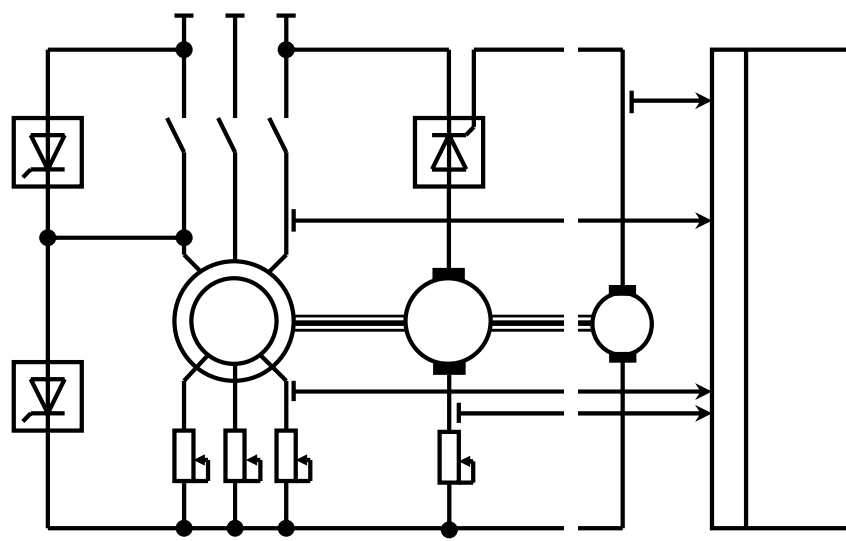


А.В. МИЩЕНКО, Н.П. МОТОРИНА

Электромеханика



издательство ТГТУ

Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

А.В. МИЩЕНКО, Н.П. МОТОРИНА

Электромеханика

Учебное пособие
для студентов дневного и заочного отделений
специальностей 110302, 140211, 140106



Тамбов
Издательство ТГТУ
2007

УДК 537(07)
ББК ←264.5я73
М717

Рецензент

Доктор технических наук, профессор

В.Н. Чернышов

Мищенко, А.В.

М717 Электромеханика : учебное пособие / А.В. Мищенко, Н.П. Моторина. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 72 с. – 150 экз. – ISBN 5-8265-0571-0 (978-5-8265-0571-7).

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

Приведены схемы и описания лабораторных работ для практического изучения силовых электрических преобразователей (СЭП).

Составлено в соответствии с требованиями учебных программ по дисциплинам «Электрические машины» и «Электромеханика» для студентов дневного и заочного отделений специальностей 140211, 140106, 110302.

УДК 537(07)

ББК ←264.5я73

ISBN 5-8265-0571-0
(978-5-8265-0571-7)

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный
технический университет» (ТГТУ), 2007

Учебное издание

МИЩЕНКО Анатолий Васильевич,
МОТОРИНА Наталья Петровна

Электромеханика

Учебное пособие

Редактор З.Г. Чернова
Компьютерное макетирование Е.В. Кораблевой

Подписано в печать 13.02.2007
Формат 60 × 84/16. 4,19 усл. печ. л. Тираж 150 экз. Заказ № 102

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). Причем 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 отчетливо 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 берет необходимую мощность из сети.

4. *Реакция на внешние возмущения*. Например, изменение параметров питающей сети или нагрузки для электродвигателя вызывают 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 объем специальной подготовки инженеров занимают 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 САР данного преобразователя. Например, в трансформаторе (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-ой и II-ой 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 обеспечивается задающими величинами предыдущих регуляторов. С другой стороны, внутренние связи не создавались изобретателями и конструкторами; они – суть совершенных устройств.

Объем 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 лабораторных стендов и большие учебные площади для лабораторий.

В настоящее время вузы оснащаются универсальными стендами, обеспечивающие фронтальное выполнение лабораторных работ и экономию учебных площадей 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 существенное 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).

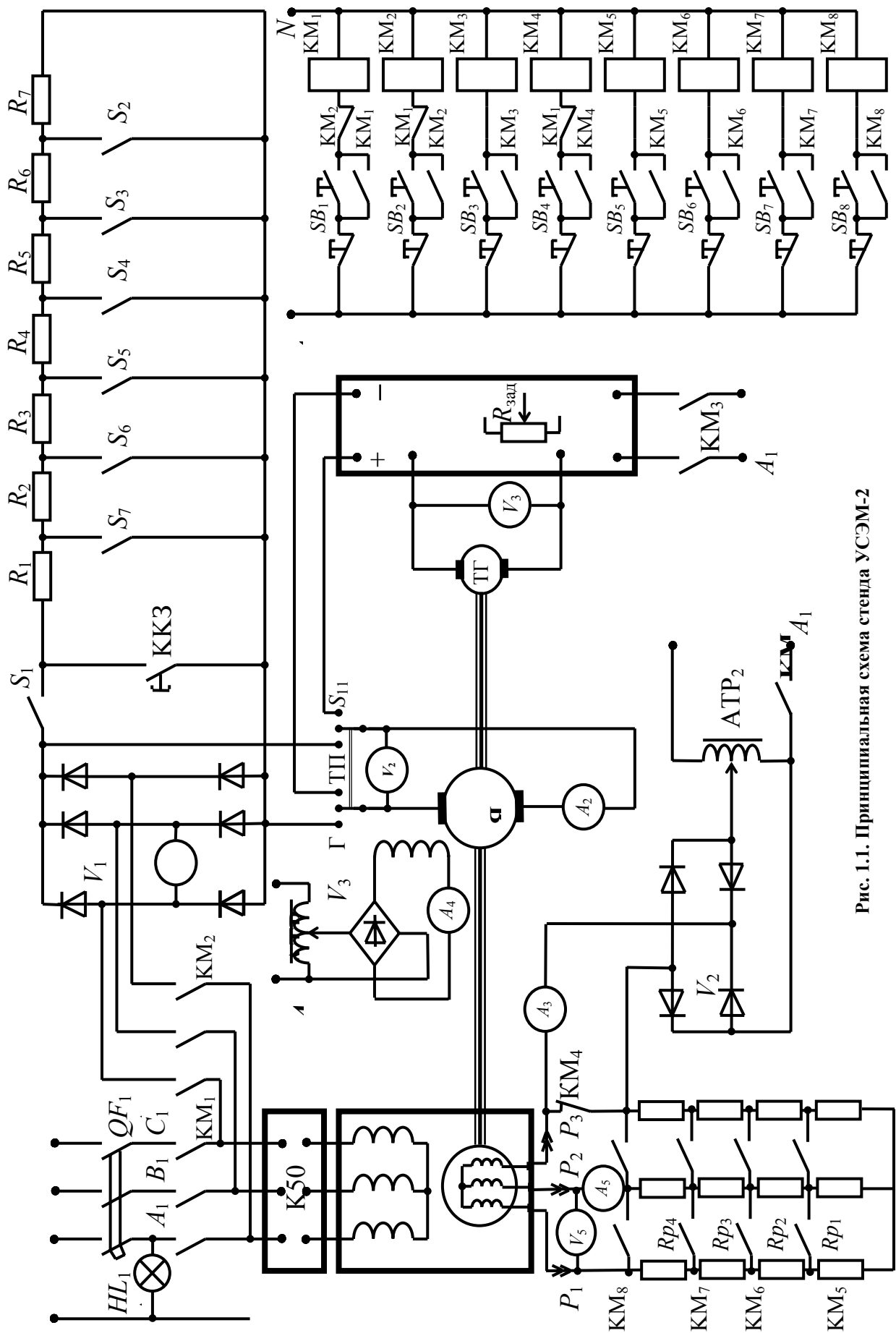


Рис. 1.1. Принципиальная схема стэнда УСЭМ-2

**УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД
ПО «ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ» И
«ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ» УСЭМ-2 (рис. 1.1)**

1. Назначение: фронтальное выполнение лабораторных работ по исследованию электрических преобразователей.

