практикума для студентов, обучающихся по специальностям 140211, 140103, 110302 всех форм обучения



Тамбов
Издательство ТГТУ
2008

УДК 313.333
ББК Z261.5я73-5
М717

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор ГНУ ВИИТиН
А.М. Шувалов

Доктор технических наук, профессор
кафедры «Радиоэлектронные системы бытового назначения» ТГТУ
Т.И. Чернышова

Мищенко, А.В.

М717 Электромеханика : лабораторный практикум / А.В. Мищенко,
Н.П. Моторина. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. –
80 с. – 150 экз. – ISBN 978-5-8265-0733-9.

Содержит новую методику изучения силовых электрических преобразователей с помощью структурно-логических схем и универсальных лабораторных стендов серии УСЭМ, разработанных в ТГТУ.

Приведены схемы и порядок исследований силовых электрических преобразователей (СЭП), а также рассмотрены принципы построения частотных преобразователей с векторным управлением и их использование для регулирования асинхронных двигателей.

Составлен в соответствии с требованиями учебных программ по дисциплинам «Электрические машины» и «Электромеханика». Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям 140211, 140106, 110302 всех форм обучения.

УДК 313.333
ББК Z261.5я73-5

ISBN 978-5-8265-0733-9

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2008

Учебное издание

МИЩЕНКО Анатолий Васильевич,
МОТОРИНА Наталья Петровна

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Лабораторный практикум

Редактор О.М. Ярцева
Инженер по компьютерному макетированию Т.А. Сыноква

Подписано в печать 20.10.2008.
Формат 60 × 84/16. 4,65 усл. печ. л.
Тираж 150 экз. Заказ № 458

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития нашей цивилизации, да и в обозримом будущем, электрическая энергия является основным видом энергии для человеческой деятельности. Электрические силовые и информационные преобразователи в современном машинном производстве определяют уровень развития общества. Основу электроэнергетики составляют силовые электрические преобразователи (СЭП) (синхронные генераторы, трансформаторы, электродвигатели переменного и постоянного тока), которые изучаются в курсах «Электрические машины» и «Электромеханика». Информационные и технологические преобразователи изучаются в соответствующих курсах.

Приоритет электрических преобразователей в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в быту объясняется их существенными преимуществами, основными из которых являются: высокий коэффициент полезного действия, экологическая чистота, простота подвода энергии, высокая степень управляемости, обратимость и широкий диапазон мощностей.

Новые технологии и технологические установки, автоматизированные поточные линии образуют сложные системы, в состав которых часто входят биологические объекты. Электрические преобразователи наиболее полно отвечают требованиям этих систем, так как сами обладают рядом свойств биологических объектов:

1. **Наличие возбуждения** (магнитного потока). Причём генераторы могут иметь как независимое, так и самовозбуждение. Трансформаторы и асинхронные электродвигатели работают по принципу самовозбуждения.

2. **Саморегулирование основных параметров** (магнитный поток, ЭДС, частота вращения) достигается внутренними обратными связями, которые образуют соответствующие внутренние системы автоматического регулирования (САР).

3. **Автоматическое регулирование потребляемой мощности при изменении нагрузки.** Последнее отчётливо заметно при сравнении управления электродвигателем и двигателем внутреннего сгорания автомобиля, где при изменении нагрузки водитель регулирует потребляемую мощность (количество подаваемого топлива). В этих же условиях электродвигатель берёт необходимую мощность из сети.

4. **Реакция на внешние возмущения.** Например, изменение параметров питающей сети или нагрузки для электродвигателя вызывает изменения момента и частоты вращения.

5. **Обратимость СЭП общеизвестна.** Существует множество примеров обратимости биологических объектов.

Производственные технологические установки, как правило, представляют собой набор соответствующих преобразователей. Поэтому в учебном процессе основной объём специальной подготовки инженеров занимает теоретическое и практическое изучение различных преобразователей.

На кафедре «Электрооборудование и автоматизация» ТГТУ в целях совершенствования методики изучения СЭП были разработаны структурно-логические схемы (СЛС) силовых электрических преобразователей [1].

СЛС – это схема, содержащая последовательность преобразований всех параметров в элементарных звеньях данного преобразователя, а также прямые и обратные связи между ними и удовлетворяющая основным аналитическим выражениям для данного преобразователя. Одновременно СЛС является функциональной схемой системы автоматического регулирования (САР) данного преобразователя. Например, в трансформаторе (см. рис. 1.2) подводимое напряжение U – первопричина всех рабочих процессов, т.е. с точки зрения теории автоматического регулирования U является задающим параметром. Уравнения электрического равновесия I-й и II-й обмоток, уравнения токов и магнитных потоков, а также реальный процесс саморегулирования позволяют представить СЛС в виде замкнутой системы автоматического регулирования с последовательным включением регуляторов (регулирующее воздействие предыдущего является задающим для последующего регулятора).

Последовательное включение регуляторов в теории автоматического регулирования считается наиболее рациональным, так как стабилизация и ограничение последующих параметров обеспечиваются задающими величинами предыдущих регуляторов. С другой стороны, внутренние связи не создавались изобретателями и конструкторами. Они – суть совершенных устройств.

Объём информации, получаемый от СЛС, достаточен для понимания основных процессов, происходящих в данном преобразователе. Для анализа его динамических свойств необходимо введение математического описания (передаточных функций) всех элементарных звеньев, т.е. СЛС является первым этапом построения структурно-логической модели (СЛМ) данного преобразователя. Анализ и синтез СЛМ преобразователей позволяет решать как учебные, так и исследовательские и конструкторские задачи.

Для практического изучения большого разнообразия силовых электрических преобразователей требуется большое количество стендов для исследований и большие учебные площади для лабораторий.

В настоящее время вузы оснащаются универсальными стендами, позволяющими выполнять фронтально исследования и лабораторные работы и экономить учебные площади лабораторий. В основу построения универсальных стендов положены различные принципы:

1. Комплектация стендов всеми видами преобразователей. При этом используются микромашины мощностью десятки ватт и механические нагрузочные устройства. Основным недостатком таких стендов является большое отличие рабочих характеристик от реальных промышленных преобразователей.

2. Использование на стендах сменных электрических двигателей и генераторов, что увеличивает время подготовки и выполнения лабораторных работ, а также требует отдельной площади для сменных преобразователей.

3. Принцип, использующий многофункциональность и обратимость электрических преобразователей, а также свойства силового тиристорного преобразователя.

По последнему принципу разработаны и построены универсальные стенды типа УСЭМ на кафедре «Электрооборудование и автоматизация» ТГТУ (рис. 1.1, табл. 1).

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПО
«ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ» И «ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ»
УСЭМ-2**

1. Назначение: фронтальное выполнение исследований электрических преобразователей.

- 1.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.
- 1.2. Асинхронный двигатель с фазным ротором.
- 1.3. Однофазный трансформатор.
- 1.4. Трёхфазный трансформатор.
- 1.5. Синхронный генератор.
- 1.6. Синхронный двигатель.
- 1.7. Генератор постоянного напряжения независимого возбуждения.
- 1.8. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения.
- 1.9. Система «Тиристорный преобразователь-двигатель» (ТП-Д).
- 1.10. Система «машинный частотный преобразователь-двигатель».
- 1.11. Индукционный регулятор.
- 1.12. Асинхронный двигатель в режиме динамического торможения постоянным током.
- 1.13. Асинхронный двигатель в режиме индукционно-динамического торможения.
- 1.14. Двигатель постоянного тока в режиме динамического торможения.
- 1.15. Трёхфазный асинхронный двигатель в однофазном режиме.
- 1.16. Фазорегулятор.
- 1.17. Синхронный компенсатор.
- 1.18. Асинхронный двигатель (построение рабочих характеристик по круговой диаграмме).
- 1.19. Частотный преобразователь с векторным управлением.

2. Цель.

- 2.1. Увеличение количества проводимых исследований и лабораторных работ.
- 2.2. Уменьшение учебно-лабораторных площадей.

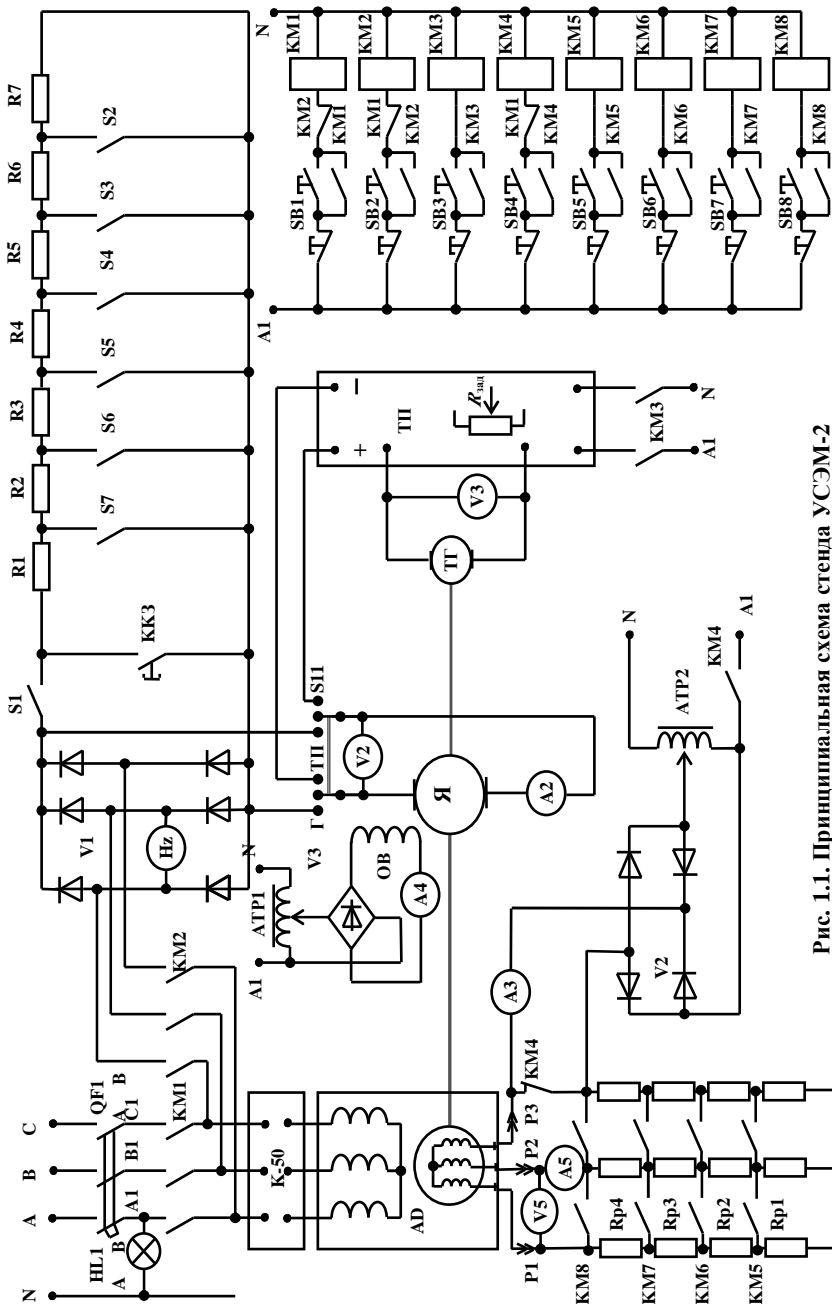


Рис. 1.1. Принципиальная схема стенда УСЭМ-2

1. Рабочая таблица стенда УСЭМ-2

Лабораторные работы	Коммутационные аппараты													Регулируемые аппараты			Измерительные приборы										
	QF1	S11	S1-S7	KK3	KM1 SB1	KM2 SB2	KM3 SB3	KM4 SB4	KM4 SB5	KM6 SB6	KM7 SB7	KM8 SB8	P1, P2, P3	R _{нал}	АТР1	АТР2	V1	V2	V3	V5	A1	A2	A3	A4	A5	Hz	W1
1. Асинхронный КЗ двигатель	×	Г	×	-	×	-	-	-	×	×	×	×	-	-	×	-	×	×	×	-	×	×	-	×	-	-	×
2. Асинхронный двигатель с фазным ротором	×	Г	×	-	×	-	-	-	×	×	×	×	-	-	×	-	×	×	×	×	×	×	-	×	×	-	×
3. Однофазный трансформатор	×	Г	-	-	×	-	-	-	×	×	×	×	×	-	×	-	×	-	-	×	×	-	-	-	×	-	×
4. Трёхфазный трансформатор	×	Г	-	-	×	-	-	-	×	×	×	×	×	-	×	-	×	-	-	×	×	-	-	-	×	-	×
5. Синхронный генератор	×	ТП	×	×	-	×	×	×	-	-	-	-	-	×	×	×	×	×	-	-	×	×	×	×	-	×	×
6. Синхронный двигатель	×	Г	×	-	×	-	-	×	×	×	×	×	-	-	×	×	×	×	×	-	×	×	×	×	-	-	×
7. Генератор постоянного напряжения	×	Г	×	-	×	-	-	-	×	×	×	×	-	-	×	-	×	×	×	-	×	×	-	×	-	-	×
8. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения	×	ТП	×	-	-	-	×	-	-	-	-	-	-	×	×	-	×	×	×	-	×	×	-	×	-	-	×
9. Система ТП-Д	×	ТП	×	-	-	-	×	-	-	-	-	-	-	×	×	-	×	×	×	-	×	×	-	×	-	-	×
10. Частотный машинный преобразователь	×	ТП	-	-	-	×	×	×	-	-	-	-	-	×	×	-	×	×	×	-	×	×	×	×	-	×	×
11. Фазорегулятор	×	Г	-	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	-	×	-	-
12. Динамическое торможение асинхронного двигателя	×	ТП	-	-	-	-	×	-	×	×	×	×	-	×	×	×	-	-	×	×	-	-	-	×	×	-	-
13. Динамическое торможение двигателя постоянного тока	×	Г	-	-	×	-	-	-	×	×	×	×	-	-	×	-	-	-	×	-	-	-	-	×	-	-	×
14. Индукционно-динамическое торможение АД	×	ТП	-	-	-	-	×	×	×	×	×	×	-	×	×	-	-	-	×	×	-	-	-	-	-	-	-

2.3. Повышение научно-теоретического уровня проводимых работ.

2.4. Фронтальное выполнение всех лабораторных работ.

3. Принцип построения стенда.

Конструктивной базой стенда являются двухмашинный агрегат, тиристорный преобразователь, векторный преобразователь частоты со встроенным PLC-контроллером и персональный компьютер. Минимальное количество конструктивных элементов достигнуто за счёт реализации разработанных схемных решений, принципов обратимости и многофункциональности электрических преобразователей.

4. Состав стенда.

4.1. Асинхронный двигатель с фазным ротором (МТ-012-6; $P_{2н} = 2,2$ кВт; $n_{2н} = 890$ об/мин; $U_p = 142$ В; $I_p = 11,5$ А; ПВ = 25 %; $I_{нн} = 13/7,5$ А).

4.2. Машина постоянного тока (П-41; $P_{2н} = 3,2$ кВт; $U = 220$ В; $I = 18$ А; $n = 1500$ об/мин).

4.3. Тиристорный преобразователь (ЭПУ2-1).

4.4. Тахогенератор (ТМГ-30П).

4.5. Нагрузочное устройство (спец.).

4.6. Лабораторные автотрансформаторы (АОСН-8-220).

4.7. Измерительный комплект (К-505 или К-50).

4.8. Пускозащитные и коммутационные аппараты (АП50-3МТ; ПМЛ-211; РТГ-141; УП-5300; КУ-1).

4.9. Выпрямительные мосты (Д-246).

4.10. Измерительные приборы (М-42100).

4.11. Персональный компьютер.

4.12. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи.

4.13. Векторный преобразователь частоты со встроенным PLC-контроллером типа E2-8300-002H.

5. Разработка.

Стенд спроектирован и изготовлен в лаборатории «Электрические машины и электропривод» кафедры «Электрооборудование и автоматизация» (ЭИА) ТГТУ под руководством канд. техн. наук, доцента А.В. Мищенко.

6. Актуальность.

Невозможность размещения лабораторных стендов всех электрических преобразователей, с учётом фронтального выполнения работ, на реальных учебных площадях. Большое количество стендов требует больших затрат. Поэтому данная разработка необходима и актуальна.

7. Научно-техническая новизна.

Кроме лабораторных работ, предусмотренных учебным планом (10 – 12 наименований), стенд обеспечивает научно-исследовательский уровень проводимых работ – исследования структурно-логических моделей электрических преобразователей, их анализ и синтез, а также проверку адекватности физическим моделям.

8. Апробация.

8.1. Успешная эксплуатация стенда в лаборатории электрических машин в течение 18 лет.

8.2. Диплом 1-й степени региональной выставки «Вузы Черноземья» (1988 г.).

8.3. Отмечен на всероссийском конкурсе «Учебная техника» за «высокий научно-технический уровень» (1998 г.)

9. Значение стенда УСЭМ-2.

9.1. Возможность фронтального выполнения лабораторных работ (10 – 12 наименований) согласно учебному плану, а также при комплектовании дополнительными устройствами количество выполняемых работ можно довести до 24 наименований.

9.2. Стенд позволяет выполнять исследования и лабораторные работы по автоматизированному электроприводу с исследованием замкнутых систем автоматического регулирования, их анализа и синтеза.

9.3. Компьютерный анализ рабочих, регулировочных и тормозных характеристик электрических преобразователей позволяет работать в системе дистанционного обучения.

9.4. Повышение информативности о скрытых физических процессах электрических преобразователей.

9.5. Экономия средств за счёт резкого снижения количества стендов.

ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Ц е л ь р а б о т ы : изучить характеристики трансформатора и определить параметры схем замещения.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2]

Трансформатор – преобразователь напряжения электрической энергии, содержащий две или больше индуктивно связанных обмоток, предназначенный для преобразования параметров системы переменного тока при постоянной частоте.

Под действием приложенного напряжения U_1 в первичной обмотке возникает ток I_1 и возбуждает изменяющийся магнитный поток Φ , который замыкается по магнитопроводу (сердечнику) трансформатора. Магнитный поток индуцирует ЭДС в первичной (E_1) и во вторичной (E_2) обмотках. Действующие значения для трансформаторных ЭДС:

$$E_1 = 4,44w_1f_1\Phi_{\max}; \quad (1.1)$$

$$E_2 = 4,44w_2f_1\Phi_{\max}, \quad (1.2)$$

где Φ_{\max} – амплитуда магнитного потока; w_1, w_2 – число витков соответственно первичной и вторичной обмоток.

ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ [2]

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1x_1 + \dot{I}_1r_1; \quad (1.3)$$

$$F_1 = I_1w_1; \quad (1.4)$$

$$\dot{\Phi}_0 = \dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2; \quad (1.5)$$

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_{\text{кн}}}{\beta S_{\text{н}} \cos \varphi_2 + \Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_{\text{кн}}}; \quad (1.6)$$

$$\Delta U = \beta(U_{\text{ка}} \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}} \sin \varphi_2); \quad (1.7)$$

$$P_2 = \sqrt{3}U_{2\text{н}}I_{2\text{н}} \cos \varphi; \quad (1.8)$$

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2x'_2 - \dot{I}'_2r'_2; \quad (1.9)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \right); \quad (1.10)$$

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1}; \quad (1.11)$$

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{кн}}}}. \quad (1.12)$$

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА [1]

Структурно-логическая схема трансформатора содержит четыре компаратора (по числу уравнений равновесия) (рис. 1.2).

1. K_1 – уравнение электрического баланса 1-й обмотки.
2. K_2 – уравнение токов.
3. K_3 – уравнение магнитного баланса.
4. K_4 – уравнение электрического баланса 2-й обмотки.

Напряжение сети U_1 после сравнения с ЭДС 1-й обмотки создаёт ток 1-й обмотки I_1 . Результатом сравнения токов I_1 и I'_2 является ток холостого хода – I_0 , который через МДС 1-й обмотки F_1 создаёт магнитный поток Φ_1 . Алгебраическая сумма потоков Φ_1 и Φ_2 , равная результирующему потоку Φ_0 , поддерживается постоянной за счет отрицательной обратной связи по

МДС F_2 , пропорциональной току нагрузки I_2 . Постоянство результирующего магнитного потока при изменении тока нагрузки I_2 обеспечивает постоянство ЭДС обмоток. В этом суть саморегулирования трансформатора.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ (трансформатор ОС-1,1-220)

1. **Опыт холостого хода** (х.х.).
 - 1.1. Собрать схему для проведения опыта (рис. 1.3) при отключенном $R_{\text{ц}}$.
 - 1.2. Движок регулятора напряжения (ЛАТР) установить в крайнее положение против часовой стрелки.
 - 1.3. Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.
 - 1.4. Включить стенд и регулятором напряжения установить на первичной обмотке трансформатора $U_{\text{ном}} = 220$ В. Измерить напряжение х.х. первичной U_{10} и вторичной U_{20} обмоток, ток х.х. I_0 и мощность P_0 , потребляемую трансформатором, которая является мощностью потерь в стали.
 - 1.5. По результатам измерений рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1.5).
 - 1.6. Полученные результаты опыта занести в табл. 1.1.

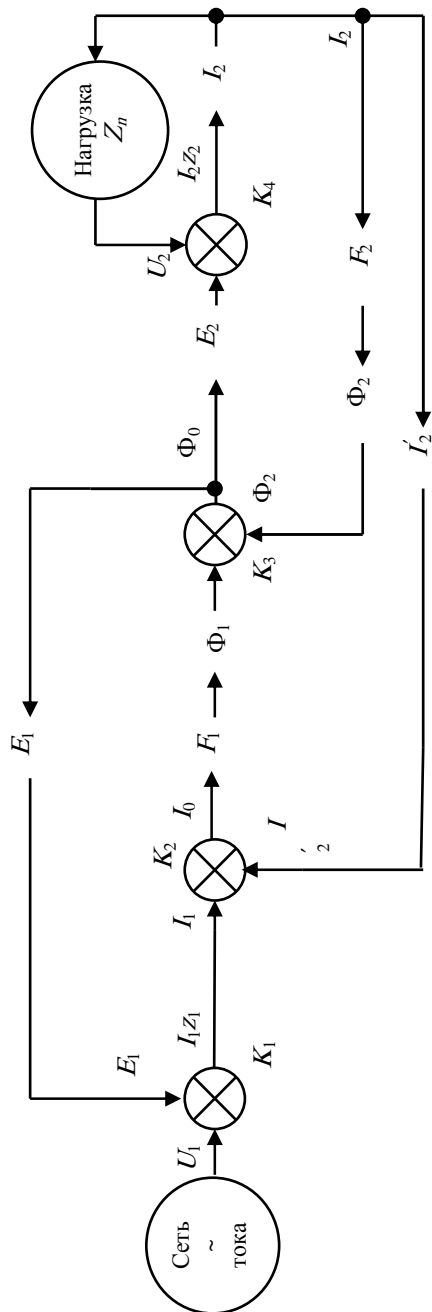


Рис. 1.2. Трансформатор (структурно-логическая схема преобразований)

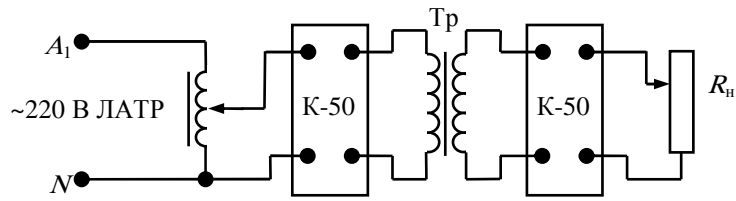


Рис. 1.3. Схема установки

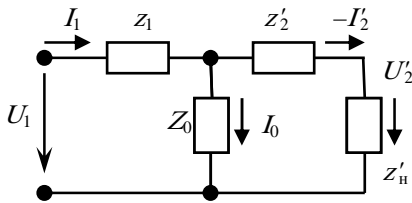


Рис. 1.4. Т-образная схема замещения трансформатора

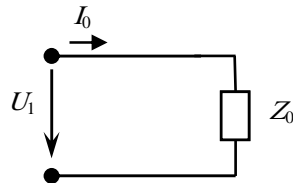


Рис. 1.5. Схема замещения трансформатора в к.з.

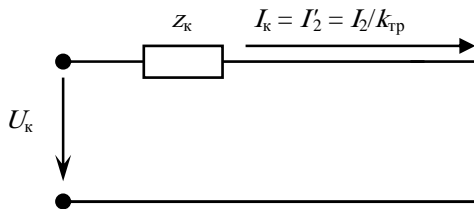


Рис. 1.6. Схема замещения трансформатора в к.з.

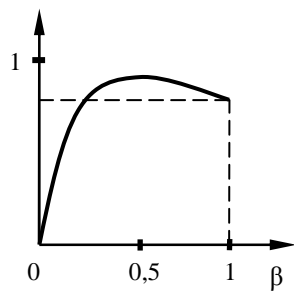


Рис. 1.7. Характеристика $\eta = \mathcal{A}(\beta)$

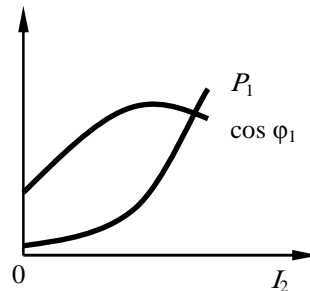


Рис. 1.8. Характеристики U_2 и $\cos \varphi_2 = \mathcal{A}(I_2)$

2. **Опыт короткого замыкания (к.з.).**

- 2.1. Собрать схему для проведения опыта к.з. (рис. 1.3) при $R_{н} = 0$.
- 2.2. Так как в начале опыта короткого замыкания U_1 должно быть равным нулю, перед закорачиванием вторичной обмотки необходимо в этом убедиться, измерив фактическую величину напряжения U_1 .
- 2.3. Установить переключатели K505 (K50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.
- 2.4. С помощью источника регулируемого напряжения установить на первичной обмотке трансформатора напряжение, при котором ток первичной обмотки I_1 достигает номинального значения $I_{1н}$. Необходимо учесть, что напряжение короткого замыкания не превышает 10 % от номинального значения $U_{1н}$.

Внимание! Повышать напряжение трансформатора следует осторожно и внимательно, так как при увеличении напряжения сверх допустимого значения можно вывести из строя электроизмерительные приборы и трансформатор. Показание вольтметра, включенного в первичную обмотку трансформатора, будет соответствовать напряжению короткого замыкания $U_{1к}$.

2.5. Измерить ток вторичной обмотки I_2 и мощность P_k , потребляемую трансформатором в опыте короткого замыкания, которая соответствует мощности потерь в меди.

2.6. По полученным данным рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1.6). Результаты опыта занести в табл. 1.2.

3. **Испытания трансформатора под нагрузкой.**

- 3.1. Собрать схему (рис. 1.3) при заданном $R_{н}$.
- 3.2. Установить переключатели K505 (K50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.
- 3.3. Подать на первичную обмотку трансформатора номинальное напряжение ($U_{1н} = 220$ В) и, изменяя ток сопротивлением нагрузки (резистор $R_{н}$), произвести следующие измерения: токи в первичной I_1 и вторичной I_2 обмоток, напряжение вторичной обмотки U_2 , мощности P_1 и P_2 (K505).
- 3.4. По полученным данным рассчитать степень загрузки трансформатора, значение КПД и $\cos \varphi_2$.
- 3.5. Данные занести в табл. 1.3. Построить графики зависимостей: $U_2 = f(\beta)$; $\cos \varphi_2 = f(\beta)$; $\eta = f(\beta)$.

Таблица 1.1

№	Измерено				Вычислено				
	U_{10} , В	U_{20} , В	I_0 , А	P_0 , Вт	Z_0 , Ом	R_0 , Ом	x_0 , Ом	k	$\cos \varphi_0$
1									
2									
3									
4									
5									

Таблица 1.2

Измерено				Вычислено			
$U_{1к}$, В	I_1 , А	I_2 , А	P_k , Вт	z_k , Ом	R_k , Ом	x_k , Ом	$\cos \varphi_k$

Таблица 1.3

№	Измерено						Вычислено		
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	P_2 , Вт	β	$\cos \varphi_2$	η
1									
2									
3									
4									
5									

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ (АД с фазным ротором МТ-012-6)

1. Опыт холостого хода (х.х.).

1.1. Собрать схему для проведения опыта холостого хода (рис. 1.9).

1.2. Движок ЛАТРа установить в крайнее положение против часовой стрелки.

1.3. Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

1.4. Подать напряжение на ЛАТР и установить на его выходе, т.е. на первичной обмотке трансформатора, напряжение U_1 , контролируя его по показаниям вольтметра V_1 (К50).

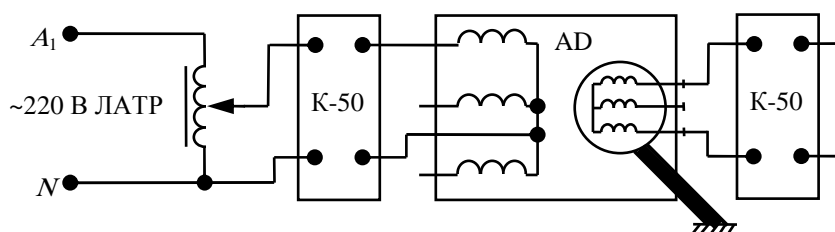


Рис. 1.9. Схема опыта холостого хода трансформатора на основе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФ)

1.5. Измерить напряжение холостого хода на вторичной обмотке трансформатора U_{20} , ток холостого хода I_0 и мощность P_0 , потребляемую трансформатором из сети, которая является мощностью потерь в стали. Данные снимать с приборов V_2 , A_1 , W_1 (К50) соответственно. Результаты занести в табл. 1.4.

1.6. Изменить напряжение U_1 и повторить п. 1.3 и 1.4.

1.7. По результатам измерений рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1.10), результаты занести в табл. 1.4.

2. Опыт короткого замыкания (к.з.).

2.1. Собрать схему для проведения опыта короткого замыкания (рис. 1.11).

Так как в начале опыта напряжение U_1 должно быть равно нулю, перед закорачиванием вторичной обмотки, необходимо в этом убедиться, измерив напряжение U_1 по вольтметру V_1 .

2.2. Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

2.3. С помощью ЛАТРа осторожно установить величину напряжения первичной обмотки U_1 , по вольтметру V_1 , при котором ток первичной обмотки I_1 , по амперметру A_1 , равен номинальному значению.

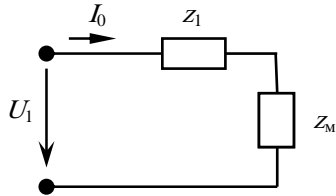


Рис. 1.10. Схема замещения трансформатора в опыте холостого хода на АДФ

Таблица 1.4

Измерено				Вычислено				
U_1 , В	I_0 , А	P_0 , Вт	U_{20} , В	Z_0 , Ом	R_0 , Ом	x_0 , Ом	k	$\cos \varphi_0$
120								
140								
160								
180								
200								
220								

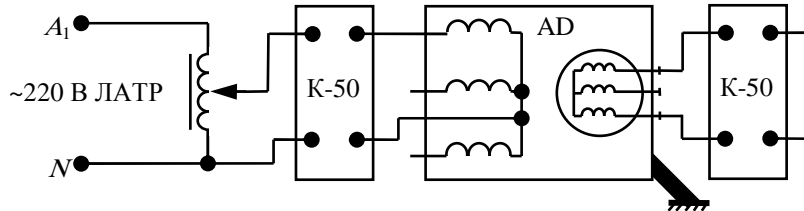


Рис. 1.11. Схема опыта короткого замыкания на основе АДФ

Необходимо учитывать, что напряжение короткого замыкания многократно меньше номинального.

Показание вольтметра V_1 будет соответствовать напряжению короткого замыкания $U_{1к}$.

2.4. Измерить ток вторичной обмотки I_2 и мощность P_k , потребляемую трансформатором в режиме короткого замыкания, которая соответствует мощности потерь в меди. Измерения проводить по приборам A_2 и W_1 , соответственно. Результаты опыта занести табл. 1.5.

2.5. По полученным данным рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1.12), результаты занести в табл. 1.5.

3. Испытание трансформатора под нагрузкой.

3.1. Собрать схему для испытания трансформатора под нагрузкой (рис. 1.13).

3.2. Установить переключатели K505 (K50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

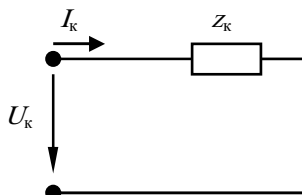


Рис. 1.12. Схема замещения опыта короткого замыкания трансформатора на основе АДФ

Таблица 1.5

Измерено				Вычислено			
$U_{1к}$, В	I_1 , А	I_2 , А	P_k , Вт	z_k , Ом	x_k , Ом	R_k , Ом	$\cos \varphi_k$

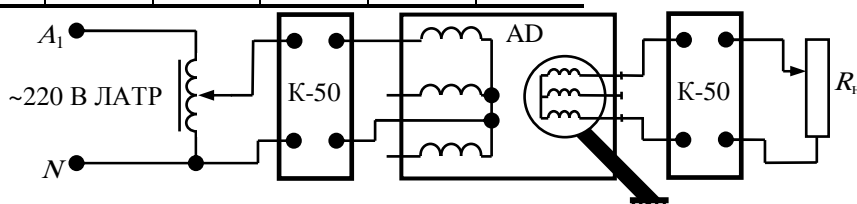


Рис. 1.13. Схема для опыта нагрузки трансформатора на основе АДФ

3.3. Подать на первичную обмотку трансформатора номинальное напряжение ($U_{1ном} = 220$ В), контролируя его по вольтметру V_1 .

3.4. Подключить к вторичной обмотке трансформатора сопротивление R_1 .

3.5. Произвести следующие измерения: ток в первичной обмотке I_1 по амперметру A_1 , ток вторичной обмотки I_2 по амперметру A_2 , напряжение вторичной обмотки U_2 по вольтметру V_2 , мощности P_1 и P_2 по ваттметрам W_1 и W_2 , соответственно. Результаты измерений занести в табл. 1.6.

3.6. Подключить к вторичной обмотке трансформатора сопротивление $R_1 + R_2$ и повторить измерения п. 3.4.

3.7. Подключить к вторичной обмотке трансформатора сопротивление $R_1 + R_2 + R_3$ и повторить измерения п. 3.4.

3.8. Подключить к вторичной обмотке трансформатора сопротивление $R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ и повторить измерения п. 3.4.

3.9. По полученным данным рассчитать степень загрузки трансформатора β , значение КПД (η), $\cos \varphi_2$, значения сопротивлений обмоток. Результаты занести в табл. 1.6. Построить графики зависимостей: $U_2 = f(\beta)$; $\cos \varphi_2 = f(\beta)$; $\eta = f(\beta)$.

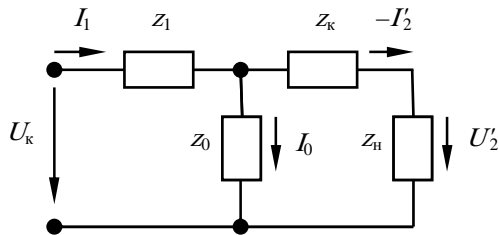


Рис. 1.14. Схема замещения трансформатора

Таблица 1.6

	Измерено						Вычислено								
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	P_2 , Вт	β	$\cos \varphi_2$	η	x_1 , Ом	r_1 , Ом	z_1 , Ом	x_2 , Ом	r_2 , Ом	z_2 , Ом
R_1															
$R_1 + R_2$															
$R_1 + R_2 + R_3$															
$R_1 + R_2 + R_3 + R_4$															

РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ [2]

$$z_0 = z_1 + z_{12} \approx z_{12} \approx U_{10} / I_0; \quad (1.13)$$

$$r_{12} = P_0 / I_0^2; \quad (1.14)$$

$$x_{12} = \sqrt{z_{12}^2 - r_{12}^2}; \quad (1.15)$$

$$\cos \varphi = P_0 / (U_{10} I_{10}); \quad (1.16)$$

$$z_k = z_1 + z'_2 = U_{1k} / I_{1k}; \quad (1.17)$$

$$r_k = r_1 + r'_2 = P_{1k} / I_{1k}^2; \quad (1.18)$$

$$x_k = x_1 + x'_2 = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}; \quad (1.19)$$

$$\cos \varphi_k = P_{1k} / (U_{1k} I_{1k}); \quad (1.20)$$

$$\beta = I_2 / I_{2н}; \quad (1.21)$$

$$\eta = P_2 / P_1 = \beta S_n \cos \varphi_2 / (\beta S_n \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0); \quad (1.22)$$

$$\cos \varphi_2 = P_2 / (U_2 I_2). \quad (1.23)$$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурно-логическая схема трансформатора.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Построенные графики зависимостей $U_2 = f(\beta)$; $\cos \varphi_2 = f(\beta)$; $\eta = f(\beta)$.
6. Выводы.
7. Список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
2. Опыт холостого хода и определяемые параметры.
3. Опыт короткого замыкания и определяемые параметры.
4. Внешняя характеристика трансформатора
5. Потери и КПД трансформатора.
6. Векторная диаграмма и аналитические зависимости для её построения.
7. Схема замещения трансформатора.
8. Связь ЭДС и магнитного потока трансформатора.
9. Что такое приведённый трансформатор?
10. Закон полного тока для трансформатора.
11. Уравнение электрического равновесия трансформатора.
12. Уравнения МДС и токов однофазного трансформатора.
13. Как определить начала и концы обмоток трансформатора?
14. Схемы и группы соединений обмоток трансформатора.
15. Как определяются приведённые параметры вторичной обмотки?
16. Способы охлаждения трансформаторов.
17. Каков результат включения трансформатора в сеть постоянного напряжения?
18. Конструктивное отличие обмоток высокого и низкого напряжений, обозначения их выводов.
19. Какими потерями пренебрегают при опытах короткого замыкания и холостого хода и почему?
20. Каково назначение измерительных трансформаторов?
21. Как определить опытным путём напряжение короткого замыкания?
22. Почему в технической характеристике трансформатора указывается полная номинальная мощность?
23. Какими параметрами определяется качество трансформаторного масла?
24. Как изменится магнитный поток трансформатора при уменьшении нагрузки, сечения магнитопровода, частоты питающей сети, индукции стали?
25. Как изменится ток холостого хода трансформатора при условиях п. 24?
26. Регулирование напряжения трансформаторов (принципы РВВ и РПН).
27. Трансформаторы специального назначения.
28. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.
29. Каковы преимущества трёхобмоточного трансформатора?
30. Как регулируют ток сварочных трансформаторов?