- 1.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.
- 1.2. Асинхронный двигатель с фазным ротором.
- 1.3. Однофазный трансформатор.
- 1.4. Трехфазный 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. Трехфазный асинхронный двигатель в однофазном режиме.
- 1.16. Фазорегулятор.
- 1.17. Синхронный компенсатор.
- 1.18. Асинхронный двигатель (построение рабочих характеристик по круговой диаграмме).
- 1.19. Математические модели электрических преобразователей (компьютерный анализ).

1. РАБОЧАЯ ТАБЛИЦА СТЕНДА УСЭМ-2

Лабораторные работы		Коммутационные аппараты												Регулирующие аппараты			Измерительные приборы											
		QF_1	S_{11}	$S_1 - S_7$	ККЗ	КМ ₁ SB ₁	КМ ₂ SB ₂	КМ ₃ SB ₃	КМ ₄ SB ₄	КМ ₅ SB ₅	КМ ₆ SB ₆	КМ ₇ SB ₇	КМ ₈ SB ₈	P_1, P_2, P_3	$R_{эуд}$	АТР ₁	АТР ₂	V_1	V_2	V_3	V_5	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	Hz	W_1
1.	Асинхронный КЗ двигатель	X	Г	X	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	-	X	-	X	X	X	-	X	X	-	X	-	-	X
2.	Асинхронный двигатель с фазным ротором	X	Г	X	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	-	X	-	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	X
3.	Однофазный трансформатор	X	Г	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X	-	X	-	-	X	X	-	-	-	X	-	X
4.	Трехфазный трансформатор	X	Г	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X	X	-	X	-	X	-	-	X	X	-	-	-	X	-	X
5.	Синхронный генератор	X	ТП	X	X	-	X	X	X	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	-	X	X
6.	Синхронный двигатель	X	Г	X	-	X	-	-	X	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	-	X
7.	Генератор постоянного напряжения	X	Г	X	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	-	X	-	X	X	X	-	X	X	-	X	-	-	X
8.	Двигатель постоянного тока, независимого возбуждения	X	ТП	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	X	-	X	X	X	-	X	X	-	X	-	-	-	X
9.	Система ТП-Д	X	ТП	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	X	-	X	X	X	-	X	X	-	X	-	-	-	X
10.	Частотный машинный преобразователь	X	ТП	-	-	-	X	X	X	-	-	-	-	X	X	-	X	X	X	-	X	X	X	X	X	-	X	X
11.	Фазорегулятор	X	Г	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-
12.	Динамическое торможение асинхронного двигателя	X	ТП	-	-	-	-	X	-	X	X	X	X	-	X	X	X	-	-	X	X	-	-	-	X	X	-	-
13.	Динамическое торможение двигателя постоянного тока	X	Г	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	X
14.	Индукционно-динамическое торможение АД	X	ТП	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-

2. Цель.

- 2.1. Увеличение количества проводимых лабораторных работ.
- 2.2. Уменьшение учебно-лабораторных площадей.
- 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 и персональный компьютер. Минимальное количество конструктивных элементов достигнуто за счет 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 (К50).
- 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 цифро-аналоговые преобразователи.

5. Разработка.

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

6. Актуальность.

Невозможность размещения лабораторных стендов всех электрических преобразователей, с учетом 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 16 лет.
- 8.2. Диплом 1-ой 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 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 счет резкого снижения количества стендов.

Лабораторная работа 1

ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Цель работы: изучение характеристик трансформатора и определение параметров 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 и W_2 – число витков соответственно первичной и вторичной обмоток.

Основные аналитические зависимости [2]

$$U_1 = -E_1 + jI_1x_1 + I_1r_1; \quad (1.3)$$

$$F_1 = I_1W_1; \quad (1.4)$$

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

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

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

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

$$U_2 = E_2 - jI_2x_2 - I_2r_2; \quad (1.9)$$

$$I_1 = I_0 + \left(-I_2 \frac{W_2}{W_1} \right); \quad (1.10)$$

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{W_2}{W_1}; \quad (1.11)$$

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

Структурно-логическая схема трансформатора [1]

СЛС трансформатора содержит четыре компаратора (по числу уравнений равновесия) (рис. 1.2):

K_1 – уравнение электрического баланса 1-й обмотки;

K_2 – уравнение токов;

K_3 – уравнение магнитного баланса;

K_4 – уравнение электрического баланса 2-й обмотки.

Напряжение сети U_1 после сравнения с ЭДС 1-й обмотки создает ток 1-й обмотки I_1 . Результат сравнения токов I_1 и I_2' является ток холостого хода – I_0 , который через МДС 1-й обмотки F_1 создает 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.

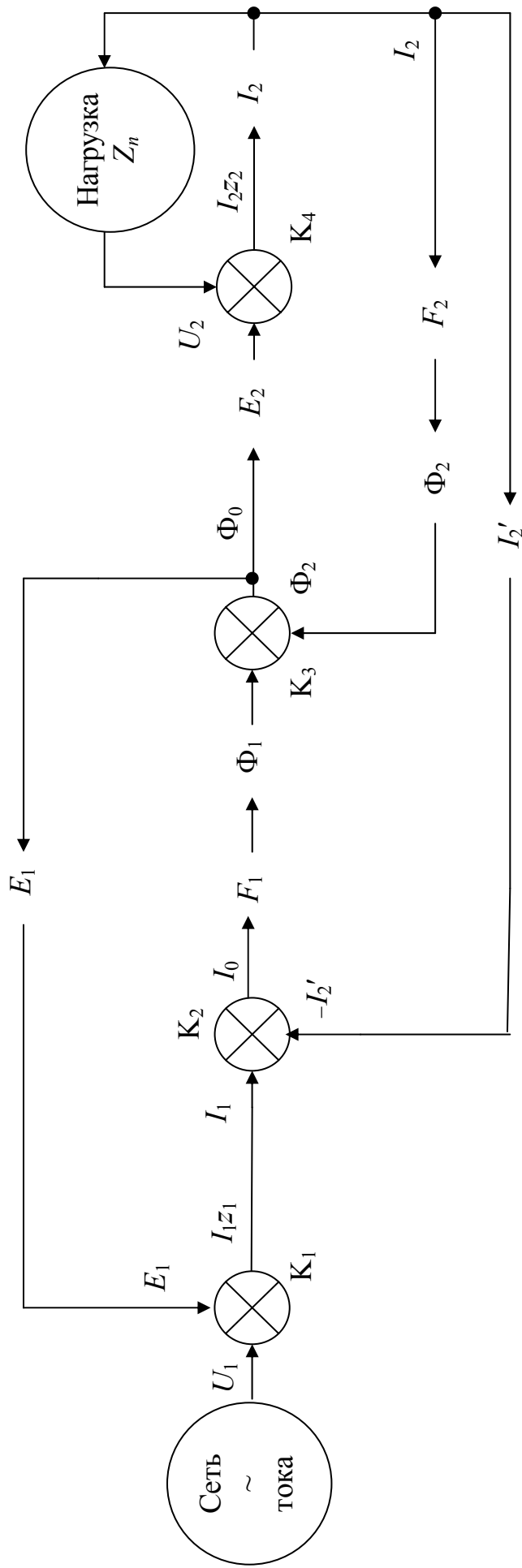


Рис. 1.2. Трансформатор (структурно-логическая схема преобразований)

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 $R_{\text{н}}$.
- 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 $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$. Измерить напряжение холостого хода первичной U_{10} и вторичной U_{20} обмоток, ток холостого хода I_0 и мощность P_0 , потребляемую трансформатором, которая является мощностью потерь в стали.
- 1.5. По результатам измерений рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1.4).
- 1.6. Полученные результаты опыта занести в табл. 1.1.

2. *Опыт короткого замыкания (к.з.).*

- 2.1. Собрать схему для проведения опыта короткого замыкания (рис. 1.3) при $R_{\text{н}} = 0$.
- 2.2. Так как в начале опыта короткого замыкания U_1 должно быть равным нулю, перед заколачиванием вторичной обмотки необходимо в этом убедиться, измерив фактическую величину напряжения U_1 .
- 2.3. Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

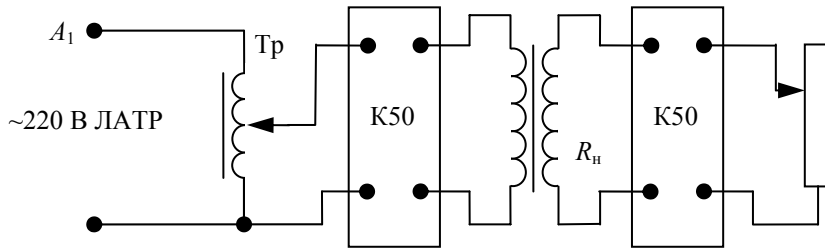


Рис. 1.3. Схема для исследования трансформатора

2.4. С помощью источника регулируемого напряжения установить на первичной обмотке трансформатора напряжение, при котором ток первичной обмотки I_1 достигает номинального значения $I_{1\text{н}}$. Необходимо учесть, что напряжение короткого замыкания не превышает 10 % от номинального значения $U_{1\text{н}}$.

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 $U_{1\text{к}}$.

2.5. Измерить ток вторичной обмотки I_2 и мощность $P_{\text{к}}$ (К50), потребляемую трансформатором в опыте короткого замыкания, которая соответствует мощности потерь в меди.

2.6. По полученным данным рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1.5). Результаты опыта занести в табл. 1.2.

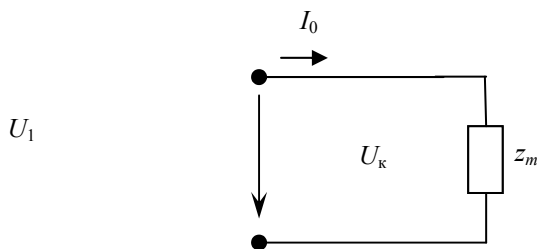


Рис. 1.4. Схема замещения опыта холостого хода

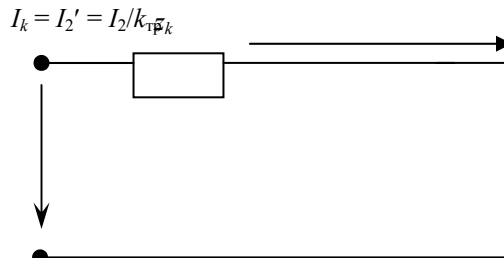


Рис. 1.5. Схема замещения опыта короткого замыкания

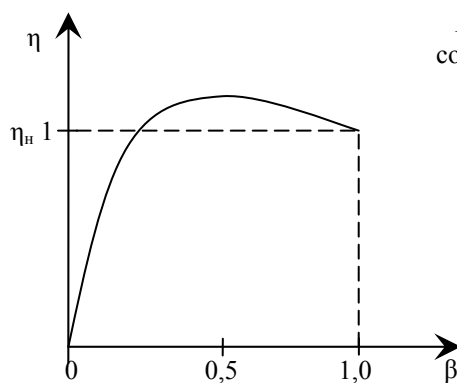


Рис. 1.6. Характеристика $\eta = f(\beta)$

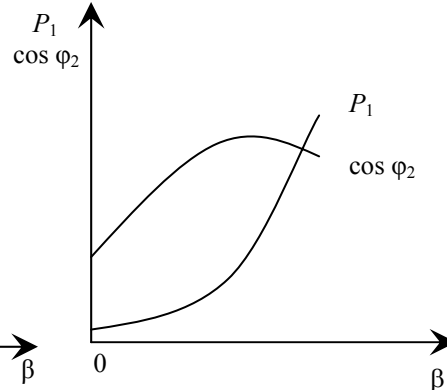


Рис. 1.7. Характеристики P_1 ; $\cos \varphi_2 = f(\beta)$

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. 1.8).
- 1.2. Движок ЛАТРа установить в крайнее положение против часовой стрелки.

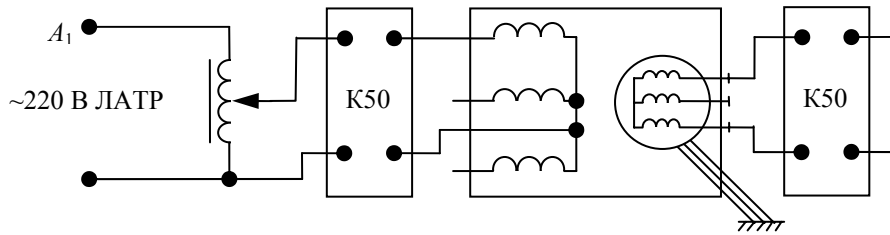


Рис. 1.8. Схема для опыта холостого хода

- 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).
- 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 , I_1 , P_1 (К50) соответственно. Результаты занести в табл. 1.4.
- 1.6. Изменить напряжение U_1 и повторить пп. 1.3 и 1.4.
- 1.7. По результатам измерений рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1.9), результаты занести в табл. 1.4.