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Ц е л ь р а б о т ы : изучить особенности пуска в ход двигателей с короткозамкнутым ротором, получить опытным путём рабочие характеристики.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [3]

Асинхронный двигатель – это преобразователь электрической энергии переменного тока в механическую, состоящий из статора и ротора, у которого частота вращения ротора n_2 меньше частоты вращения магнитного поля статора n_1 на величину скольжения s , зависящего от нагрузки.

Трёхфазный асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: неподвижной – статора и подвижной – ротора. Статор – чугунная или алюминиевая литая станина, в которой запрессован сердечник из стальных пластин, имеющий форму полого цилиндра. В его пазах уложена трёхфазная обмотка, соединённая треугольником или звездой. Ротор представляет собой цилиндрический сердечник из стальных листов, в пазах которого уложена короткозамкнутая обмотка. Роторная обмотка представляет собой ряд медных или алюминиевых стержней, уложенных в пазы сердечника и соединённых по обоим его торцам медными или алюминиевыми кольцами в виде «беличьего колеса». Сердечник ротора укреплен на валу двигателя и помещён внутрь статора.

При прохождении по обмоткам статора трёхфазного тока в воздушном зазоре между ротором и статором возникает вращающееся магнитное поле. Силовые линии магнитного поля пересекают проводники ротора и индуцируют в них токи. Последние, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем (рис. 2.1), дают вращающийся момент:

$$M = c\Phi I_2 \cos \varphi_2, \quad (2.1)$$

где c – постоянный коэффициент; Φ – магнитный поток; I_2 – ток ротора; φ_2 – угол сдвига фаз тока и ЭДС ротора.

Под действием момента M ротор начинает вращаться в том направлении, что и поле. Скорость вращения ротора n_2 всегда меньше скорости вращения поля n_1 , так как только в этом случае возможно индуцирование токов в проводниках обмотки ротора и, следовательно, получение вращающего момента.

Разность частот вращения магнитного поля статора и ротора называется скольжением. Скольжение является необходимым условием работы асинхронного двигателя и определяет его основные параметры (частоту вращения, вращающий момент, ток и потери).

Асинхронный двигатель с фазным ротором является полной аналогией трёхфазного трансформатора. Наличие воздушного зазора увеличивает МДС, следовательно, и ток холостого хода, который на порядок больше, чем у трансформатора.

Скольжение является необходимым условием работы асинхронного двигателя $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

Асинхронный двигатель – это трансформатор с вращающейся вторичной обмоткой, у которого магнитные потоки статора и ротора неподвижны относительно друг друга.

Асинхронный двигатель – всеобщий преобразователь. Он преобразует практически все параметры в системе переменного тока: энергию, мощность, напряжение, ток, фазу, число фаз, $\cos \varphi$, частоту.

Частота вращения магнитного поля статора пропорциональна частоте питающей сети f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов (p)

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \text{ об/мин}; \quad \omega_1 = \frac{2\pi f}{p}, \text{ с}^{-1}.$$

ЭДС обмотки статора (E_1) пропорциональна магнитному потоку (Φ), частоте (f_1), числу витков (w_1) и обмоточному коэффициенту ($k_{об}$)

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m k_{об}.$$

МДС возбуждения (F_b) асинхронного двигателя определяется суммой МДС на участках ротора (F_{r2}) магнитной цепи: воздушный зазор (F_δ); зубцовый слой F_{z1} ярма статора ($F_{я1}$) и

$$F_b = 2F_\delta + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{я1} + F_{я2}.$$

Напряженность магнитного поля в воздушном зазоре определяется величиной индукции B_δ и μ_0 : с учетом полюсного перекрытия (τ), длины сердечника (l)

$$H_\delta = \frac{\Phi}{\mu_0 \alpha_i \tau l_i} = \frac{B_\delta}{\mu_0}.$$

Магнитное напряжение в воздушном зазоре

$$F_\delta = 2H_\delta L_\delta \quad \text{или} \quad F_\delta = 2 \frac{B_{cp} \delta_i}{\rho f_0}.$$

Коэффициент магнитного насыщения k_μ количественно оценивается как обратная величина удвоенной относительной МДС воздушного зазора

$$k_\mu = \frac{1}{2F_\delta}.$$

Напряжение обмотки статора (U_1) уравнивается ее ЭДС (E_1) и падениями напряжения на активной ($I_1 r_1$) и реактивной ($j I_1 x_1$) составляющих сопротивления обмотки

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j I_1 x_1 + I_1 r_1.$$

ЭДС (E_2), частота тока в роторе f_2 и потери в роторе ΔP пропорциональны скольжению

$$E_{2s} = \dot{E}_1 s; \quad f_{2s} = f_1 s; \quad \Delta P_{32} = P_{эм} s,$$

где $P_{эм}$ – электромагнитная мощность ротора.

Уравнение напряжения для обмоток ротора

$$\dot{E}_2 = j I_2 x_2 + I_2 r_2 / s.$$

МДС обмоток статора и ротора на один полюс в режиме нагруженного двигателя:

$$F_1 = 0,45 m_1 I_1 w_1 k_{об1} / p;$$

$$F_2 = 0,45 m_2 I_2 w_2 k_{об2} / p,$$

где m_1, m_2 – соответственно число фаз в обмотке статора и ротора;

$k_{об1}, k_{об2}$ – соответственно обмоточный коэффициент обмоток статора и ротора.

Уравнение токов статора асинхронного двигателя

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2),$$

из которого следует, что ток статора в асинхронном двигателе \dot{I}_1 имеет две составляющие: \dot{I}_0 – намагничивающую (почти постоянную) составляющую ($I_0 \approx I_{\mu}$) и $-\dot{I}'_2$ – переменную составляющую, компенсирующую МДС ротора.

Угол сдвига фаз между ЭДС E'_2 и током \dot{I}'_2

$$\Psi_2 = \arctg \frac{x'_2 s}{r'_2}.$$

Воспользовавшись Г-образной схемой замещения, запишем выражение тока в рабочем контуре

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (2.1)$$

знаменатель в этом выражении представляет собой полное сопротивление рабочего контура Г-образной схемы замещения асинхронного двигателя.

Полезная мощность на выходе двигателя P_2 всегда меньше мощности на входе (потребляемая мощность) P_1 на величину потерь $\sum P$

$$P_2 = P_1 - \sum P.$$

Сумма всех потерь асинхронного двигателя, Вт

$$\sum P = P_m + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}.$$

Электрические потери в обмотке статора

$$P_{\Sigma 1} = m_1 I_1^2 r_1.$$

Электрические потери в обмотке ротора

$$P_{\Sigma 2} = m_2 I_2'^2 r_2',$$

здесь r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора.

КПД асинхронного двигателя

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}.$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален мощности электрических потерь в обмотке ротора:

$$M \omega_1 s = m_1 I_2'^2 r_2'.$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату питающего напряжения (U)

$$M = \frac{mpU_1^2 r_2'}{2\pi f_1 s [(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2]}.$$

Подставив скольжение $s = 1$, получим выражение пускового момента асинхронного двигателя, Н · м

$$M_{\Pi} = \frac{m_1 p U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}.$$

Критическое скольжение определяется по формулам:

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}; \quad s_{\text{кр}} = s_{\text{н}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}).$$

В начальный момент пуска скольжение $s = 1$, поэтому, пренебрегая током х.х., пусковой ток можно определить из выражения (2.1), подставив $s = 1$:

$$I_{\Pi} = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

Зависимость скольжения (частоты вращения) от активного сопротивления цепи ротора:

$$s = \frac{m_1 I_1'^2 r_2'}{\omega_1 M}.$$

СЛС АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

СЛС асинхронного двигателя содержит пять компараторов, два звена умножения и одно интегрирующее звено (рис. 2.2).

Напряжение сети (3N, 380 В, 50 Гц) сравнивается с ЭДС статорных обмоток (K_1) и создается ток статора I_1 . Согласно уравнению токов на выходе компаратора K_2 имеем ток холостого хода I_0 . МДС статорных обмоток F_1 совместно с отрицательной обратной связью по МДС ротора F_2 создаёт результирующий магнитный поток Φ_0 на компараторе K_3 . Согласно уравнению ЭДС ротора на выходе блока умножения E_{2s} определяет величину тока ротора I_2 .

Произведение магнитного потока Φ_0 и тока ротора I_2 даёт электромагнитный момент двигателя $M_{\text{дв}}$.

На выходе сумматора K_5 получаем динамический момент, пропорциональный производной скорости двигателя. После интегрирования $M_{\text{дин}}$ получаем скорость вращения ротора, которая в сравнении с синхронной частотой вращения магнитного поля статора ω_1 определяет величину скольжения s .

Саморегулирование здесь обеспечивается отрицательными внутренними обратными связями (E_1 ; I_2 ; Φ_2 ; s).

ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ

$$U_1 = -E_1 + jI_1x_1 + Ir_1; \quad (2.2)$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \quad (2.3)$$

$$\Delta P_3 = P_{3M} s; \quad (2.4)$$

$$n_2 = \frac{60f_1}{p}(1-s); \quad (2.5)$$

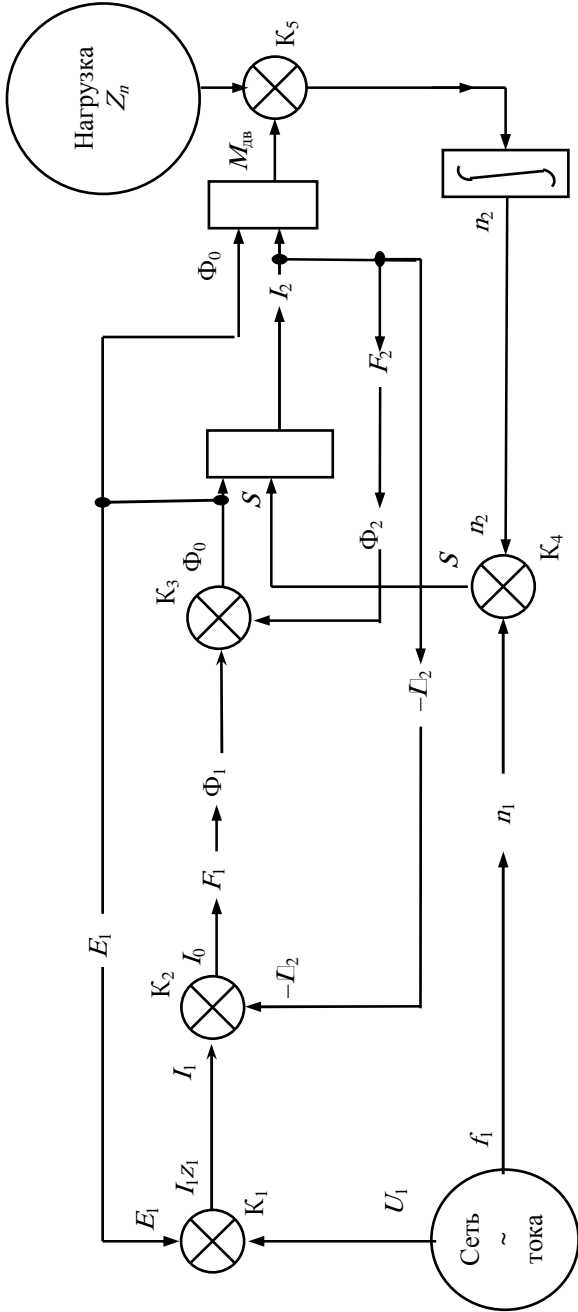


Рис. 2.1. Асинхронный двигатель (структурно-логическая схема преобразований).

$$E_{2S} = E_{2m} s; \quad (2.6)$$

$$f_2 = f_1 s; \quad (2.7)$$

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}); \quad (2.8)$$

$$M_{кр} = M_{ном} \lambda; \quad (2.9)$$

$$U'_2 = E'_2 - jI'_2 x'_2 - I'_2 \frac{r'_2}{s}; \quad (2.10)$$

$$P_{2H} = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_{1H} \eta_H; \quad (2.11)$$

$$M = \frac{mpU_{\phi}^2 r_2'}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right] s}. \quad (2.12)$$

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

1. Скольжение.

Скольжение – отставание частоты вращения ротора от вращающего магнитного поля статора.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_2}. \quad (2.13)$$

Скольжение является необходимым условием работы асинхронного двигателя.

2. Ток холостого хода.

$I_0 \approx I_{\mu}$ – намагничивающий ток имеет реактивный характер.

$I_{0 \text{ АД}} \gg I_{0 \text{ ТР}}$ – за счёт воздушного зазора.

$I_{0 \text{ АД}} = (0,3 \dots 0,4) I_{\text{н}}$.

$\cos \varphi_{\text{х.х.}} = 0,2$, поэтому АД должен работать при нагрузке, близкой к номинальной для повышения $\cos \varphi$ и КПД.

3. Частота тока ротора пропорциональна скольжению.

$$f_2 = f_1 s. \quad (2.14)$$

4. ЭДС ротора пропорциональна скольжению.

$$E_{2s} = E_{2\text{max}} s. \quad (2.15)$$

5. Частота вращения вектора МДС ротора и статора равны, т.е. магнитные поля ротора и статора относительно друг друга неподвижны.

6. Пусковой ток АД с короткозамкнутым ротором при прямом пуске в 5 – 7 раз больше номинального.

7. Электромагнитный момент АД пропорционален квадрату фазного напряжения.

8. Электрические потери в роторе пропорциональны скольжению.

$$s = \frac{\Delta P_{\text{эл2}}}{P_{\text{эм}}}. \quad (2.16)$$

9. Регулирование частоты вращения АД осуществляется изменением трёх параметров:

- частота;
- число пар полюсов;
- скольжение

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p} (1 - s). \quad (2.17)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться со стендом, техническими данными исследуемого двигателя, пускорегулировочной аппаратурой и измерительными приборами, предназначенными для выполнения работы. Схема универсального стенда для проведения испытания двигателя приведена на рис. 2.1.

2. Установить все используемые коммутационные и регулирующие аппараты в исходное положение (S11 – «Г»; S1 – S7 – выкл.; АТР1 – движок в крайнее положение против часовой стрелки). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

3. Включить стенд (QF1).

4. Запустить АД с фазным ротором (SB1).

5. Перевести АД с фазным ротором в режим АД с к.з. ротором, для чего нажать поочерёдно кнопки SB5 – SB8.

6. Установить движком АТР1 максимальное значение тока возбуждения ГПН (амперметр А4).

7. Снять данные холостого хода АД с к.з. ротором.

8. Получить данные для построения рабочих характеристик двигателя, изменяя нагрузку (S1 – S7), записать в табл. 2.1 показания приборов ($I_1 - A_1$; $U_1 - V_1$; $P_1 - W_1$; $U_3 - V_3$; $U_r - V_2$; $I_r - A_2$) для всех значений нагрузки. Мощность P_1 определяется как сумма мощностей по фазам A, B, C :

$$P_1 = P_A + P_B + P_C.$$

9. По данным табл. 2.1 рассчитать и построить графические зависимости рабочих характеристик двигателя: $I_1, P_1, \cos \varphi, \eta, S$ от мощности P_2 .

10. Необходимо также построить механические характеристики

$$\eta_2 = f(M) \text{ и } M = f(S).$$

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЁТА

Выходная мощность генератора

$$P_r = U_r I_r. \quad (2.18)$$

Входная мощность генератора (выходная мощность двигателя)

$$P_2 = P_{1r} = P_{2r} / \eta_r. \quad (2.19)$$

КПД ГПН определяется по универсальной кривой $\eta = f(P_{2r})$:

η	0,47	0,66	0,75	0,79	0,8	0,79
$P_{2г}^*$	0,17	0,34	0,51	0,68	0,84	1,0

$$P_{2г}^* = \frac{P_{2г}}{P_{2н}}$$

где $P_{2н}$ – номинальная мощность генератора (паспортные данные); $P_{2г} = U_{г} I_{г}$ – мощность на выходе генератора;

$$\cos \varphi = P_1 / (3 U_1 I_1); \quad (2.20)$$

$$\eta = P_2 / P_1; \quad (2.21)$$

$$P_1 = P_A + P_B + P_C; \quad (2.22)$$

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2}. \quad (2.23)$$

Таблица 2.1

№	Измерено						
	I_1, A	U_1, B	$P_1, Bт$	U_3, B	$n_1, об/мин$	$U_{г}, B$	$I_{г}, A$
1							
2							
3							
4							
5							

№	Вычислено						
	$M, H \cdot м$	η	$\cos \varphi$	$n_2, об/мин$	s	$P_2, Bт$	$P_{1г}, Bт$
1							
2							
3							
4							
5							

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурно-логическая схема асинхронного двигателя.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Построенные механические характеристики $n_2 = f(M)$ и $M = f(s)$.
6. Выводы.
7. Литература.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство статора и ротора АД и принцип его работы.
2. Частота вращения магнитного поля и способы её регулирования. Как влияет на неё частота сети?
3. Что называется скольжением АД? Пояснить соответствующую формулу. Область изменения скольжения асинхронной машины в:
 - а) двигательном режиме;
 - б) режиме электромагнитного торможения;
 - в) генераторном режиме.
4. Почему в момент пуска ток в двигателе во много раз больше номинального? Какие нежелательные явления возникают в сети при протекании по ней больших пусковых токов?
5. Проанализировать кривую $l(M)$ и пояснить процесс пуска АД. Указать на графике критический, пусковой и номинальный моменты.
6. Для каких целей в асинхронном электродвигателе с двойной беличьей клеткой наружную клетку выполняют из стержней с малой площадью поперечного сечения?
7. Пояснить способ уменьшения пускового тока двигателя при переключении обмоток статора с «треугольника» на «звезду». Преимущества этого способа, учитывая изменения тока, мощности и момента.
8. Как используются активные и реактивные сопротивления для улучшения пускового режима двигателя?
9. Для каких целей у асинхронного двигателя применяют ротор с глубокими пазами?
10. Как влияет скольжение на ЭДС и частоту тока, потери ротора?
11. Как определить потери в стали при известных: $P_{2н}$, $P_{н}$, $\eta_{н}$?
12. Каков физический смысл электрического эквивалента механической нагрузки?
13. Сравните ток х.х. АД и трансформатора одинаковой мощности.
14. Пояснить процесс нагрузки АД по его СЛС.
15. Какие преимущества тиристорного индукционно-динамического торможения АД?
16. Координаты характерных точек механической характеристики АД.

17. Определите синхронную и номинальную частоты вращения АД типа 4А180Л8У3 при $s_n = 2,5 \%$.
18. Определите частоту тока ротора АД по условиям п. 17.
19. Почему в суммарных потерях не учитываем магнитные потери ротора?
20. Как изменится $M_{\text{пуск}}$ и ток I_1 при переключении обмоток статора с Δ на Y ?
21. Принципиальная электрическая схема стэнда исследования АД.
22. Приведите рабочие характеристики асинхронного двигателя с к.з. ротором.
23. Приведите регулировочные механические характеристики асинхронного двигателя.
24. Устройство и назначение сельсинов.
25. Как получить пусковой момент в однофазном двигателе?
26. Какая величина скольжения АД при противовключении?
27. Как определить электромагнитную мощность АД?
28. Используя СЛС асинхронного двигателя, объясните процесс нагрузки и саморегулирования.
29. Почему при частотном регулировании частоты вращения АД одновременно с частотой тока необходимо изменять напряжение?
30. Закон полного тока для магнитной цепи АД.
31. Как обеспечить номинальные параметры режима работы АД?
32. На каком участке магнитной цепи АД его МДС наибольшая?
33. Какие бывают типы обмоток статора АД?
34. Какие параметры необходимы для построения развёрнутой схемы трёхфазной двухслойной обмотки статора?
35. Каково влияние обмоточного коэффициента на ЭДС статора?
36. Как определяется шаг обмотки статора?
37. Как защитить АД от аварийных режимов работы?
38. Что определяет магнитная характеристика АД?
39. Как можно увеличить критическое скольжение АД с к.з. ротором?
40. Как переходить из двигательного режима в тормозные режимы работы АД?
41. Каковы значения $\cos \varphi$ и КПД при холостом ходе асинхронного двигателя?
42. Как определяется величина момента нагрузки АД опытным путём (на лабораторном стенде УСЭМ)?
43. Определить момент нагрузки для АД с паспортными данными п. 17 при частоте вращения 720 об/мин (считая механическую характеристику на данном участке линейной).
44. Какие условия необходимы для получения в расточке статора кругового вращающегося магнитного поля?
45. Почему регулирование частоты вращения изменением скольжения осуществляется при постоянном моменте нагрузки?
46. Как изменится частота тока ротора при увеличении нагрузки?

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы:

1. Ознакомиться с устройством, изучить рабочие характеристики асинхронного двигателя с фазной обмоткой ротора, способы пуска и регулирования скорости вращения двигателя.
2. Снять регулировочные характеристики.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2, 3]

Трёхфазный асинхронный двигатель с фазным ротором – это преобразователь электрической энергии переменного тока в механическую, состоящий из статора и ротора, у которого частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля статора на величину скольжения, которое определяется сопротивлениями в цепи ротора.

Трёхфазный асинхронный двигатель с фазным ротором состоит из двух основных частей: неподвижной – статора и подвижной – ротора. Сердечник статора выполняется из листовой электротехнической стали в виде полого цилиндра с пазами с внутренней стороны, в которые укладываются витки обмотки. Фазные обмотки катушки расположены относительно друг друга под углом 120 электрических градусов.

Ротор двигателя так же выполняется из листов электротехнической стали в виде полого цилиндра с пазами на наружной стороне, в которые укладываются витки роторной обмотки. Обмотка фазного ротора выполняется по типу обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Три фазы обмотки, уложенной в пазах ротора, соединяются в звезду, а концы фаз присоединяются к трём контактным кольцам, насаженным на вал ротора. На кольца накладываются щётки, посредством которых в цепь обмотки ротора включается пусковой или пускорегулировочный реостат.

Принцип работы двигателя заключается в следующем: при включении статорной обмотки в цепь трёхфазного переменного тока в воздушном зазоре возникает магнитное поле, вращающееся со скоростью:

$$n_1 = 60f / p, \text{ об/мин,} \quad (3.1)$$

где f – частота переменного тока; p – число пар полюсов двигателя.

Под действием вращающегося магнитного поля в роторной обмотке генерируется ЭДС:

$$E_2 = 4,44 f_2 w_2 \Phi_{m2} k_{обм2}. \quad (3.2)$$

Величина тока ротора зависит от активного сопротивления роторной цепи. При взаимодействии тока ротора с магнитным полем статора создаётся вращающий момент, действующий на ротор в направлении вращения поля. Только при наличии скольжения возможно индуцирование ЭДС в проводниках обмотки ротора и возникновение вращающего момента. Отсюда и название двигателя – асинхронный (отстающий).

При пуске двигателя с фазным ротором для увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока в цепь ротора через контактные кольца включается пусковой реостат. Сопротивление реостата, при включении обмотки статора двигателя в сеть, должно быть наибольшим.

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

СЛС асинхронного двигателя содержит пять компараторов, два звена умножения и одно интегрирующее звено (рис. 2.1).

$$U'_2 = E'_2 - jI'_2 x'_2 - I'_2 \frac{r'_2}{s}.$$

Напряжение сети (3N, 380 В, 50 Гц) сравнивается с ЭДС статорных обмоток (K_1) и создается ток статора I_1 . Согласно уравнению токов на выходе компаратора K_2 имеем ток холостого хода I_0 . МДС статорных обмоток F_1 совместно с отрицательной обратной связью по МДС ротора F_2 создаёт результирующий магнитный поток Φ_0 на компараторе K_3 . Согласно уравнению ЭДС ротора на выходе блока умножения E_{2s} определяет величину тока ротора I_2 .

Произведение магнитного потока Φ_0 и тока ротора I_2 даёт электромагнитный момент двигателя $M_{дв}$.

На выходе сумматора K_5 получаем динамический момент, пропорциональный производной скорости двигателя. После интегрирования $M_{дин}$ получаем скорость вращения ротора, которая в сравнении с синхронной частотой вращения магнитного поля статора n_1 определяет величину скольжения s .

Саморегулирование здесь обеспечивается отрицательными внутренними обратными связями по параметрам: E_1 ; I_2 ; Φ_2 ; s .

ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ [3]

$$U_1 = -E_1 + jI_1 x_1 + I_1 r_1;$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1};$$

$$\Delta P_3 = P_{эм} s;$$

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p} (1 - s);$$

$$E_{2s} = E_{2m} s;$$

$$f_2 = f_1 s;$$

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1});$$

$$M_{кр} = M_{ном} \lambda;$$

$$P_{2н} = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_{1н} \eta_{н};$$

$$M = \frac{mp U_{\Phi}^2 (r'_2 + r'_{доб}) r'_2}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right] s}.$$

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

1. Скольжение.

Скольжение – отставание частоты вращения ротора от вращающего магнитного поля статора.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_2}.$$

Скольжение является необходимым условием работы асинхронного двигателя.

2. Ток холостого хода.

$I_0 \approx I_{\mu}$ – намагничивающий ток имеет реактивный характер.

$I_{0\text{ АД}} \gg I_{0\text{ тр}}$ – за счёт воздушного зазора.

$I_{0\text{ АД}} = (0,3 \dots 0,4) I_{1н}$.

$\cos \varphi_{х.х.} = 0,2$, поэтому АД должен работать при нагрузке, близкой к номинальной для повышения $\cos \varphi$ и КПД.

3. Частота тока ротора пропорциональна скольжению.

$$f_2 = f_1 s.$$

4. ЭДС ротора пропорциональна скольжению.

$$E_{2s} = E_{2\text{max}} s.$$

5. Частота вращения вектора МДС ротора и статора равны, т.е. магнитные поля ротора и статора относительно друг друга неподвижны.

6. Электромагнитный момент АД пропорционален квадрату фазного напряжения.

7. Электрические потери в роторе пропорциональны скольжению

$$s = \frac{\Delta P_{эл2}}{\Delta P_{эм}}$$

8. Ограничение пусковых токов достигается включением добавочных сопротивлений в цепь ротора. При этом повышается пусковой момент и величина критического скольжения.

9. Регулирование частоты вращения АД осуществляется изменением трёх параметров:

а) частота,

б) число пар полюсов,

в) скольжение.

$$n_2 = \frac{60f}{p}(1-s)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с устройством АД с фазным ротором и записать паспортные данные исследуемых машин, ознакомиться со схемой стенда рис. 1.1.

2. Установить все используемые коммутационные и регулирующие аппараты в исходное положение (S11 – «Г»; S1 – S7 – выкл.; АТР1 – движок в крайнее положение против часовой стрелки). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

3. Включить стенд (QF1).

4. Запустить АД с фазным ротором нажатием на кнопку SB1.

5. Установить движком АТР1 максимальное значение тока возбуждения ГПН (амперметр А4).

6. Последовательно на всех искусственных характеристиках АД с фазным ротором (SB5 – SB8) осуществляем нагрузку (S1 – S7) для снятия регулировочных характеристик.

7. Данные занести в табл. 3.1. При расчётах использовать универсальную кривую $\eta = f(P_2)$. Построить рабочие характеристики: I_1 , η , S , M , n_2 в зависимости от P_2 в одной системе координат.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЁТА

$$s = [(n_1 - n_2) / n_1] 100 \%$$

$$\eta = P_2 / P_1$$

$$n_2 = U_3 / k$$

$$M = 9,55 P_2 / n_2$$

КПД ГПН определяется по универсальной кривой $\eta = f(P_{2г})$:

η	0,47	0,66	0,75	0,79	0,8	0,79
$P_{2г}^*$	0,17	0,34	0,51	0,68	0,84	1,0

$$P_{2г}^* = \frac{P_{2г}}{P_{2н}}$$

где $P_{2н}$ – номинальная мощность генератора (паспортные данные); $P_{2г} = U_{г} I_{г}$ – мощность на выходе генератора;

$$k = U_3 / n_{х.х.}$$

Таблица 3.1

№ опыта	Измерено							
	$U_{ф}$, В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	U_3 , В	$I_{г}$, А	$U_{г}$, В
1								
2								
3								
4								
5								
№ опыта	Вычислено							
	n_2 , об/мин	P_2 , Вт	s	M , Н·м	$\eta_{г}$	$\eta_{дв}$	$P_{1г}$, Вт	
1								
2								
3								
4								
5								

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурно-логическая схема асинхронного двигателя с фазным ротором.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Построенные рабочие характеристики: I_1 , η , S , M , n_2 в зависимости от P_2 в одной системе координат.
6. Выводы.
7. Список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство и принцип действия АД с фазным ротором.
2. Объяснить возникновение вращающего момента в двигателе.
3. Пусковые свойства АД с короткозамкнутым и фазным ротором.
4. Способы регулирования частоты вращения АД.
5. Как изменяется скольжение, частота тока, ЭДС ротора при переходе от режима пуска до холостого хода и от режима холостого хода до номинальной нагрузки?
6. Условия для получения вращающегося магнитного поля.
7. Отличие АД с фазным ротором от АД с короткозамкнутым ротором.
8. Как влияет частота напряжения сети и величина добавочного сопротивления в цепи ротора на величину пускового тока?
9. Как влияет величина нагрузки P_2 на основные параметры АД с фазным ротором?
10. Типы обмоток АД и их основные параметры.
11. Основные свойства АД.
12. Каков физический смысл электрического эквивалента механической нагрузки?
13. Сравните ток холостого хода АД и трансформатора одинаковой мощности.
14. Пояснить СЛС асинхронного двигателя и процесс саморегулирования.
15. Индукционно-динамическое торможение АД.
16. Координаты характерных точек механической характеристики АД.
17. Определите синхронную и номинальную частоты вращения ротора АД типа 4А180Л8УЗ при $s_n = 2,5\%$.
18. Почему при холостом ходе у АД низкий $\cos \varphi$ и КПД?
19. Почему не учитываются магнитные потери ротора при номинальной нагрузке?
20. Как определяется добавочное сопротивление ротора для $M_{\text{пуск}} = M_{\text{кр}}$ наибольшего пускового момента?
21. Принципиальная электрическая схема стенда УСЭМ-2 для данной работы.
22. Закон полного тока для магнитной цепи асинхронного двигателя.
23. Порядок расчёта магнитной цепи асинхронного двигателя.
24. Уравнение напряжений статора и ротора АД.
25. Электрическая схема замещения АД с фазным ротором.
26. При каком добавочном сопротивлении в цепи ротора уменьшается пусковой момент?

СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Ц е л ь р а б о т ы : изучить устройство и принцип действия синхронного генератора (СГ); получить данные для построения характеристик СГ.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2]

Синхронный генератор – преобразователь механической энергии в электрическую энергию переменного тока, состоящий из якоря и индуктора, у которого величина ЭДС зависит от тока возбуждения индуктора, а частота ЭДС определяется частотой вращения приводного двигателя.

Статор синхронной машины (СМ) выполнен так же, как и асинхронной: на нём расположена трёхфазная (в общем случае многофазная) обмотка. Обмотку ротора, питаемую от источника постоянного тока, называют обмоткой возбуждения.

При вращении ротора с некоторой частотой n_2 магнитный поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в его фазах переменную ЭДС, изменяющуюся с частотой:

$$f_1 = pn_2 / 60. \quad (4.1)$$

Если обмотку статора подключить к какой-либо нагрузке, то протекающий по этой обмотке ток создаёт вращающееся магнитное поле, частота вращения которого:

$$n_1 = 60f_1 / p_1. \quad (4.2)$$

Следовательно, $n_1 = n_2$, т.е. ротор и магнитное поле статора синхронного генератора (СГ) вращаются с одной и той же частотой. По этой причине рассматриваемую машину называют синхронной. Результирующий магнитный поток СМ создаётся совместным действием МДС обмотки возбуждения и обмотки статора, результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор.

Обмотку, в которой индуцируется ЭДС и протекает ток нагрузки, называют обмоткой якоря, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, – индуктором. Следовательно, статор является якорем, а ротор – индуктором.

Одним из основных требований, предъявляемых к СГ, является синусоидальность напряжения якоря. Это достигается в явнополюсных СГ – за счёт неравномерного зазора между полюсным наконечником и якорем, в неявнополюсных – за счёт укорочения шага, равномерного распределения обмотки якоря при $q = 4 - 6$ и скоса зубьев.

Основные характеристики СГ:

1. *Характеристика холостого хода* (х.х.). Характеристикой холостого хода СГ называют зависимость его ЭДС от тока возбуждения, определённую при постоянной частоте вращения и отсутствии нагрузки, $E = f(I_B)$. Эта характеристика подобна кривой намагничивания $\Phi_B = f(I_B)$. При холостом ходе магнитный поток СГ создается обмоткой возбуждения, он направлен по оси полюсов ротора и индуцирует в фазах обмотки якоря ЭДС:

$$E_0 = 4,44 w_A k_{обм} \Phi_B, \quad (4.3)$$

где w_A и $k_{обм}$ – число витков в фазе и обмоточный коэффициент обмотки якоря, соответственно; Φ_B – поток первой гармоники магнитного поля возбуждения.

2. *Характеристика короткого замыкания* (к.з.). Характеристикой короткого замыкания называют зависимость установившегося тока короткого замыкания якоря I_K от тока возбуждения I_B , определённую при данной частоте, $I_K = f(I_B)$.

3. *Внешняя характеристика*. Внешней характеристикой называют зависимость, по которой изменяется напряжение на зажимах U_1 при изменении тока нагрузки I_1 при фиксированном токе возбуждения, частоте и характере нагрузки $\cos \varphi = \text{const}$, $U_1 = f(I_1)$. При активной нагрузке $\cos \varphi = 1$ уменьшение тока нагрузки вызывает рост напряжения U_1 за счёт уменьшения искажающего действия реакции якоря. При индуктивной нагрузке $\varphi < 0$ уменьшение тока I_1 вызывает рост напряжения U_1 за счёт уменьшения продольно-размагничивающей реакции якоря. При ёмкостной нагрузке $\varphi > 0$ уменьшение тока I_1 вызывает уменьшение U_1 за счёт ослабления продольно-намагничивающей реакции якоря.

4. *Нагрузочная характеристика*. Нагрузочной характеристикой называют зависимость напряжения на зажимах СГ от тока возбуждения, определённой при постоянном токе якоря и неизменном характере нагрузки, когда угол сдвига фаз между током и напряжением не изменяется,

$$U_1 = f(I_B).$$

5. *Регулировочная характеристика*. Регулировочной характеристикой называют зависимость, по которой надо изменять ток возбуждения при изменении тока нагрузки с тем, чтобы поддерживать неизменное напряжение на зажимах при постоянной частоте и заданном характере нагрузки. При индуктивной нагрузке $\varphi < 0$ реакция якоря продольно-размагничивающая, поэтому при увеличении тока нагрузки требуется увеличивать ток возбуждения. При ёмкостной нагрузке $\varphi > 0$ реакция якоря продольно-намагничивающая, поэтому при увеличении тока нагрузки требуется уменьшить ток возбуждения.

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

СЛС синхронного генератора содержит три компаратора (по числу уравнений) (рис. 4.1):

K_1 – уравнение магнитного равновесия;

K_2 – уравнение электрического равновесия обмоток якоря;

K_3 – уравнение нагрузки.