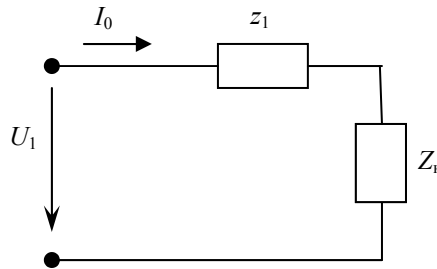


Рис. 1.9. Схема замещения опыта холостого хода

Таблица 1.4

Измерено				Вычислено				
$U_{10}, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$P_0, \text{Вт}$	$U_{20}, \text{В}$	$z_{12}, \text{Ом}$	$r_{12}, \text{Ом}$	$x_{12}, \text{Ом}$	$K_{\text{тр}}$	$\cos\varphi$
120								
140								
160								
180								
200								
220								

2. Опыт короткого замыкания (к.з.).

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

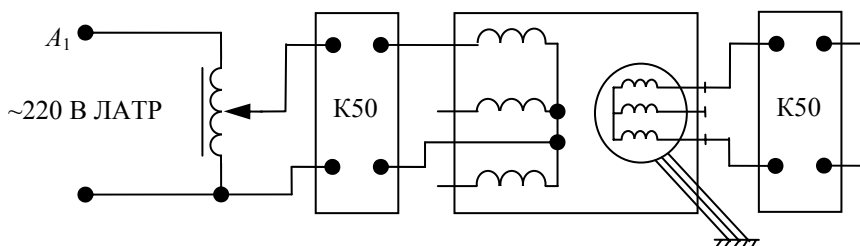


Рис. 1.10. Схема для опыта короткого замыкания

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 равен номинальному значению.

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 К50 соответственно. Результаты опыта занести табл. 1.5.

2.5. По полученным данным рассчитать параметры схемы замещения (рис. 1.11), результаты занести в табл. 1.5.

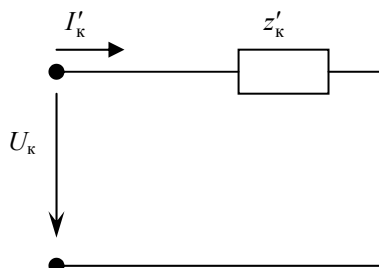


Рис. 1.11. Схема замещения опыта короткого замыкания

Таблица 1.5

Измерено				Вычислено			
$U_{1к}$, В	I_1 , А	I_2 , А	P_k , Вт	$z_{к}$, Ом	$x_{к}$, Ом	$r_{к}$, Ом	$\cos \varphi_k$

3. Испытание трансформатора под нагрузкой.

3.1. Собрать схему для испытания трансформатора под нагрузкой (рис. 1.12).

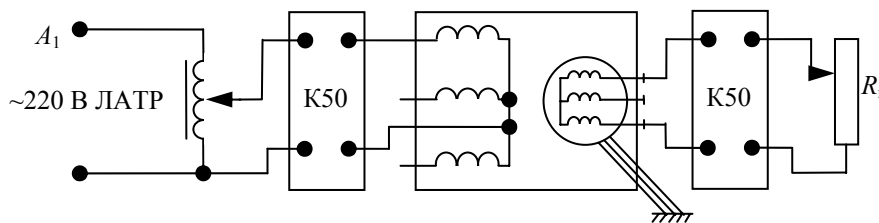


Рис. 1.12. Схема для опыта нагрузки

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

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 К50 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:

$$U_2 = f(\beta); \cos(\varphi_2) = f(\beta); \eta = f(\beta).$$

Таблица 1.6

Нагрузка	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+ $+R_3+R_4$															

Расчетные формулы [4]

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

$$r_m = P_0/I_0^2; \quad (1.14)$$

$$x_m = \sqrt{z_m^2 - r_m^2}; \quad (1.15)$$

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

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

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

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

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

$$\beta = I_2/I_{2н}; \quad (1.21)$$

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

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

Содержание отчета

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 ее построения.
7. Схема замещения трансформатора.
8. Связь ЭДС и магнитного потока трансформатора.
9. Что такое приведенный 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 приведенные параметры вторичной обмотки?
16. Способы охлаждения трансформаторов.
17. Каков результат включения трансформатора в сеть постоянного напряжения?
18. Конструктивное отличие обмоток высокого и низкого напряжения, обозначения их выводов.
19. Какими потерями пренебрегают при опытах короткого замыкания и холостого хода и почему?
20. Какое назначение измерительных трансформаторов?

21. Как определить опытным путем 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 РБВ и РПН).
27. Условия включения трансформаторов на параллельную работу.
28. Какие преимущества трехобмоточного трансформатора?
29. Как регулируют ток сварочных трансформаторов?
30. Требования к обмоткам трансформатора.
31. Какие требования предъявляются к защите трансформатора от аварийных режимов работы?
32. Определите номинальные токи в обмотках понижающего трансформатора по паспортным данным.
33. Требования, предъявляемые к сердечнику трансформатора.
34. Какая математическая функция выполняется трансформатором?
35. Как определяется оптимальный КПД трансформатора?
36. Как определить постоянные и переменные потери в трансформаторе?
37. Какими способами можно определить коэффициент трансформации?
38. Что обозначает 11-я группа соединения обмоток?
39. Как определяется годовой экономический КПД трансформатора?
40. Используя СЛС трансформатора, объясните процесс нагрузки и саморегулирования.
41. Почему в стержневом магнитопроводе используются пластины различной ширины?
42. Как определить опытным путем число витков недоступной обмотки трансформатора?
43. Как построить кривую намагничивания сердечника трансформатора при помощи ЛАТРа, амперметра и вольтметра?
44. Объясните процесс саморегулирования в трансформаторе.
45. Защита трансформаторов от аварийных режимов работы.
46. Как определить число витков дополнительной обмотки трансформатора на заданное напряжение?

Лабораторная работа 2

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучить особенности пуска в ход двигателей с короткозамкнутым ротором, получить опытным путем рабочие характеристики.

Общие положения [3, 5]

Трехфазный 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 трехфазная обмотка, соединенная 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 соединенных по обеим его торцам медными или алюминиевыми кольцами в виде «беличьего колеса». Сердечник ротора укреплен на валу двигателя и помещен внутрь статора.

При прохождении по обмоткам статора трехфазного 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, 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 трехфазного трансформатора. Наличие воздушного зазора увеличивает МДС, следовательно, и ток холостого хода, который на порядок больше, чем у трансформатора.

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 , которое зависит от нагрузки.

Скольжение определяется по формуле

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} . \quad (2.2)$$

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, $\cos\phi$, частоту.