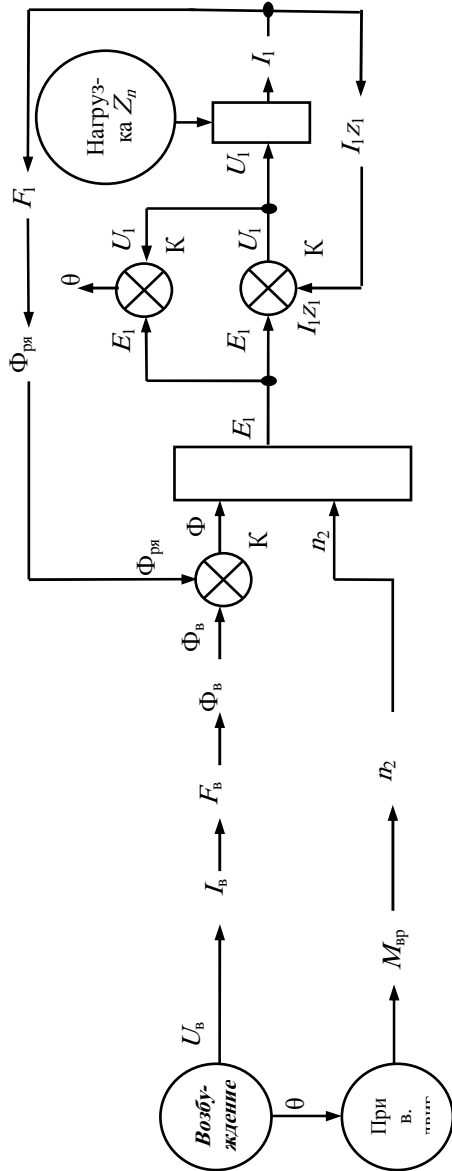


Рис. 4.1. Синхронный генератор (структурно-логическая схема преобразований)

На входе синхронного генератора два энергетических потока: энергия механическая (приводного двигателя) и энергия электрическая (возбуждение).

Возбудитель (ротор) СГ с помощью приводного двигателя вращается с синхронной скоростью n_2 . Магнитный поток (резльтирующий) Φ создает ЭДС E_1 , которая сравнивается с напряжением U_1 . При этом создаётся ток I_1 , который определяет величину угла нагрузки θ .

Угол нагрузки θ определяет величину момента приводного двигателя синхронного генератора.

Процесс саморегулирования в СГ обеспечивается за счет внутренних обратных связей по углу нагрузки θ .

При увеличении нагрузки СГ (тока I_1) увеличивается угол нагрузки θ , в результате пропорционально $\sin \theta$ увеличивается момент и мощность приводного двигателя до величины соответствующей электрической мощности на выходе синхронного генератора.

ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ

$$E_0 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m k_{об1};$$

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{2НОМ}}{U_{2НОМ}} 100 \%;$$

$$ОКЗ = \frac{U_{НВО}}{I_{я,НОМ} x_d} = \frac{U_{НВД}}{U_{ВНД}};$$

$$U_{1ня} = E_0 - j I_1 x_{сн};$$

$$U_{яп} = E_0 + E_a + E_a + E_\sigma - I_я R_я.$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с расположением коммутационных аппаратов, регулирующих элементов, измерительных приборов, электрических машин и преобразователей по схеме рис. 1.1. Снять технические характеристики электрических машин.
2. Установить коммутационные аппараты в исходное положение (S11 – «ТП»; S1 – S7 – выкл.; ККЗ – разомкнута; $R_{\text{зад}}$ – на минимум; АТР1 – на максимум; АРТ2 – на минимум). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.
3. Подать напряжение на стенд (QS1).
4. Включить тиристорный преобразователь (SB3).
5. Установить АТР2 возбуждение СГ $I_b = 9$ А.
6. Подключить цепь нагрузки к СГ (SB2).
7. Установить частоту 50 Гц с помощью $R_{\text{зад}}$ ТП, что будет соответствовать $n_2 = 1000$ об/мин.
8. Снять характеристику холостого хода $E_1 = f(I_b)$. Изменяя значения тока возбуждения ($I_b - A_3$), снимаем значение ЭДС по фазам, данные измерения сводим в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№ опыта	I _b , А	E _a , В	E _b , В	E _c , В
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

9. Снять характеристику короткого замыкания $I_1 = f(I_b)$. Для этого установить ток возбуждения СГ равным нулю (АТР2), установить перемычку ККЗ и АРТ2, увеличивая ток возбуждения, устанавливают номинальный ток в обмотке якоря $I_1 = I_{\text{ном}}$. Данные свести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

I _k , А					
I _b , А					

10. Снять внешнюю характеристику $U_1 = f(I_1)$ при $n_1 = \text{const}$, $I_b = \text{const}$, $\varphi_2 = 0$. Опыт проводится для $I_b = 5$ и 7 А. Установить ток возбуждения и, изменяя значение тока нагрузки (S1 – S7), снимаем изменение напряжения по фазам. Данные сводим в табл. 4.3.

Таблица 4.3

№ опыта	I ₁ , А	U _a , В	U _b , В	U _c , В
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

11. Снять нагрузочную характеристику $U_1 = f(I_b)$. Установить ток нагрузки $I_1 = 1,25$ А, увеличивая нагрузку (S1 – S7) и изменяя ток возбуждения таким образом, чтобы $I_1 = 1,25$ А, снимаем значения напряжения по фазам. Данные сводим в табл. 4.4.

Таблица 4.4

№ опыта	I _b , А	U _a , В	U _b , В	U _c , В
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

12. Снять регулировочную характеристику $I_b = f(I_1)$. Установить значение напряжения $U_1 = \text{const}$, увеличивая ток нагрузки ($S1 - S7$), изменяем ток возбуждения таким образом, чтобы U_1 не изменялось, снимаем значение тока нагрузки по фазам. Данные сводим в табл. 4.5.

Таблица 4.5

№ опыта	I_a, A	I_a, B	I_b, B	I_c, B
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

13. Построить графики, иллюстрирующие характеристики СГ.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурно-логическая схема синхронного генератора.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Характеристики синхронного генератора.
6. Выводы.
7. Список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие конструктивные различия между синхронными машинами: явнополюсными и неявнополюсными?
2. Какие конструктивные особенности СМ улучшают синусоидальную форму ЭДС генератора?
3. Способы возбуждения СГ, их преимущества и недостатки?
4. В чём состоит явление реакции якоря?
5. Как влияет реакция якоря на ЭДС СГ при изменении характера нагрузки?
6. Различие векторных диаграмм неявнополюсного и явнополюсного СГ?
7. Условия снятия характеристик холостого хода и короткого замыкания.
8. Условия снятия внешней и регулировочной характеристик СГ.
9. Условия и методы синхронизации СГ с сетью.
10. Чем объясняются малые значения тока якоря при снятии характеристики короткого замыкания?
11. Какое назначение U-образных характеристик СГ?
12. Какое отличие между угловыми характеристиками явнополюсного и неявнополюсного генераторов?
13. Способы регулирования ЭДС и $\cos \phi$ при работе СГ параллельно с сетью.
14. Мощность и электромагнитный момент явнополюсного и неявнополюсного генератора.
15. Потери и КПД синхронного генератора.
16. Почему внешние и регулировочные характеристики СГ, снятые при различных характерах нагрузки, не совпадают?
17. Что обозначает угол θ ?
18. Какой СГ обладает большей устойчивостью?
19. Назначение короткозамкнутой обмотки полюсных наконечников.
20. В чём отличие магнитной цепи явнополюсного и неявнополюсного СГ?
21. Как перевести СГ, работающий параллельно с сетью, в режим двигателя?
22. Объяснить принцип действия, саморегулирование СГ по его структурно-логической схеме.
23. Конструктивные элементы СГ и их функции.
24. Принципиальная электрическая схема стенда УЭСМ-2 для данной работы.
25. Способы возбуждения и условия самовозбуждения СГ?

СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Ц е л ь р а б о т ы : изучить конструкцию и рабочие характеристики синхронного двигателя (СД).

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2]

Синхронный электродвигатель – преобразователь электрической энергии переменного тока в механическую, содержащий якорь и индуктор, у которого частота вращения не зависит от нагрузки.

СД используется для приводов с постоянной нагрузкой. Синхронная машина, работающая параллельно с сетью, автоматически переходит в двигательный режим, если к валу ротора приложен тормозной момент. При этом машина начинает потреблять из сети активную мощность и возникает электромагнитный вращающий момент. Частота вращения ротора остаётся неизменной, тесно связанной с частотой сети соотношением:

$$n_1 = n_2 = 60 \cdot f_1 / p, \quad (5.1)$$

что является важнейшим свойством эксплуатации СД.

Принцип действия СД заключается во взаимодействии магнитного поля индуктора и вращающего магнитного потока якоря. Намагничивающая сила индуктора создаёт основное магнитное поле. При работе ток в обмотке якоря создаёт намагничивающую силу якоря, которая вступает во взаимодействие с намагничивающей силой индуктора и совместно с ней образует результирующую намагничивающую силу и результирующее магнитное поле. Это магнитное поле отличается от основного поля как по величине, так и по форме, что в свою очередь влечёт за собой изменение величины и формы наводимой в якоре ЭДС и всех величин, прямо или косвенно зависящих от неё. Таким образом, воздействие намагничивающей силы якоря на основную намагничивающую силу индуктора оказывает большое влияние на работу синхронной машины и называется реакцией якоря.

Реакцией якоря при $\psi = 0$ (активная нагрузка).

Если стороны фазной обмотки находятся на оси полюсов, то в ней наводится наибольшая ЭДС. Направление этой ЭДС определяется по правилу правой руки при условии, что большой палец отводится по направлению перемещения проводника относительно магнитного поля. При $\varphi = 0$ ток в катушке достигает амплитудного значения одновременно с ЭДС. Создаваемое током якоря поле направлено поперёк основного поля, причём на набегающем крае полюса оно ослабляет основное поле, на сбегающем – усиливает его. Такое поле и соответственно такая реакция якоря называется поперечными.

Реакция якоря при $\psi = 90^\circ$ (чисто индуктивная нагрузка).

При чисто индуктивной нагрузке ток достигает максимума спустя четверть периода после достижения максимума ЭДС, т.е. после поворота ротора на половину полюсного деления по направлению его вращения.

В этом случае угол между магнитными осями обмотки якоря и полюса индуктора равен 90° , т.е. ось поля якоря направлена встречно относительно оси поля полюсов. Таким образом, реакция якоря имеет продольно размагничивающий характер.

Реакция якоря при $\psi = 90^\circ$ (ёмкостная нагрузка).

Ёмкостная нагрузка представляет собой случай, противоположный предыдущему, а поэтому реакция якоря имеет продольно-намагничивающий характер.

Рабочие характеристики представляют собой зависимости тока I_A , электрической мощности P_1 , поступающей в обмотку якоря, КПД и $\cos \varphi$ от отдаваемой механической мощности P_2 , при $U_C = \text{const}$, $f_C = \text{const}$, $I_B = \text{const}$. Часто эти характеристики строят в относительных единицах. Поскольку частота вращения двигателя постоянна, зависимость $M = f(P_2)$, так как вращающий момент M пропорционален P_2 . Зависимость $P_1 = f(P_2)$ имеет характер, близкий к линейному. Ток двигателя при холостом ходе является практически реактивным. По мере роста нагрузки возрастает активная составляющая тока, в связи с чем зависимость тока I_A от мощности P_2 является нелинейной. Кривая $\eta = f(P_2)$ имеет общий характер для всех электрических машин.

Достоинства синхронного двигателя:

- 1) возможность работы при $\cos \varphi = 1$, что приводит к улучшению $\cos \varphi$ сети, а также к уменьшению размеров двигателя;
- 2) малая чувствительность к колебаниям напряжения, так как его максимальный момент пропорционален напряжению в первой степени;
- 3) строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу.

Недостатки синхронного двигателя:

- 1) сложность конструкции;
- 2) сравнительная сложность пуска в ход;
- 3) трудности с регулированием частоты вращения.

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА синхронного ДВИГАТЕЛЯ

СЛС синхронного двигателя состоит из трёх компараторов (по числу уравнений равновесия – электрического, магнитного и механического) (рис. 5.1):

K_1 – уравнение электрического равновесия напряжений статора;

K_2 – уравнение магнитного равновесия;

K_3 – уравнение движения (привода).

Напряжение сети после сравнения с ЭДС статорных обмоток создаёт ток I_1 , который пропорционален МДС якоря и создаёт магнитный поток реакции якоря $\Phi_{р\text{я}}$.

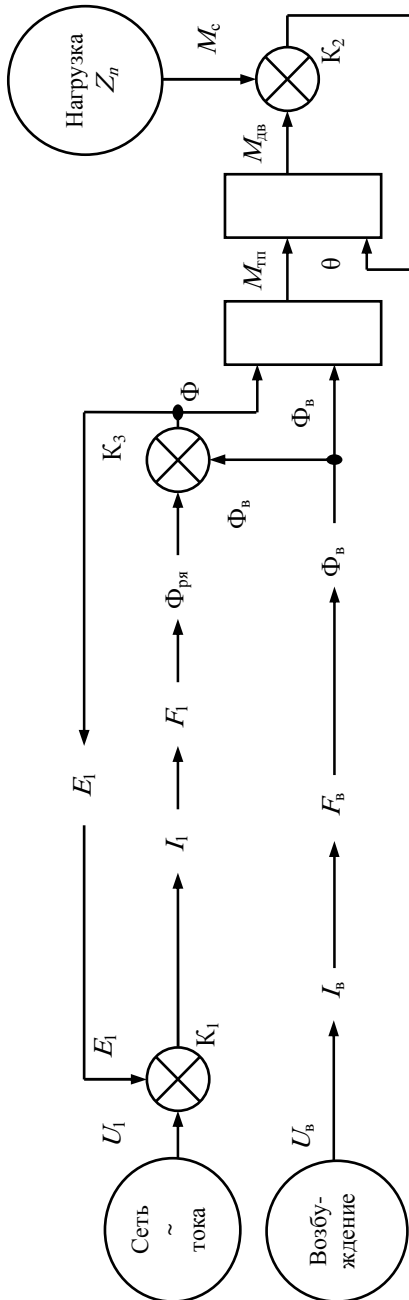


Рис. 5.1. Синхронный электродвигатель (структурно-логическая схема преобразований)

Вращающийся магнитный поток якоря Φ и магнитный поток возбуждения притягиваются и создают электромагнитный момент СД, величина которого зависит от угла нагрузки θ .

ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ [2]

$$M_{\text{ня}} = \frac{mUE_0}{\omega_1 x_{\text{сн}}} \sin \theta ;$$

$$M_{\text{яп}} = \frac{mUE_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta ;$$

$$P_2 = M_2 \omega_1 .$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться со схемой универсального стенда рис. 1.1.
2. Установить коммутирующие и регулирующие аппараты в исходное положение (S11 – «Г»; S1 – S7 – выкл.; АТР1 – на минимум; АТР2 – на минимум). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.
3. Подать напряжение на стенд (QF1).
4. Запустить АД (SB1) и разогнать его до подсинхронной скорости замыканием SB5 – SB8.
5. Установить ток возбуждения $A_3 = 10$ А (АТР2).
6. Перевести АД в синхронный режим, для чего включить SB4.
7. Снять данные на холостом ходе, занести их в табл. 5.1.
8. Установить необходимое возбуждение ГПН (АТР1).
9. Изменяя нагрузку ГПН (S1 – S7), снять показания приборов и занести их в табл. 5.1.
10. Рассчитать необходимые параметры и построить характеристики СД.

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЁТА

$$\cos \varphi_1 = P_{\text{вх}} / S; \quad (5.1)$$

$$P_{\text{вх}} = P_A + P_B + P_C; \quad (5.2)$$

$$S = 3 U_{\phi} I_{\phi}; \quad (5.3)$$

$$P_{1\Gamma} = P_{2\text{дв}} = I_2 U_2 / \eta_{\Gamma}; \quad (5.4)$$

Таблица 5.1

$I_{\text{в}}$		Измерено				Вычислено			
		P_1 , Вт	I_1 , А	I_2 , А	U_2 , В	$\cos \varphi_1$	M , Н/м	P_2 , Вт	η
1	A								
	B								
	C								
2	A								
	B								
	C								
3	A								
	B								
	C								
4	A								
	B								
	C								
5	A								
	B								
	C								
6	A								
	B								
	C								

КПД ГПН, определяется по универсальной кривой $\eta = f(P_{2\Gamma})$:

η_{Γ}	0,47	0,66	0,75	0,79	0,8	0,79
$P_{2\Gamma}^*$	0,17	0,34	0,51	0,68	0,84	1,0

$$P_{2\Gamma}^* = \frac{P_{2\Gamma}}{P_{2\text{н}}},$$

где $P_{2\text{н}}$ – номинальная мощность генератора (паспортные данные);
 $P_{2\Gamma} = I_2 U_2$ – мощность на выходе генератора;

$$\eta = P_2 / P_1; \quad (5.5)$$

$$M = 9,55 P_2 / n_{2\text{н}}. \quad (5.6)$$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурно-логическая схема синхронного двигателя.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Характеристики синхронного двигателя.
6. Выводы.
7. Список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Конструктивные особенности СД.
2. Принцип действия СД.
3. Особенности пуска и регулирования СД.
4. Как влияет ток возбуждения СД на $\cos \varphi$?
5. Как зависит электромагнитный момент СД от угла θ ?
6. Схемы возбуждения СД.
7. Отличие СД от синхронного компенсатора.
8. Потери энергии в СД.
9. Явление реакции якоря.
10. Способы повышения $\cos \varphi$ в электрических сетях.
11. Конструктивные отличия СД с неявнополюсным индуктором от АД с фазным ротором.
12. Векторные диаграммы СД.
13. Физический смысл коэффициента мощности и способы его повышения.
14. Почему СД нуждается в специальных способах пуска?
15. Преимущества и недостатки СД по сравнению с АД.
16. Способы регулирования СД.
17. Отличие угловых характеристик явно- и неявнополюсных СД.
18. Поясните процесс нагрузки и саморегулирования СД с помощью его СЛС.
19. Чем определяется мощность СД?
20. Чем определяется угол $\theta_{кр}$? Его физический смысл.
21. Принципиальная электрическая схема стенда УЭСМ-2 для данной работы.
22. Принцип действия реактивного двигателя.
23. Принцип действия гистерезисного двигателя.
24. Индукторная синхронная машина. Устройство и принцип действия.
25. Шаговый двигатель.

ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ц е л ь р а б о т ы : изучить конструкцию генератора постоянного напряжения, опытным путём получить характеристики холостого хода, нагрузочную, внешнюю и регулировочную для генераторов с независимым возбуждением.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2, 3]

Генератор постоянного напряжения – преобразователь механической энергии в электрическую постоянного тока, состоящий из статора и якоря, у которого при постоянной частоте вращения величина ЭДС зависит от возбуждения.

Генераторы постоянного напряжения (ГПН) выполняются с независимым возбуждением или самовозбуждением. Независимое возбуждение в большинстве случаев электромагнитное, т.е. на полюсах имеется обмотка возбуждения, по которой проходит постоянный ток от постороннего источника. Генераторы независимого возбуждения применяются во всех случаях, когда необходимо регулировать напряжение от нуля до номинальной величины, а также при изменении знака напряжения. Напряжение на зажимах генератора параллельного возбуждения создается в процессе самовозбуждения, основанном на использовании существующего в машине небольшого остаточного магнитного потока. Генераторы параллельного возбуждения часто применяются для получения постоянного тока, так как они не требуют дополнительного источника электроэнергии для питания цепи возбуждения, что существенно упрощает обслуживание машины; вместе с тем напряжение таких генераторов мало изменяется из-за колебаний нагрузки. Генератор приводится во вращение асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (рис. 1.1). Мощность, потребляемая двигателем из сети, измеряется ваттметром W_1 . Ток двигателя контролируется амперметром A_1 , напряжение и ток генератора контролируются приборами: вольтметром V_2 и амперметром A_2 . Ток возбуждения контролируется прибором A_3 .

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Структурно-логическая схема ГПН содержит два компаратора (по числу уравнений равновесия) (рис. 6.1):

K_1 – уравнение магнитного равновесия;

K_2 – уравнение электрического равновесия;

два блока умножения.

Вращающий момент приводного двигателя создаёт частоту вращения якоря генератора – n_2 .

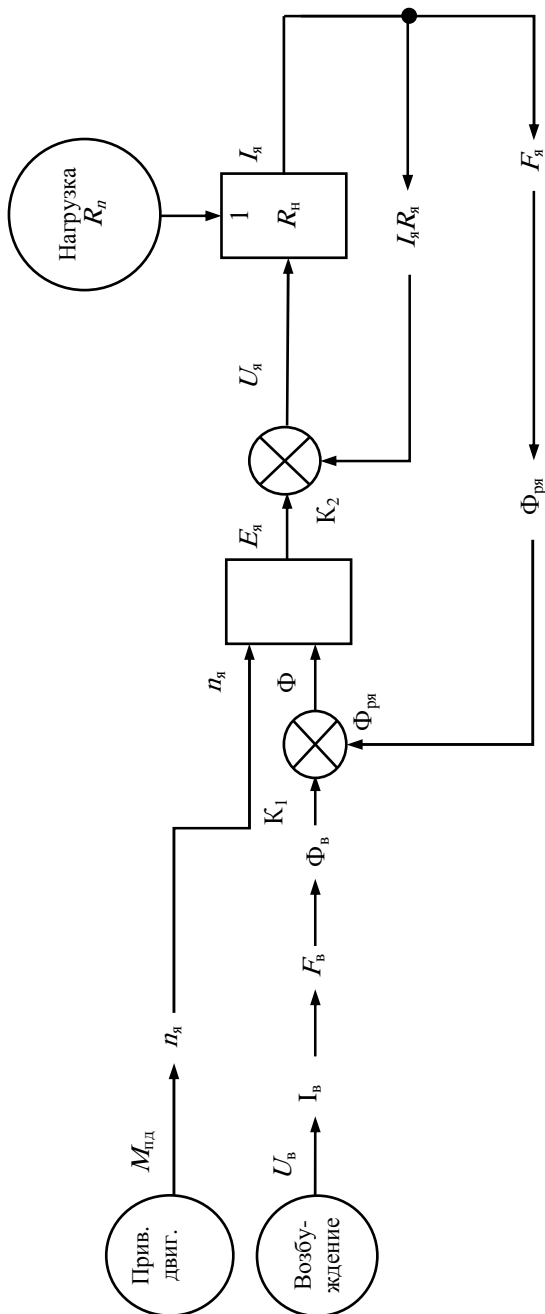


Рис. 6.1. Генератор постоянного напряжения (структурно-логическая схема преобразований)

Напряжение возбуждителя U_b посредством создаваемой постоянной МДС F_b возбуждает основной магнитный поток генератора Φ . Результирующий магнитный поток Φ с учётом реакции якоря $\Phi_{р\text{я}}$ наводит в обмотке якоря ЭДС E_a , которая после вычитания падения напряжения создаёт напряжение U_a .

Ток якоря определяется как напряжением U_a , так и ЭДС E_a , которая в свою очередь является функцией частоты вращения якоря n_a .

ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ [2]

$$E = U + I_a R_a ; \quad (6.1)$$

$$E = \frac{pN}{60a} n \Phi ; \quad (6.2)$$

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi_a I_a ; \quad (6.3)$$

$$P_1 = U I_a + I_a^2 R_a ; \quad (6.4)$$

$$e_b = i_b R_b + L \frac{di_b}{dt} . \quad (6.5)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться со схемой стенда рис. 1.1, расположением приборов и пускорегулировочной аппаратуры; записать основные паспортные данные испытуемой машины, технические характеристики приборов и первичного двигателя.
2. Установить коммутационные аппараты в исходное положение (S11 – «Г»; S1 – S7 – выкл.; АТР1 – на минимум). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.
3. Подать напряжение на стенд (QF1).

4. Подать напряжение на обмотки статора АД с фазным ротором (SB1).
5. Перевести АД с фазным ротором в режим АД с короткозамкнутым ротором, для чего включить КМ5 – КМ8.
6. Снять характеристику холостого хода $E_r = f(I_b)$. Изменяя значения тока возбуждения I_b (A_A), снимаем значение ЭДС, данные измерения сводим в табл. 6.1.
7. По данным табл. 6.1 построить характеристику холостого хода $E_r = f(I_b)$ при $I_2 = 0$, $n = \text{const}$.
8. Снять нагрузочную характеристику $U_{\text{я}} = f(I_b)$. Установить ток нагрузки $I_{\text{я}}$, увеличивая нагрузку (S1 – S7) и изменяя ток возбуждения таким образом, чтобы $I_{\text{я}} = \text{const}$, снимаем значения напряжения $U_{\text{я}}$. Данные сводим в табл. 6.2.

Таблица 6.1

I_b, A						
E_r, B						

Таблица 6.2

I_b, A						
$U_{\text{я}}, B$						

9. По данным табл. 6.2 построить нагрузочную характеристику $U_{\text{я}} = f(I_b)$, совместить ее с характеристикой холостого хода.

10. Снять внешнюю характеристику $U_{\text{я}} = f(I_{\text{я}})$ при $n = \text{const}$, $I_b = \text{const}$. Опыт проводится для $I_b = 0,5$ и 1 А. Установить ток возбуждения и, изменяя значение тока нагрузки (S1 – S7), снимаем изменение напряжения. Данные сводим в табл. 6.3.

11. По данным табл. 6.3 построить внешнюю характеристику $U_{\text{я}} = f(I_{\text{я}})$.

12. Снять регулировочную характеристику $I_b = f(I_{\text{я}})$. Установить значение напряжения $U_{\text{я}} = \text{const}$, увеличивая ток нагрузки (S1 – S7), одновременно изменяя ток возбуждения таким образом, чтобы $U_{\text{я}}$ не изменялось. Данные сводим в табл. 6.4.

13. По данным табл. 6.4 построить регулировочную характеристику $I_b = f(I_{\text{я}})$.

Таблица 6.3

I_b, A						
$U_{\text{я}}, B$						

Таблица 6.4

I_b, A						
$I_{\text{я}}, A$						

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурно-логическая схема генератора постоянного напряжения.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Построенные характеристики генератора постоянного напряжения.
6. Выводы.
7. Список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство генератора постоянного напряжения.
2. Принцип действия ГПН.
3. Характеристики ГПН независимого возбуждения.
4. Как меняется напряжение на зажимах генератора при увеличении нагрузки? Объяснить формулу $U_r = E - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$.
5. Какие потери возникают при работе генератора и от чего они зависят?
6. Как определить КПД генератора?
7. Как меняется КПД при изменении нагрузки?
8. Порядок включения генератор независимого возбуждения.
9. Объяснить принцип самовозбуждения и его условия.

10. Уравнения электрического и энергетического равновесия.
11. Внешняя характеристика ГПН смешанного возбуждения. Согласное и встречное включение обмоток.
12. Назначение коллектора ГПН.
13. Пояснить СЛС ГПН.
14. Магнитная цепь ГПН.
15. Реакция якоря ГПН.
16. Геометрическая и физическая нейтраль ГПН.
17. Причины искрения под щётками.
18. Причина снижения напряжения генератора параллельного возбуждения под нагрузкой.
19. Как изменить жесткость внешней характеристики ГПН смешанного возбуждения?
20. Принципиальная электрическая схема стенда УЭСМ-2 для данной работы?
21. Чем отличаются петлевая и волновая обмотки якоря?
22. Какие основные параметры обмотки якоря?
23. Каковы условия самовозбуждения ГПН?
24. Каковы способы возбуждения ГПН?
25. Регулировочная характеристика ГПН.

ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: ознакомиться с устройством и особенностью пуска двигателя постоянного тока. Получить опытным путём механические и рабочие характеристики.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2]

Двигатель постоянного тока – преобразователь электрической энергии постоянного тока в механическую, состоящий из статора и якоря, у которого частота вращения якоря зависит от нагрузки.

Свойства двигателей постоянного тока (ДПТ), как и генераторов, в основном, определяются способом питания обмотки возбуждения. В связи с этим различают двигатели с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Машина постоянного тока с независимым или параллельным возбуждением, подключенная к сети с постоянным напряжением, может работать как в генераторном, так и в двигательном режиме, и переходить из одного режима работы в другой.

ДПТ имеют большой пусковой ток и, чтобы ограничить его величину до допустимых значений, в схемах включения двигателя предусматривают соответствующие пусковые устройства, как, например, пусковой реостат.

Момент на валу двигателя при испытаниях в лабораторных условиях часто обеспечивается генераторами, нагруженным на регулируемое переменное сопротивление. Тогда пересчёт мощности P_2 на валу двигателя производится по формуле:

$$P_2 = P_r / \eta_r, \quad (7.1)$$

где η_r – КПД генератора, определяемый по графику, прилагаемому к паспорту генератора.

Определение полезной мощности генератора P_r можно осуществить как ваттметром, так и по показаниям вольтметра V_r и амперметра A_r , включёнными в цепь нагрузки.

Частота вращения якоря:

$$n_2 = E_{гг} / C, \quad (7.2)$$

где C – постоянная тахогенератора; $E_{гг}$ – ЭДС тахогенератора.

При холостом ходе:

$$n_0 = U / C_e \Phi. \quad (7.3)$$

Для исследования двигателя постоянного тока используется регулируемая механическая нагрузка, создаваемая на валу с помощью асинхронного двигателя с фазным ротором, работающим в режиме синхронного генератора.

СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

СЛС ДПТ содержит три компаратора, которые соответствуют трём уравнениям равновесия:

K_1 – уравнение электрического равновесия;

K_2 – уравнение магнитного равновесия;

K_3 – уравнение механического равновесия;

два блока умножения и одно интегрирующее.

Напряжение сети U_a с учётом противоЭДС E_a определяет величину тока якоря I_a и через МДС F_l магнитный поток реакции якоря $\Phi_{р.я}$. Напряжение возбуждения U_b определяет через МДС F_b величину основного магнитного потока ДПТ Φ . Взаимодействие магнитного потока Φ и тока якоря создаёт вращающий момент двигателя $M_{дв}$.

Алгебраическая сумма моментов двигателя $M_{дв}$ и момента нагрузки даёт величину динамического момента

$$M_{дин} = j \frac{d\omega}{dt}, \quad (7.4)$$

который после интегрирующего звена определяет скорость вращения якоря – n_2 .

Главная отрицательная обратная связь, обеспечивающая стабилизацию частоты вращения, – это связь по ЭДС.

ОСНОВНЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ [2]

$$E = U - I_{\text{я}} R_{\text{я}} ; \quad (7.5)$$

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}} ; \quad (7.6)$$

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R_{\text{я}}}{C_e C_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n_c ; \quad (7.7)$$

$$P_2 = M \omega = M \frac{\pi n}{30} ; \quad (7.8)$$

$$M = 9,55 \frac{P_2 \cdot 10^3}{n_2} ; \quad (7.9)$$

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} ; \quad (7.10)$$

$$E = \frac{pN}{60a} \Phi n . \quad (7.11)$$

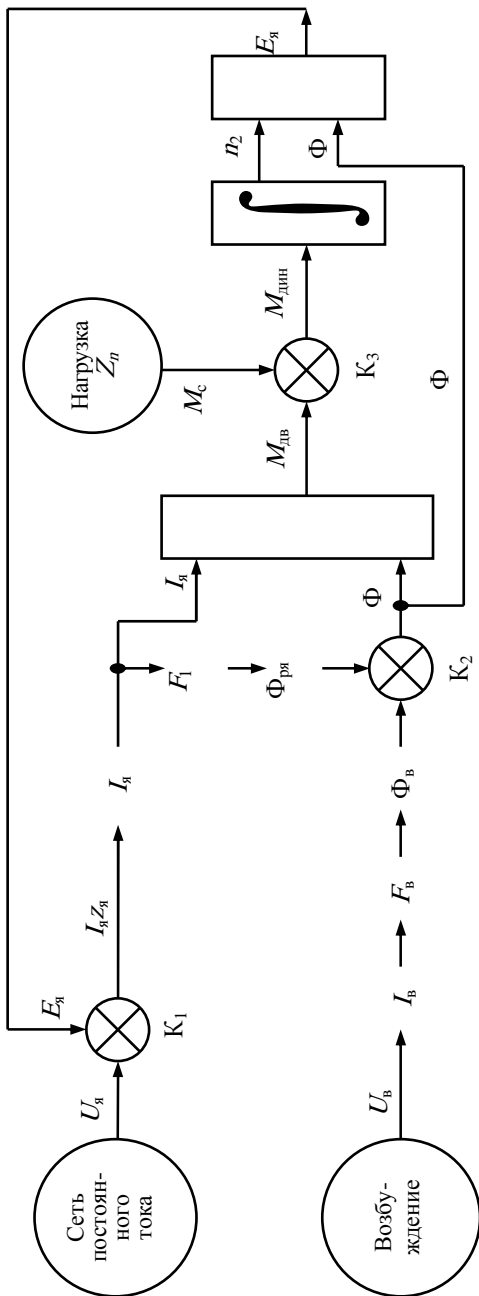


Рис. 7.1. Двигатель постоянного тока (структурно-логическая схема преобразований)

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться со схемой стенда рис. 1.1, расположением коммутационных и регулирующих аппаратов, измерительных приборов, электрических машин и преобразователей. Снять технические данные исследуемых машин.
2. Установить коммутационные аппараты в исходное положение (S1 – S7 – отключены; S11 – в положение «ТП», $R_{\text{зад}}$ – на минимум; АТР1 – на максимум). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

3. Подать напряжение на стенд QF1.
4. Включить ТП (SB3).
5. Подключить нагрузку и частотомер – SB2.
6. Подать напряжение на ДПТ с помощью $R_{зад}$.
7. Снять рабочие характеристики, изменяя величину нагрузки ($S1 - S7$), напряжение $U_{я}$ ($R_{зад}$) и ток возбуждения ДПТ (АТР1).
8. Полученные данные занести в табл. 7.1.
9. Построить рабочие характеристики ДПТ ($M, \eta, \omega_2, I_{я} = f(P_2)$).

Таблица 7.1

№ опыта	Измерено					
	$U_{я}, В$	$I_{я}, А$	$V_3, В$	$U_1, В$	$I_1, А$	$P_1, Вт$
1						
2						
3						
4						
5						
6						

№ опыта	Вычислено			
	$\omega_2, рад/с$	$M, Н \cdot м$	η	$P_2, Вт$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурно-логическая схема двигателя постоянного тока.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Построенные рабочие характеристики.
6. Выводы.
7. Список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип действия ДПТ.
2. ПротивоЭДС и её влияние на работу ДПТ.
3. Способы регулирования частоты вращения.
4. Влияние сопротивления в цепи якоря на механическую характеристику.
5. Способы пуска ДПТ.
6. Способы изменения направления вращения якоря.
7. Последствия обрыва цепи обмотки возбуждения.
8. Почему ДПТ параллельного возбуждения нельзя перевести в режим последовательного возбуждения и наоборот?
9. Рабочие характеристики ДПТ.
10. Тормозные режимы ДПТ (схемы и механические характеристики).
11. Свойства ДПТ последовательного возбуждения.
12. Механические характеристики ДПТ различных способов возбуждения.
13. Стабилизация частоты вращения ДПТ.
14. Преимущества и недостатки ДПТ по сравнению с АД с короткозамкнутым ротором.
15. Режим противовключения.
16. Определение скорости идеального холостого хода.
17. Уравнение механической характеристики ДПТ.
18. Уравнения электрического и энергетического равновесия ДПТ.
19. Определение добавочного сопротивления в цепи якоря при противовключении.
20. Определение сопротивления динамического торможения.
21. Объяснить процесс нагрузки и саморегулирования ДПТ с помощью его СЛС.
22. Коммутация машин постоянного тока. Способы улучшения коммутации.
23. Конструктивные элементы ДПТ и их назначение.
24. Принципиальная электрическая схема стенда.
25. При каких условиях возможен реверс ДПТ в процессе работы под нагрузкой?
26. По каким причинам снижается пусковой ток ДПТ при питании цепи якоря однополупериодным напряжением?
27. Какие отличия обмоток последовательного и параллельного возбуждения?
28. Каковы назначения основных конструктивных элементов ДПТ?
29. Какие аварийные режимы работы возможны для ДПТ?
30. Каков результат обрыва цепи возбуждения ДПТ независимого возбуждения?

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТП-Д

Цель работы: изучить структурную схему системы ТП-Д с обратной связью по скорости, по напряжению и по току нагрузки, построить механические характеристики системы ТП-Д.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [3]

Система электропривода тиристорный преобразователь-двигатель постоянного тока (ТП-Д) получила широкое распространение в различных производствах благодаря следующим преимуществам: высокий КПД, компактность, широкий диапазон плавного регулирования скорости и высокая точность поддержания заданной скорости. На рис. 8.1 приведена структурная схема системы ТП-Д с тиристорным преобразователем ЭПУ2-1М.