Частота вращения магнитного поля статора пропорциональна частоте питающей сети f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов P :

$$n_1 = \frac{60f}{P}, \text{ об/мин}; \quad \omega_1 = \frac{2\pi f}{P}, \text{ с}^{-1}. \quad (2.3)$$

ЭДС обмотки статора E_1 пропорциональна магнитному потоку Φ , частоте f_1 , числу витков W_1 и обмоточному коэффициенту $K_{об}$

$$E_1 = 4,44f_1W_1\Phi_m K_{об}. \quad (2.4)$$

МДС возбуждения F_b асинхронного двигателя определяется суммой МДС на участках ротора $F_{я2}$ магнитной цепи: воздушный зазор F_δ ; зубцовый слой F_z ярма статора $F_{я1}$ [9]

$$F_b = 2F_\delta + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{я1} + F_{я2}. \quad (2.5)$$

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

$$H_\delta = \frac{\Phi}{(\mu_0 \alpha_i \tau l_i)} = \frac{B_\delta}{\mu_0}. \quad (2.6)$$

Магнитное напряжение в воздушном зазоре

$$F_\delta = 2H_\delta L_\delta \text{ или } F_\delta = 2 \frac{D}{\tau} \frac{B_\delta}{\mu_0} l_i.$$

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

$$K_\mu = \frac{1}{2F_\delta}. \quad (2.8)$$

Напряжение обмотки статора U_1 уравнивается ее ЭДС E_1 и падениями напряжения на активной $I_1 r_1$ и реактивной $jI_1 x_1$ составляющих сопротивления обмотки:

$$U_1 = -E_1 + jI_1 x_1 + I_1 r_1. \quad (2.9)$$

ЭДС E_2 , частота тока в роторе f_2 и потери в роторе ΔP_{32} пропорциональны скольжению:

$$E_{2S} = E_1 S; \quad f_{2S} = f_1 S; \quad \Delta P_{32} = P_{3M} S, \quad (2.10)$$

где P_{3M} – электромагнитная мощность ротора.

Уравнение напряжения для обмоток ротора

$$E_2 = jI_2' x_2' + I_2' r_2' / S. \quad (2.11)$$

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

$$F_1 = 0,45 m_1 I_1 W_1 K_{об1} / p; \quad (2.12)$$

$$F_2 = 0,45 m_2 I_2 W_2 K_{об2} / p, \quad (2.13)$$

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

$$I_1 = I_0 + (-I_2') \quad (2.14)$$

из которого следует, что ток статора в асинхронном двигателе I_1 имеет две составляющие: I_0 – намагничивающую (почти постоянную) составляющую ($I_0 \approx I_{1\mu}$) и $(-I'_2)$ – переменную составляющую, компенсирующую МДС ротора.

Угол сдвига фаз между ЭДС E'_2 и током I'_2

$$\Psi_2 = \arctg \frac{x'_2 s}{r'_2}. \quad (2.15)$$

Из схемы замещения следует выражение для тока ротора

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}, \quad (2.16)$$

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 P_1 на величину потерь $\sum P$:

$$P_2 = P_1 - \sum P. \quad (2.17)$$

Сумма всех потерь асинхронного двигателя (Вт)

$$\sum P = P_m + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}. \quad (2.18)$$

Электрические потери в обмотке статора

$$P_{\text{э1}} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (2.19)$$

Электрические потери в обмотке ротора

$$P_{\text{э2}} = m_2 I_2'^2 r_2', \quad (2.20)$$

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

КПД асинхронного двигателя

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}. \quad (2.21)$$

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

$$M \omega_1 S = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (2.22)$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату питающего напряжения U_1

$$M = \frac{p m U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 S [(r_1 + r_2'/S)^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (2.23)$$

Подставив скольжение $S = 1$, получим выражение пускового момента асинхронного двигателя (Н · м):

$$M_n = \frac{p m_1 U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (2.24)$$

Критическое скольжение определяется по формулам:

$$S_{\text{кр}} = \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}; \quad (2.25)$$

$$S_{\text{кр}} = S_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \quad (2.26)$$

В начальный момент пуска скольжение $S = 1$, поэтому, пренебрегая током холостого хода, пусковой ток можно определить из выражения (*), подставив $S = 1$:

$$I_n = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}. \quad (2.27)$$

Зависимость скольжения от активного сопротивления цепи ротора

$$S = \frac{m_1 I_1^2 r_2'}{\omega_1 M}. \quad (2.28)$$

Структурно-логическая схема асинхронного двигателя

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

Напряжение сети (3N, 380 В, 50 Гц) сравнивается (K_1) с ЭДС статорных обмоток 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 создает 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 дает 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 (E_1 ; I_2 ; Φ_2 ; S).

Основные аналитические зависимости [2]

$$U_1 = -E_1 + jI_1x_1 + I_1r_1;$$

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

$$\Delta P_3 = P_{эм} S;$$

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

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

$$f_2 = f_1 S;$$

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

$$M_{кр} = M_{ном} \lambda;$$

$$U_2' = E_2' - jI_2'x_2' - I_2' \frac{r_2'}{S};$$

$$P_{2н} = \sqrt{3}U_1I_1 \cos \varphi_{1н} \eta_{н};$$

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

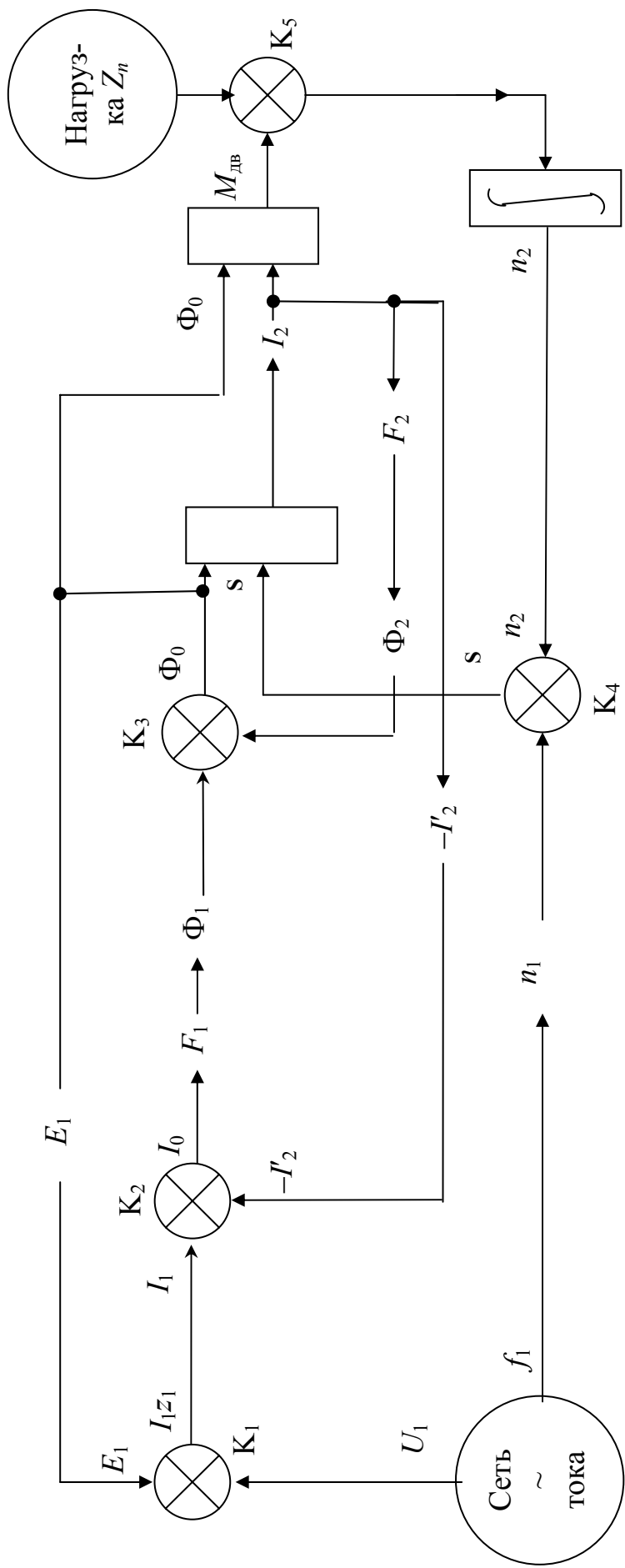


Рис. 2.1. Асинхронный двигатель (структурно-логическая схема преобразований)

Основные свойства синхронного двигателя [6]

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.

$I_{0\text{АД}} \gg I_{0\text{тр-ра}}$ – за счет воздушного зазора.

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

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

3. Частота тока ротора пропорциональна скольжению:

$$f_2 = f_1 S.$$

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. 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:

$$S = \frac{\Delta P_{\text{эл2}}}{P_{\text{эм}}}.$$

9. Регулирование частоты вращения АД осуществляется изменением трех параметров: а) частота; б) число пар полюсов; в) скольжение:

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p} (1 - S).$$

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. 1.1.

2. Установить все используемые коммутационные и регулирующие аппараты в исходное положение (S_{11} – «Г»; $S_1 - S_7$ – выкл.; АТР₁ – движок в крайнее положение против часовой стрелки). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

3. Включить стенд (QF_1).

4. Запустить АД с фазным ротором (SB_1).

5. Перевести АД с фазным ротором в режим АД с короткозамкнутым ротором, для чего нажать поочередно кнопки $SB_5 - SB_8$.

6. Установить движком АТР₁ максимальное значение тока возбуждения ГПН (амперметр A_4).

7. Снять данные холостого хода АД с короткозамкнутым ротором.

8. Получить данные для построения рабочих характеристик двигателя, изменяя нагрузку ($S_1 - S_7$), 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 : $P_1 = P_A + P_B + P_C$. Приборы в составе К50.

9. По данным табл. 2.1 рассчитать и построить графические зависимости рабочих характеристик двигателя: $M, I_1, P_1, \cos \varphi_1, \eta, S$ от мощности P_2 .

Таблица 2.1

№ опыта	Измерено						
	I_1, A	U_1, B	$P_1, Вт$	U_3, B	$n_1, об/мин$	U_r, B	I_r, A
1							
2							
3							
4							
5							

№ опыта	Вычислено						
	$M, Н·м$	η	$\cos\varphi$	$n_2, об/мин$	S	$P_2, Вт$	$P_{1r}, Вт$
1							
2							
3							
4							
5							

10. Необходимо также построить механические характеристики $n_2 = f(M)$ и $M = f(S)$.

Формулы для расчета

Выходная мощность генератора

$$P_r = U_r I_r. \quad (2.29)$$

Входная мощность генератора (выходная мощность двигателя)

$$P_2 = P_{1r} = P_{2r}/\eta_r. \quad (2.30)$$

КПД генератора постоянного напряжения, определяется по универсальной кривой $\eta = f(P_{2r})$:

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

$$P_{2r}^* = \frac{P_{2r}}{P_{2н}}, \quad (2.31)$$

где $P_{2н}$ – номинальная мощность генератора (паспортные данные); $P_{2r} = U_r I_r$ – мощность на выходе генератора

$$\cos\varphi_1 = P_1/(3U_1 I_1); \quad (2.32)$$

$$\eta = P_2/P_1; \quad (2.33)$$

$$P_1 = P_A + P_B + P_C; \quad (2.34)$$

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2}. \quad (2.35)$$

Содержание отчета

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. Список литературы.

Контрольные вопросы

1. Устройство статора и ротора асинхронного двигателя и принцип их работы.
2. Частота вращения магнитного поля и способы ее регулирования. Как влияет на нее частота сети?

3. Что называется скольжением АД? Пояснить соответствующую формулу. Область изменения скольжения асинхронной машины:
 - а) в двигательном режиме;
 - б) в 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 $n(M)$ 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: $P_{2\text{н}}$, $P_{\text{н}}$, $\eta_{\text{н}}$?
12. Каков физический смысл электрического эквивалента механической нагрузки?
13. Сравните ток холостого хода 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 $S_{\text{н}} = 2,5\%$.
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 стенда исследования АД.
22. Приведите рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым 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 наибольшая МДС?
33. Какие бывают типы обмоток статора АД?
34. Какие параметры необходимы для построения развернутой схемы трехфазной двухслойной обмотки статора?
35. Какое 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 короткозамкнутым ротором?
40. Как переходить из двигательного режима в тормозные режимы работы АД?
41. Какие значения $\cos\phi$ и КПД при холостом ходе асинхронного двигателя?
42. Как определяется величина момента нагрузки АД опытным путем (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 при изменении добавочных сопротивлений в цепи ротора.

Общие положения [6 – 8]

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором – преобразователь электрической энергии переменного тока в механическую, состоящий из статора и ротора, у которого частота вращения ротора отстает от вращающегося магнитного поля статора на величину скольжения, которое определяется сопротивлениями в цепи ротора.

Трехфазный АД 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 трем контактными кольцам, насаженным на вал ротора. На кольца накладываются щетки, посредством которых в цепь обмотки ротора включается пусковой или пускорегулировочный реостат.

Принцип работы двигателя заключается в следующем: при включении статорной обмотки в цепь трехфазного 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:

$$E_2 = 4,44f_2 W_2 \Phi_{m2} K_{обм2}, \quad (3.2)$$

Величина тока ротора зависит от активного сопротивления роторной цепи. При взаимодействии тока ротора с магнитным полем статора создается вращающий момент, действующий на ротор в направлении вращения поля. Только при наличии скольжения возможно индуцирование токов в проводниках обмотки ротора и возникновения 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.

Структурно-логическая схема асинхронного двигателя с фазным ротором

СЛС асинхронного двигателя содержит пять компараторов, два звена умножения и одно интегрирующее звено (рис. 3.1).

Напряжение сети (3N, 380 В, 50 Гц) сравнивается на K_1 с ЭДС статорных обмоток 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 создает 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 дает электромагнитный момент двигателя $M_{дв}$.