Задатчик скорости (ЗС) в масштабе напряжения определяет угловую скорость двигателя (Д). Датчик скорости (тахогенератор) служит для непрерывного измерения скорости двигателя. Элемент сравнения (ЭС) сравнивает заданную U_3 и действительную U_d величины скорости двигателя в масштабе напряжения, выдавая на вход промежуточного усилителя (ПУ) сигнал рассогласования $\Delta U = U_3 - U_{ТГ}$.

Выход ПУ является управляющим напряжением U_y для системы импульсно-фазового управления (СИФУ), которая выполняет две функции: изменяет фазу управляющего импульса и осуществляет формирование прямоугольных управляющих импульсов. Силовой тиристорный блок (СБ) содержит симистор, последовательно включенный с силовым диодным мостом. Узел токоограничения представляет собой отрицательную связь по току, осуществляемую с помощью дополнительной обмотки дросселя, включенного в цепь якоря двигателя.

Зависимость между углом открытия тиристоров α и входным задающим напряжением U_3 , $\alpha = f(U_3)$ называется регулировочной характеристикой системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

Механическая характеристика двигателя в системе ТП-Д определяется по формуле:

$$\omega = \frac{E_d}{C_e \Phi} - \frac{R_y}{C_e C_M \Phi^2} M ; \quad (8.1)$$

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha ; \quad (8.2)$$

$$E_{d0} = \frac{m}{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m} , \quad (8.3)$$

где m – число фаз выпрямителя; U_2 – действующее напряжение вторичной обмотки трансформатора; α – угол регулирования тиристора.

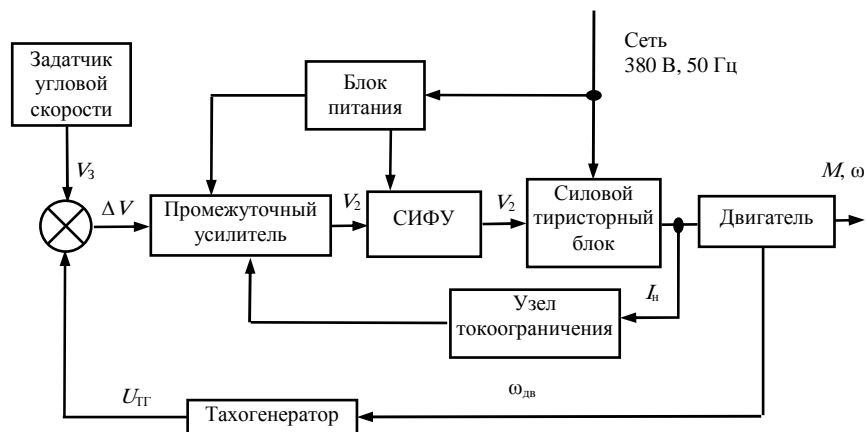


Рис. 8.1. Структурная схема системы ТП-Д

Момент определяется по формуле:

$$M = \frac{M_n I_y}{I_{я.н}} , \quad (8.4)$$

где M_n – номинальный момент.

Начальная область механических характеристик не подчиняется уравнению (8.1). Причина ее появления заключается в возникновении режимов прерывистых токов преобразователя при малых нагрузках.

Меньшую зону прерывистых токов имеют трёхфазные преобразователи, выполненные по мостовой или нулевой схемам.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с расположением и устройством всех узлов стенда рис. 8.2, записать технические характеристики основных аппаратов и машин.

2. Снять данные для расчета механической характеристики тиристорного преобразователя $\omega = f(M)$, для чего подать напряжение на стенд и на приводной двигатель ЭМУ (QS1, QS2). Переключателем S2 включить электромашинный усилитель (ЭМУ). С помощью кнопки SB1 включить питание тиристорного преобразователя и с помощью задатчика скорости разогнать двигатель постоянного тока до номинальной частоты вращения. С помощью потенциометра R1 изменять величину

тормозного тока асинхронного двигателя (по 6...8 значений для каждого значения напряжения якоря). Предельное значение тормозного тока (A_3) – 7,5 А. Полученные данные занести в табл. 8.1.

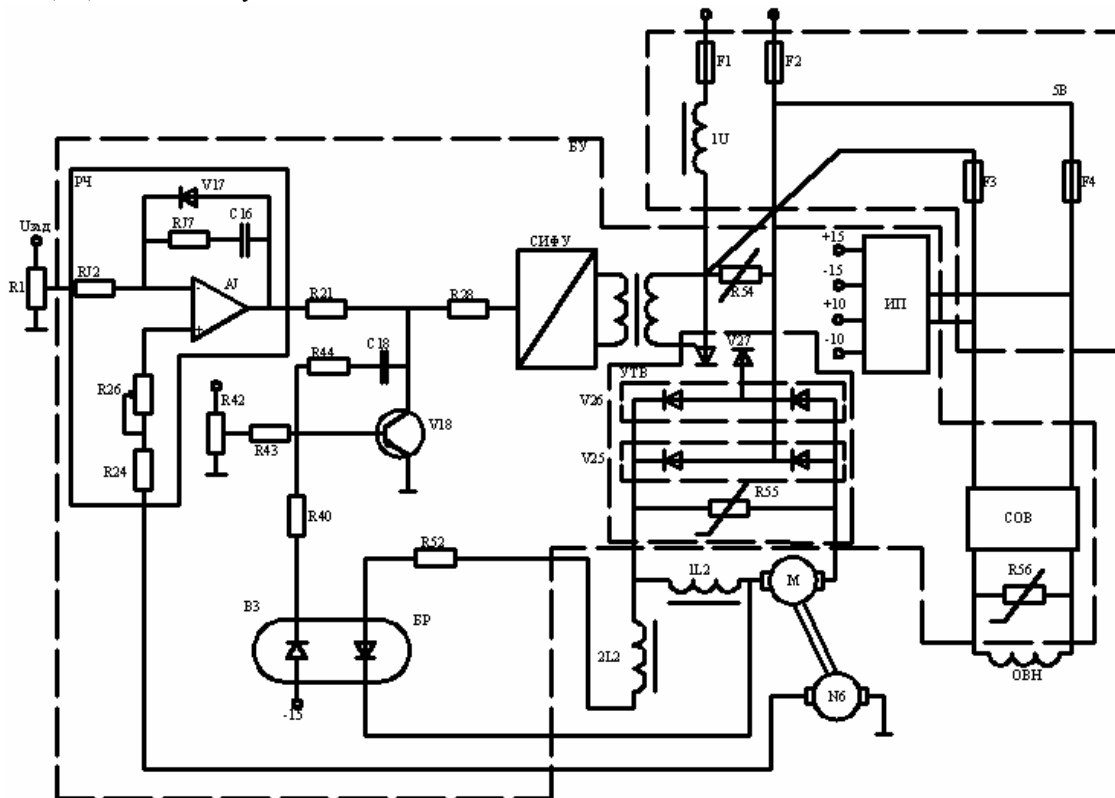


Рис. 8.2. Функциональная схема комплектного тиристорного электропривода

Таблица 8.1

$U_z = 220$ В				$U_z = 180$ В				$U_z = 120$ В				$U_z = 80$ В			
$U_{ТГ}$, В	ω , с ⁻¹	I_a , А	M , Н·м	$U_{ТГ}$, В	ω , с ⁻¹	I_a , А	M , Н·м	$U_{ТГ}$, В	ω , с ⁻¹	I_a , А	M , Н·м	$U_{ТГ}$, В	ω , с ⁻¹	I_a , А	M , Н·м

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурная схема системы ТП-Д.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Построенные механические характеристики.
6. Выводы.
7. Список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как регулируется угловая скорость двигателя в системе ТП-Д?
2. Особенности механических характеристик в системе ТП-Д.
3. Как осуществляется токоограничение?
4. Как осуществляется регулирование скорости в системе ТП-Д при различных возмущениях (по нагрузке и по напряжению питающей сети)?

5. Структура системы ТП-Д.
6. Какие бывают схемы силовых блоков ТП?
7. Чему равен угол α для неуправляемого вентиля?
8. Что такое зона прерывистых токов?
9. Преимущества и недостатки системы ТП-Д.
10. Пояснить структурную схему ТП-Д.
11. Принципиальная электрическая схема стенда.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ФАЗОРЕГУЛЯТОРА И ИНДУКЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

Ц е л ь р а б о т ы : изучить принцип действия, устройство и работу фазорегулятора и индукционного регулятора напряжения.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [2]

Фазорегуляторами называют электрические машины переменного тока, преобразующие угол поворота ротора θ в напряжение, пропорциональное этому углу или некоторым его функциям. В зависимости от закона изменения напряжения на выходе их подразделяют на следующие типы:

- а) синусно-косинусный, позволяющий получать на выходе два напряжения, одно из которых пропорционально $\sin \theta$, а другое – $\cos \theta$;
- б) линейный фазорегулятор, выходное напряжение которого пропорционально углу θ ;
- в) вращающийся фазорегулятор, выходное напряжение которого имеет связь с подаваемыми первичными напряжениями U_1 и U_2 в виде закона

$$U_{\text{вых}} = C\sqrt{U_1^2 + U_2^2}, \quad (9.1)$$

где C – постоянная фазорегулятора.

Устройство фазорегуляторов. Эти машины выполняют так же, как асинхронный двигатель с фазным ротором (в данной лабораторной работе используется именно АД с фазным ротором). На статоре и роторе размещают по две одинаковые однофазные распределённые обмотки, сдвинутые между собой в пространстве на 90° . Магнитопровод изготавливают из листов электротехнической стали или пермаллоя, изолированных друг от друга.

Принцип действия. При подключении обмотки возбуждения B (рис. 9.1) к сети переменного тока в машине возникает продольный магнитный поток Φ_d (рис. 9.2, а), пульсирующий во времени с частотой сети. При холостом ходе в обмотке неподвижного ротора S и C этот поток индуцирует ЭДС E_{S0} и E_{C0} , частота которых равна частоте сети f_1 , а действующее значение зависит от положения ротора относительно статора.

Допустим, что магнитный поток Φ_d распределён в пространстве синусоидально (рис. 9.2, б); в этом случае индукция в воздушном зазоре изменяется вдоль окружности статора и ротора по закону

$$B_x = B_m \cos(\pi x / \tau) \sin \omega t, \quad (9.2)$$

где B_x – индукция в воздушном зазоре по оси обмотки B .

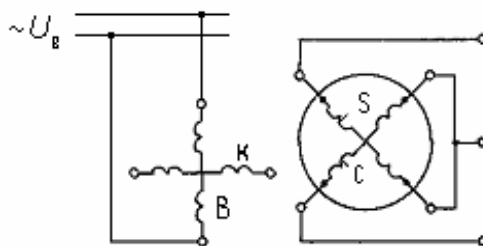


Рис. 9.1. Принципиальная схема четырёхобмоточного фазорегулятора

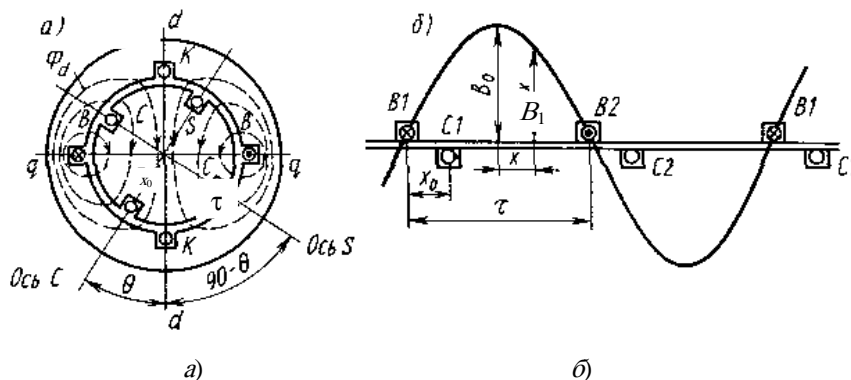


Рис. 9.2. Схематический разрез фазорегулятора (а) и график распределения индукции вдоль окружности его статора и ротора (б)

В обмотке статора поток Φ_d индуцирует ЭДС

$$E_B = 4,44 f_1 w_1 k_{061} \Phi_{dm}, \quad (9.3)$$

где w_1 и k_{061} – число витков и обмоточный коэффициент обмотки статора; Φ_{dm} – максимальное значение потока.

Предположим, что ось обмотки C ротора сдвинута относительно оси обмотки статора на некоторый угол $\varphi = \pi x_0 / \tau$ (рис. 9.2, а). В этом случае максимальное значение потока, сцеплённого с обмоткой C ,

$$\Phi_{cm} = \Phi_{dm} \cos \theta, \quad (9.4)$$

а ЭДС, индуцированная в этой обмотке,

$$E_{c0} = 4,44 f_1 w_2 k_{062} \Phi_{dm} \cos \theta, \quad (9.5)$$

где w_2 и k_{062} – число витков и обмоточный коэффициент обмотки ротора.

Из соотношения

$$E_{c0} / E_B = [w_2 k_{062} / (w_1 k_{061})] \cos \theta = k \cos \theta$$

выходное напряжение косинусной обмотки при холостом ходе

$$E_{c0} = k E_B \cos \theta. \quad (9.6)$$

Обмотка S ротора сдвинута относительно обмотки C на угол $\pi / 2$, следовательно, выходное напряжение в этой обмотке

$$E_{S0} = 4,44 w_2 k_{062} \Phi_{dm} \cos(\theta - \pi/2) = k E_B \cos(\theta - \pi/2) = k E_B \sin \theta.$$

Обмотка статора K с потоком Φ_d не связана, а следовательно, он не индуцирует в ней ЭДС. Эту обмотку используют для компенсации поперечных потоков, создаваемых обмотками ротора при нагрузке фазорегулятора. Таким образом, в обмотках ротора при холостом ходе индуцируются ЭДС, пропорциональные синусу или косинусу угла поворота ротора относительно соответствующего потока. Применяя различные схемы включения обмоток статора и ротора, можно получить и другие функциональные зависимости, а также уменьшить погрешности, вызываемые током нагрузки.

Индукционный регулятор напряжения (ИР) представляет собой машину с фазным ротором, предназначенную для плавного регулирования напряжения. Рассмотрим работу трёхфазного ИР, получившего наибольшее применение. Ротор ИР заторможен посредством червячной передачи, которая не только удерживает его в заданном положении, но и позволяет плавно поворачивать его относительно статора. Обмотки статора и ротора в ИР имеют автотрансформаторную связь (рис. 9.3), поэтому ИР иногда называют **поворотным автотрансформатором**.

Напряжение сети U_1 подводится к обмотке статора, при этом статор создаёт вращающееся магнитное поле, наводящее в обмотке статора ЭДС $E_1 = -U_1$, а в обмотке ротора – ЭДС E_2 (рис. 9.4, а).

Фазовый сдвиг этих ЭДС относительно друг друга зависит от взаимного пространственного положения осей обмоток статора и ротора, определяемого углом α . При $\alpha = 0$ оси обмоток совпадают, вращающееся поле одновременно сцепляется с обеими обмотками, и ЭДС E_1 и E_2 совпадают по фазе (при этом E_2 и U_1 находятся в противофазе). При $\alpha = 180$ эл. град. ЭДС E_1 и E_2 окажутся в противофазе (E_2 и U_1 совпадают по фазе). Если пренебречь внутренними падениями напряжения, то напряжение на выходе ИР определяется геометрической суммой:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}_2. \quad (9.7)$$

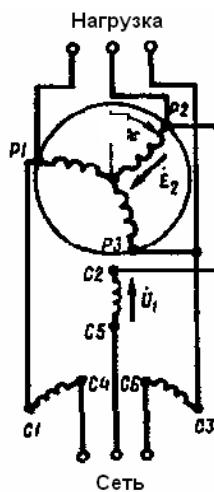


Рис. 9.3

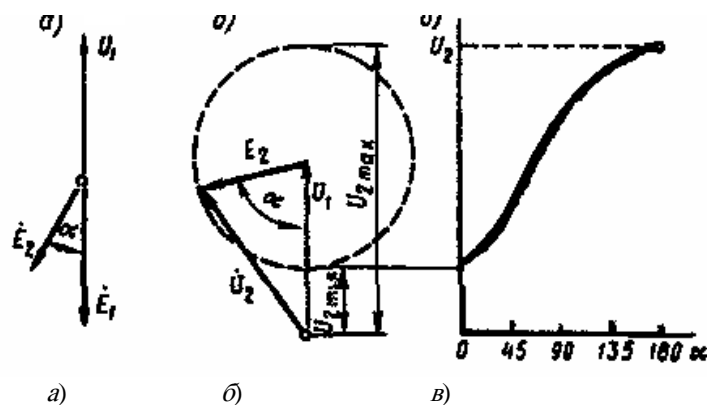


Рис. 9.4. Векторные диаграммы индукционного регулятора напряжения

При повороте ротора концы векторов E_2 и U_2 описывают окружность (рис. 9.4, б), при этом U_2 изменяется от $U_{2\min} = U_1 - E_2$ при $\alpha = 0$ до $U_{2\max} = U_1 + E_2$ при $\alpha = 180$ эл. град (рис. 9.4, в). Поворот ротора осуществляется либо вручную штурвалом, либо дистанционно включением исполнительного двигателя.

Индукционный регулятор применяется во всех случаях, где необходима плавная регулировка напряжения, например в лабораторных исследованиях.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему для исследования фазорегулятора (рис. 9.5)
2. Подать напряжение на ЛАТР. Его движком установить номинальное напряжение на первичной обмотки фазорегулятора ($U_{\text{ном}} = 220$ В), контролируя его по вольтметру V_1 .
3. Измерить напряжение на выходе фазорегулятора, между клеммами P1, P2 и P3 (U_{P1P2} ; U_{P2P3} ; U_{P1P3}) вольтметром V_2 , полученные значения напряжений занести в табл. 9.1.