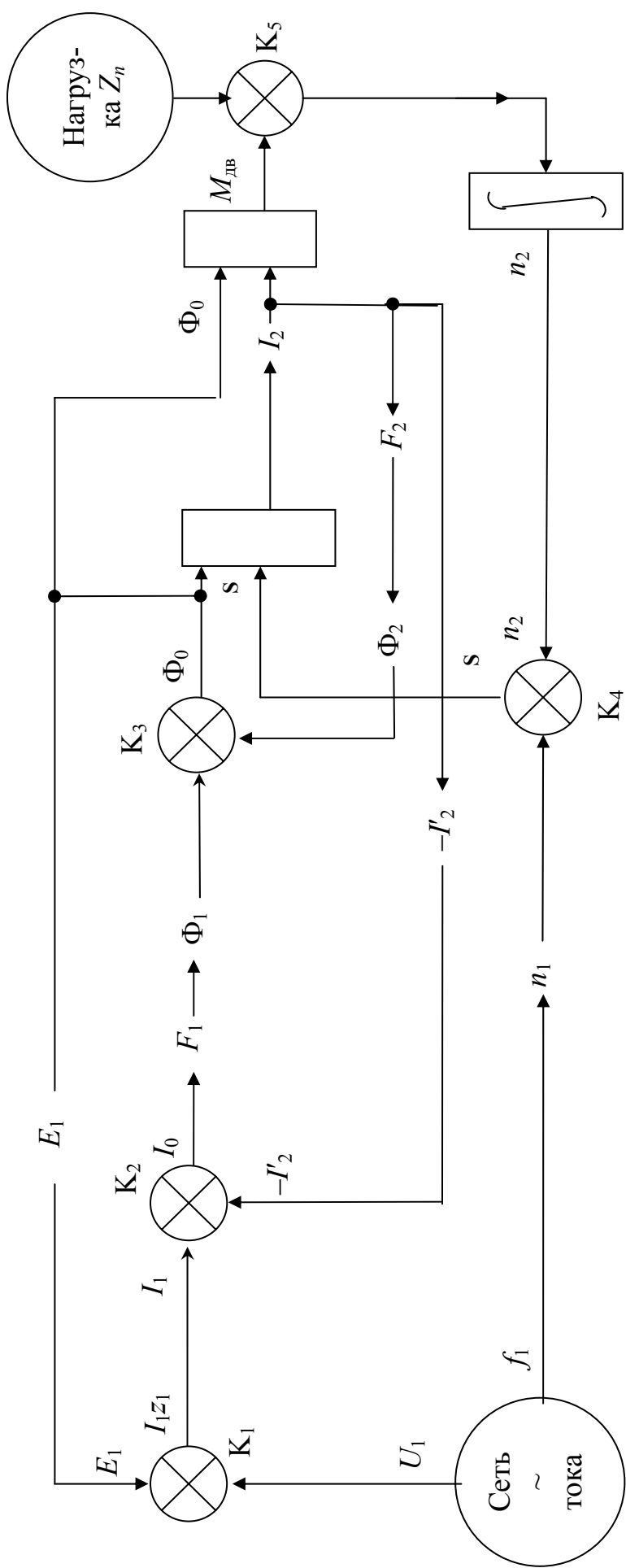


Рис. 3.1. Асинхронный двигатель (структурно-логическая схема преобразований)

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 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]

$$\begin{aligned}
 U_1 &= -E_1 + jI_1x_1 + I_1r_1; \\
 S &= \frac{n_1 - n_2}{n_1}; \\
 \Delta P_3 &= P_{\text{эм}}S; \\
 n_2 &= \frac{60f_1}{p}(1-S); \\
 E_{2S} &= E_{2m}S; \\
 f_2 &= f_1S; \\
 S_{\text{кр}} &= S_{\text{ном}}\left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}\right); \\
 M_{\text{кр}} &= M_{\text{ном}}\lambda; \\
 U'_2 &= E'_2 - jI'_2x_2 - I'_2\frac{r'_2}{S}; \\
 P_{2н} &= \sqrt{3}U_1I_1\cos\varphi_{1н}\eta_{н}; \\
 M &= \frac{mpU_{\phi}^2(r'_2 + r'_{\text{доб}})}{2\pi f_1\left[\left(r_1 + \frac{r'_2}{S}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]S}.
 \end{aligned}$$

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.

$I_{0\text{АД}} \gg I_{0\text{тр-ра}}$ – за счет воздушного зазора.

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

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

3. Частота тока ротора пропорциональна скольжению:

$$f_2 = f_1S.$$

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:

$$S = \frac{\Delta P_{\text{эл2}}}{P_{\text{эм}}}.$$

8. Ограничение пусковых токов достигается включением добавочных сопротивлений в цепь ротора. При этом повышается пусковой момент (3.15) и величина критического скольжения.

9. Регулирование частоты вращения АД осуществляется изменением трех 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 (S_{11} – «Г»; $S_1 - S_7$ – выкл.; АТР₁ – движок в крайнее положение против часовой стрелке). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.

3. Включить стенд (QF_1).

4. Запустить АД с фазным ротором нажатием на кнопку SB_1 .

5. Установить движком АТР₁ максимальное значение тока возбуждения ГПН (амперметр A_4).

6. Последовательно на всех искусственных характеристиках АД с фазным ротором ($SB_5 - SB_8$) осуществить нагрузку ($S_1 - S_7$) для снятия регулировочных характеристик.

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

Таблица 3.1

№ опыта	Измерено							
	U_{Φ} , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	V_3 , В	I_r , А	U_r , В
1								
2								
3								
4								
5								
№ опыта	Вычислено							
	n_2 , об/мин	P_2 , Вт	S	M , Н·м	η_r	$\eta_{дв}$	P_{1r} , Вт	
1								
2								
3								
4								
5								

Формулы для расчета

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

$$\eta = P_2/P_1;$$

$$n_2 = U_3/k;$$

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

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

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

$$P_{2г}^* = \frac{P_{2г}}{P_{2н}}, \quad (3.3)$$

где $P_{2н}$ – номинальная мощность генератора (паспортные данные);

$P_{2г} = U_r I_r$ – на выходе генератора

$$k = U_3 / n_{хх}. \quad (3.4)$$

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурно-логическая схема асинхронного двигателя.
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. Какие 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 4АН80Л8У3 при $S_n = 2,5\%$.
18. Почему при холостом ходе у АД низкий $\cos\phi$ и КПД?
19. Почему не учитываем магнитные потери ротора при номинальной нагрузке?
20. Как определяется добавочное сопротивление ротора для $M_{пуск} = M_{кр}$ наибольшего пускового момента?
21. Принципиальная электрическая схема стенда УСЭМ-2 для данной работы.
22. Закон полного тока для магнитной цепи асинхронного двигателя.
23. Порядок расчета 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?

Лабораторная работа 4

СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Цель работы: 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 (рис. 1.1).