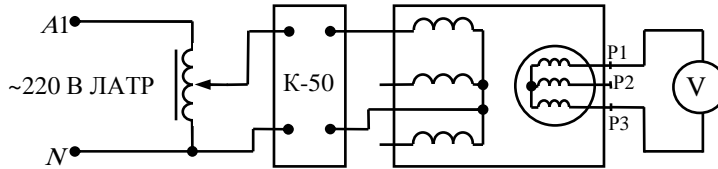


Рис. 9.5. Схема исследования фазорегулятора

Таблица 9.1

α , град	U_1 , В	U_{P1P2} , В	U_{P2P3} , В	U_{P1P3} , В
0				
30				
60				
90				
120				
150				
180				
210				
240				
270				
300				
330				
360				

4. Повернуть вал фазорегулятора на угол 30° и повторить измерения пункта 3.
5. Повторять пункты 3 и 4, пока вал не повернется на угол 360° .
6. По полученным данным построить графики зависимости $U_{P1P2} = f(\alpha)$; $U_{P2P3} = f(\alpha)$; $U_{P1P3} = f(\alpha)$.
7. Собрать схему для исследования работы индукционного регулятора (рис. 9.6).
8. Подать напряжение на ЛАТР. Его движком установить номинальное напряжение на ИР ($U_{\text{ном}} = 220$ В), контролируя его по вольтметру на К-50.
9. Измерить напряжение на выходе ИР, между клеммами P1, P3 (U_{P1P3}) вольтметром V, полученные значения напряжений занести в табл. 9.2.

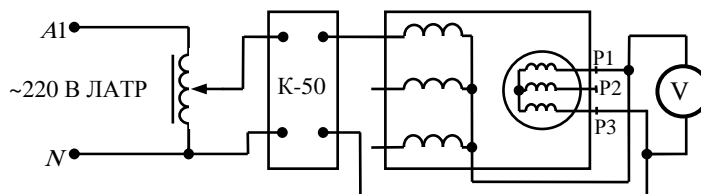


Рис. 9.6. Схема исследования индукционного регулятора

Таблица 9.2

α , эл. град.	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
U_{P1P3} , В													

10. Повернуть вал ИР на угол 30° и повторить измерения пункта 9.
11. Повторять пункты 9 и 10, пока вал не повернется на угол 360° .

12. По полученным данным построить графики зависимости $U_{PIP3} = f(\alpha)$.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
4. Построенные графики характеристик.
5. Выводы.
6. Список литературы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство фазорегулятора.
2. Принцип регулирования напряжения.
3. Область применения фазорегулятора.
4. Каков диапазон регулирования фаз?
5. Как зависит магнитный поток фазорегулятора от нагрузки?
6. Какая величина скольжения асинхронного двигателя с фазным ротором в режиме фазорегулятора?
7. Принцип регулирования напряжения.
8. Устройство индукционного регулятора напряжения.
9. В чем различие между схемами соединения индукционного регулятора напряжения и фазорегулятора?
10. Сколько раз напряжение на выходе ИР достигнет наибольшего значения за один оборот ротора, если обмотка имеет $2p = 6$?
11. Применение индукционного регулятора.
12. Чему равен коэффициент мощности асинхронного двигателя в режиме индукционного регулятора?
13. Принципиальная электрическая схема стенда.

ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ [4 – 9]

Современные частотные преобразователи как составная часть привода появились в результате многолетнего поиска решения задачи по созданию асинхронного электропривода, который исключал бы недостатки асинхронного двигателя (АД) (большие пусковые токи, малый диапазон регулирования, низкий $\cos \phi$), при сохранении своих преимуществ (простота конструкции, искробезопасность, высокая надёжность). Кроме этого, создаваемый электропривод обладал бы преимуществами двигателей постоянного тока (большой диапазон плавного регулирования, высокая перегрузочная способность), исключая их недостатки (сложность конструкции, наличие коллектора с токосъёмным узлом).

Первым этапом решения этой задачи стало изобретение Ф. Блэшке (1971 г.) принципа построения системы управления АД, в которой использовалась его векторная модель с ориентацией системы координат по потокоцеплению ротора.

Мгновенное значение электромагнитного момента любого электродвигателя определяется величинами тока и магнитного потока. Для управления моментом двигателей постоянного тока достаточно измерять одну независимую переменную – величину тока якоря.

Токи и потокоцепления статора и ротора АД вращаются с разными угловыми скоростями, имеют разные изменяющиеся во времени фазовые параметры и не подлежат непосредственному измерению и управлению. Следовательно, в АД необходимо обеспечить управление как амплитудой, так и фазой тока статора.

Уравнение электромагнитного момента получено из условия равенства электрических и механических потерь в АД [9]:

$$M = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 - \omega_2}, \quad (10.1)$$

где m_1 – число фаз; I_2' – приведенный ток ротора; r_2' – приведенное активное сопротивление ротора; ω_1 – частота вращения магнитного поля статора; ω_2 – частота вращения ротора.

Уравнение электромагнитного момента АД через векторные величины токов статора \vec{i}_1 и сопряженный вектор тока ротора \vec{i}_2^* [11]:

$$M = p M_{12} I_m (\vec{i}_1 \vec{i}_2^*), \quad (10.2)$$

где p – число пар полюсов статора; M_{12} – взаимная индуктивность статора и ротора; I_m – мнимая часть комплексного числа.

Мгновенные значения токов статора и ротора в показательной форме:

$$\vec{i}_1 = I_1 e^{j\theta_1}; \quad (10.3)$$

$$\vec{i}_2^* = I_2 e^{j\theta_2}, \quad (10.4)$$

где I_1 и I_2 – амплитудные значения токов статора и ротора, соответственно; θ_1 и θ_2 – углы поворота векторов тока I_1 и I_2 , соответственно.

Подставляя значения токов из (10.3) и (10.4) в уравнение (10.2), получаем

$$M = pM_{12}I_1I_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) = pM_{12}I_1I_2 \sin(\Delta\theta_{12}), \quad (10.5)$$

где $\Delta\theta_{12}$ – угол между векторами токов ротора и статора.

Из уравнения (10.5) следует, что максимальный момент АД соответствует $\Delta\theta_{12} = \pi/2$, т.е. когда векторы токов статора и ротора перпендикулярны.

При построении систем управления электроприводом на основе векторного управления используют модели АД во вращающихся координатах, которые жёстко связаны с векторами магнитных потоков ротора и статора.

Физические процессы в АД описываются системой дифференциальных уравнений электрического равновесия статора и ротора по осям d и q [12]:

$$\begin{aligned} U_{1d} &= i_{1d}R_1 + (L_1 + M_{12})\frac{di_{1d}}{dt} + E_{21d}; \\ U_{1q} &= i_{1q}R_1 + (L_1 + M_{12})\frac{di_{1q}}{dt} + E_{21q}; \\ 0 &= i_{2d}R_2 + (L_2 + M_{21})\frac{di_{2d}}{dt} + E_{12d}, \end{aligned} \quad (10.6)$$

где U_{1d} , U_{1q} , i_{1d} , i_{1q} – проекции векторов напряжений и токов статора в координатной системе d – q ; i_{2d} – продольная составляющая вектора тока ротора (численно равна амплитуде тока ротора); E_{21d} , E_{21q} – проекции векторов ЭДС, наводимых в статоре током ротора; E_{12d} – продольная составляющая вектора ЭДС ротора, наводимая током статора; L_1 , L_2 – индуктивность обмоток статора и ротора, соответственно.

Из уравнений (10.6) следует, что проекции на ось d формируют магнитные потоки статора и ротора, а проекции на ось q создают электромагнитный момент АД.

Система векторного уравнения обеспечивает двойное преобразование координат мгновенных значений переменных. На основе измеренных токов и напряжений с помощью преобразования Парка определяются их значения в координатах α , β (неподвижная система координат, ориентированная по оси фазы обмотки статора). Затем, с учётом угла поворота поля ротора, получают токи и напряжения в координатах d , q (система координат, вращающаяся синхронно с потокосцеплением ротора и ориентированная по его направлению). Эти сигналы и являются обратными связями системы управления.

С помощью преобразования Кларка происходит формирование напряжения в реальных трёхфазных осях a , b , c .

Координатно-фазовые преобразования в системе векторного управления обеспечиваются тремя функциональными блоками:

- а) блок регуляторов переменных – БРП;
- б) блок вычисления переменных – БВП;
- в) блок задачи переменных – БЗП.

Большой объём и скорость вычислений обеспечивает микропроцессорный контроллер, разработка которого явилась вторым этапом создания векторной системы управления АД.

Третий этап создания современного частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением – разработка мощных высоковольтных полевых транзисторов с изолированным затвором серии IGBT. На их базе построен высокочастотный широтно-импульсный модулятор (ШИМ) с автономным инвертором напряжения (АИН).

Высокая частота коммутации и ключевой режим работы транзисторов обеспечивают высокий КПД, большой диапазон регулирования и малые габариты преобразователей с минимальным влиянием на питающую сеть.

Точность поддержания заданной частоты вращения и диапазон регулирования определяются точностью измерения мгновенных значений скорости. Для большинства реальных технологических установок достаточен диапазон 1 : 100. В этих случаях сигнал обратной связи по скорости формируется с помощью «Наблюдателя» состояния АД, представляющего собой математическую модель, которая учитывает типовые или измеренные параметры АД.

Ощутимую экономию электрической энергии (50 – 70 %) можно получить при использовании частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением в насосных установках горячей и холодной воды, в системе водо- и теплоснабжения вспомогательного оборудования котелен, ТЭЦ и котлоагрегатов.

Регулирование дросселированием связано с потерями энергии на сопротивлениях, создаваемых регулирующими устройствами. Эти потери отсутствуют при управлении производительностью насосного агрегата путём регулирования частоты вращения его приводного двигателя. Кроме этого, разгон и торможение по S-образному закону обеспечивают ограничение 1-й и 2-й производных по скорости, что исключает вредное воздействие переходных процессов (типа гидравлический удар) в напорных трубопроводах и технологическом оборудовании.

ВЕКТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ СО ВСТРОЕННЫМ PLC-КОНТРОЛЛЕРОМ ТИПА E2-8300-002H

1. Техническая характеристика.

- 1.1. Мощность 2,2 кВт.
- 1.2. Напряжение входа 380 В, 50 Гц.
- 1.3. Напряжение выхода 0...380 В.
- 1.4. Номинальный ток 5,2 А.
- 1.5. Диапазон регулирования частоты 0,01...650 Гц.
- 1.6. Время разгона 0,1...3600 с.
- 1.7. Несущая частота ШИМ 16 кГц.

2. Программируемые функции.

Список программируемых функций преобразователя

№ группы констант	Наименование группы	Краткое описание функций
0	Режим управления	Выбор режима управления
1	Режимы пуска/останова и задания частоты	Способы пуска/останова и задания частоты
2	Режимы ручного/автоматического перезапуска	Режимы перезапуска при кратковременной потере питания и аварийных остановах
3	Параметры функционирования	Уровень доступа к константам. Время разгона и торможения. S-кривые разгона/торможения. Верхний и нижний пределы рабочей частоты. Выбор запрещенных частот. Несущая частота ШИМ. Параметры торможения постоянным током. Колебательный режим
4	Режимы работы дисплея	Включение индикации выходного тока, напряжения, скорости и других параметров
5	Многофункциональные входы	Программирование входных клемм управления для выполнения различных функций
6	Установка фиксированных скоростей и скорости шагового режима с пульта управления	Задание до 8 фиксированных скоростей и скорости шагового режима
7	Настройка аналоговых входных сигналов	Выбор коэффициентов усиления, смещения и наклона характеристики аналоговых входов AIN и AI2(S6)
№ группы констант	Наименование группы	Краткое описание функций
8	Настройка многофункциональных выходных реле и выходных сигналов	Программирование аналогового выхода для контроля основных параметров. Программирование дискретных выходов для выполнения различных функций
9	Функции защиты двигателя и преобразователя	Настройка характеристик: защиты двигателя от перегрузки; предотвращение срыва; защиты от перегрузки по моменту
10	Настройка характеристик U/f	Выбор одной из 18 фиксированных характеристик U/f
11	Настройка параметров ПИД-регулятора	Выбор режима работы ПИД-регулятора, настройка параметров ПИД-регулятора для регулирования технологических параметров (например – давления, температуры) при работе преобразователя с датчиком обратной связи
12	Настройка ПИД-регулятора при потере обратной связи	Настройка параметров определения потери обратной связи ПИД-регулятора. Способы управления приводом при потере обратной связи ПИД-регулятора
13	Параметры управления по последовательной линии связи	Выбор параметров при управлении преобразователем от PLC или ПК
14	Параметры автонастройки	Параметры двигателя, которые записываются в память преобразователя в процессе автонастройки
15	Индикация параметров преобразователя и восстановление заводских уставок	Индикация модели преобразователя и версии программного обеспечения. Список последних ошибок. Индикация времени наработки преобразователя. Восстановление заводских уставок

Для проведения работ по программированию встроенного ПЛК, отладки программы и запуску преобразователя частоты (ПЧ) в работу необходимо использовать:

- интерфейсный кабель RS-232;
- программу «7300 CD DriverLink»;
- Руководство по программированию встроенного ПЛК преобразователя частоты E2-8300.

Для программирования ПЛК необходимо преобразователь частоты соединить с COM-портом компьютера с помощью интерфейсного кабеля RS-232, установить на компьютер и запустить программу, а далее действовать в соответствии с Руководством по программированию.

Пульт управления

Кнопка	Режим управления	Режим программирования
▲	Увеличение заданной частоты	Увеличение номера или значения константы
▼	Уменьшение заданной частоты	Уменьшение номера или значения константы
◀ СБРОС	Переход к следующей цифре, сброс ошибки	Переход к следующей цифре
ВВОД	Не используется	Чтение и запись значений констант
ПРОГ.	Вход в режим программирования	Выход из режима программирования
ПУСК СТОП	Пуск и останов двигателя	Пуск и останов двигателя
ВПЕРЕД НАЗАД	Выбор направления вращения	Не используется

Режим управления устанавливается после подачи питания на преобразователь. В этом режиме доступны следующие функции:

- пуск/останов двигателя при установленном значении $1 - 01 = 0000$ (источник команды ПУСК – пульт управления). Пуск двигателя обеспечивается нажатием кнопки ПУСК/СТОП, останов – повторным нажатием этой кнопки;
- выбор направления вращения двигателя кнопкой ВПЕРЕД/НАЗАД при установленном значении $1 - 01 = 0000$ (источник команды ПУСК – пульт управления);
- увеличение и уменьшение заданной частоты при установленном значении $1 - 06 = 0000$ (источник задания частоты – кнопки на пульте управления). Увеличение заданной частоты – кнопкой ▲, уменьшение – кнопкой ▼, переход к следующей изменяемой цифре – кнопкой ◀ / СБРОС / СБРОС. При значении константы $1 - 06 = 0001$ задание частоты устанавливается потенциометром ЧАСТОТА;
- сброс индикации ошибки преобразователя кнопкой ◀ / СБРОС.

Режим программирования устанавливается после нажатия кнопки ПРОГ. В этом режиме доступны следующие функции:

- выбор номера константы кнопками ▲ или ▼, переход к следующей цифре – кнопкой ◀;
- просмотр значения константы нажатием кнопки ВВОД;
- изменение значения константы кнопками ▲ или ▼, переход к следующей цифре – кнопкой ◀;
- сохранение значения изменяемой константы нажатием кнопки ВВОД;
- выход из режима программирования нажатием кнопки ПРОГ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основные параметры технической характеристики частотного преобразователя E2-8300.
2. В чем заключается принцип векторного управления?
3. Какие параметры программируются в преобразователе?
4. Преимущества векторного управления АД.
5. Каков порядок программирования частотного преобразователя?
6. Какие новые разработки положены в конструкцию преобразователя E2-8300?
7. Чем объясняется малое влияние данного преобразователя на питающую сеть?
8. Чем объясняются малые потери в силовом блоке преобразователя?
9. Объясните принцип широтно-импульсного преобразования.
10. Каково преимущество S-образного закона управления АД по сравнению с пропорциональным?
11. Способы реализации S-образного закона управления.
12. Область применения АД с векторным управлением.
13. Какие типы регуляторов реализует встроенный микропроцессор?
14. Какие параметры отражаются на дисплее преобразователя?
15. Функциональные характеристики частотного преобразователя.
16. E2-300.
17. Доступные функции преобразователя в режиме управления.

18. Доступные функции преобразователя в режиме программирования.
19. Операции по подготовке к работе преобразователя.
20. Назначение многофункциональных входов преобразователя.
21. Интерфейсные модули для преобразователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения исследований, практических и лабораторных работ построены механические и рабочие характеристики силовых электрических преобразователей, изучена структура физических моделей с помощью СЛС. На этом не ограничивается использование универсальных стендов серии УСЭМ. Рассмотренные принципы векторного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором показывают возможности программного управления на примере частотного преобразователя типа E2-8300 со встроенным PLC контроллером.

Широкий выбор вопросов для курсового и дипломного проектирования, научно-исследовательской работы, решения задач конструирования и оптимальной эксплуатации энергетического оборудования даёт возможность исследования динамических характеристик СЭП, анализа и синтеза замкнутых САР электропривода, моделирования аварийных режимов работы преобразователей в процессе эксплуатации.

Рассмотренные структурно-логические схемы преобразователей позволяют создавать модели, включающие преобразователи систем электроснабжения, электропривода, рабочих машин и управления. Исследование таких систем обеспечивает комплексное решение вопросов анализа, синтеза и оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мищенко, А.В. Структурно-логическое моделирование в инженерном образовании : доклад на международной конференции / А.В. Мищенко // Инженерное образование в XXI веке : сборник / Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001.
2. Брускин, Д.Е. Электрические машины и микромашины : учебник для вузов / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1990. – 528 с.
3. Вольдек, А.И. Электрические машины : учебник для электротехнических специальностей вузов / А.И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия. – 832 с.
4. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М. : Высшая школа, 1994. – 318 с.
5. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау. – Л. : Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
6. Digital Signal Processing Solution for AC-Motor. – Application Note : BPRA043, Texas Instruments, 1996.
7. Field Oriented Control of 3-Phase AC-Motor. – LN : BPRA073, Texas Instruments, 1998.
8. Расчёт магнитных цепей электрических машин переменного тока : метод. указания / сост. : А.В. Мищенко, В.А. Медведев, Е.М. Наумов. – Тамбов : ТГТУ, 1996. – 19 с.
9. Руководство по эксплуатации E2-8300.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Универсальный лабораторный стенд по «Электромеханике» и «Электрическим машинам» УСЭМ-2	5
Однофазный трансформатор	10
Трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором ...	21
Трёхфазный асинхронный двигатель с фазным ротором	32
Синхронный генератор	39
Синхронный электродвигатель	45
Генератор постоянного напряжения независимого возбуждения	51
Двигатель постоянного тока независимого возбуждения	56
Исследование системы электропривода ТП-Д	61
Исследование работы фазорегулятора и индукционного регулятора напряжения	65
Частотный преобразователь с векторным управлением	71
Заключение	78
Список литературы	79