Статор синхронной машины выполнен так же, как и асинхронной: на нем расположена трехфазная (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 создает 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 создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и обмоток 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 счет неравномерного зазора между полюсным наконечником и якорем, в неявнополюсных – за счет укорочения шага, равномерного распределения обмотки якоря при $q = 4 \dots 6$ и скоса зубьев.

Основные характеристики СГ:

1. *Характеристика холостого хода (х.х.).* Характеристикой холостого хода СГ называется зависимость его ЭДС от тока возбуждения, определенная 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:

$$E_0 = 4,44W_D K_{обм} \Phi_b, \quad (4.3)$$

где W_D 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 короткозамкнутого якоря I_k от тока возбуждения I_b , определенную 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 счет уменьшения размагничивающего действия реакции якоря. При индуктивной нагрузке $\varphi < 0$ уменьшение тока I_1 вызывает рост напряжения U_1 за счет уменьшения продольно-размагничивающей реакции якоря. При емкостной нагрузке $\varphi > 0$ уменьшение тока I_1 вызывает уменьшение U_1 за счет ослабления продольно-намагничивающей реакции якоря.

4. *Нагрузочная характеристика.* Нагрузочной характеристикой называют зависимость напряжения на зажимах СГ от тока возбуждения, определенной при постоянном токе якоря и неизменном характере нагрузки, когда угол сдвига 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 емкостной 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 равновесия) (рис. 4.1):

K_1 – уравнение магнитного равновесия;

K_2 – уравнение электрического равновесия обмоток якоря;

K_3 – уравнение нагрузки.

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 (результирующий) Φ создает ЭДС E_1 , которая сравнивается с напряжением U_1 . При этом создается 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.

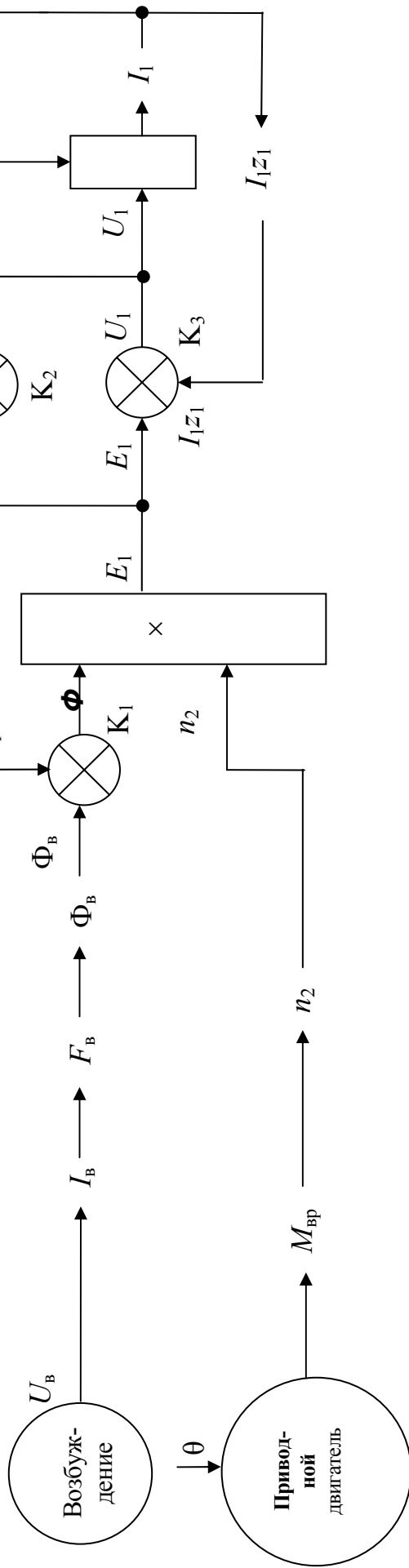


Рис. 4.1. Синхронный генератор (структурно-логическая схема преобразований)

Основные аналитические зависимости [2]

$$E_0 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_m K_{об1};$$

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

$$ОКЗ = \frac{U_{нво}}{I_{я.ном} X_d} = \frac{U_{нвх}}{U_{внк}};$$

$$U_{1ня} = E_0 - j I_1 x_{сн};$$

$$U_{яп} = E_0 + E_{ад} + E_{аг} + E_{\delta} - I_{я} R_{я}.$$

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 (S_{11} – «ТП»; $S_1 - S_7$ – выкл.; ККЗ – разомкнута; $R_{зад}$ – 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 (QS_1).
4. Включить тиристорный преобразователь (SB_3).
5. Установить АТР₂ возбуждение СГ $I_B = 9$ А.
6. Подключить цепь нагрузки к СГ (SB_2).
7. Установить частоту 50 Гц с помощью $R_{зад}$ тиристорного преобразователя (ТП), что будет соответствовать $n_2 = 1000$ об/мин.
8. Снять характеристику холостого хода $E_1 = f(I_B)$. Изменяя значения тока возбуждения ($I_B - A_3$), снять значение ЭДС по фазам, данные измерения свести 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, установить номинальный ток в обмотке якоря $I_1 = I_{ном}$. 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 $n_1 = const$, $I_B = const$, $\varphi_2 = 0$. Опыт проводится для $I_B = 5$ и 7 А. Установить ток возбуждения и, изменяя значение тока нагрузки ($S_1 - S_7$), снять изменение напряжения по фазам. Данные свести 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, $U_1 = f(I_1)$. Установить ток нагрузки $I_1 = 1,25$ А, увеличивая нагрузку ($S_1 - S_7$) и изменяя ток возбуждения таким образом, чтобы $I_1 = 1,25$ А. Снять значения напряжения по фазам. Данные свести 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 $I_B = f(U_1)$. Установить значение напряжения $U_1 = \text{const}$, увеличивая ток нагрузки ($S_1 - S_7$), изменить ток возбуждения таким образом, чтобы U_1 не изменялось. Снять значение тока нагрузки по фазам и свести в табл. 4.5.

Таблица 4.5

№ опыта	I_B , А	I_A , А	I_B , А	I_C , А
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				

13. Построить графики, иллюстрирующие характеристики СГ.

Содержание отчета

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 чем 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. Какие 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 короткого замыкания обмотки полюсных наконечников.
20. В чем отличие магнитной цепи явнополюсного и не явнополюсного СГ?
21. Как перевести СГ, работающий параллельно с сетью, в режим двигателя?
22. Объяснить принцип действия, саморегулирование СГ по его СЛС.
23. Конструктивные элементы СГ и их функции.
24. Принципиальная электрическая схема стенда УЭСМ-2 для данной работы.
25. Какие способы возбуждения СГ?

Лабораторная работа 5

СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Цель работы: изучить конструкцию и рабочие характеристики синхронного двигателя (СД).

Общие положения [4]

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 остается неизменной, тесно связанной с частотой сети соотношением

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

что является важнейшим свойством эксплуатации СД.

Принцип действия СД заключается во взаимодействии магнитного поля индуктора и вращающего магнитного потока якоря. Намагничивающая сила индуктора создает основное магнитное поле, которое является единственным полем при отсутствии нагрузки, т.е. при отсутствии тока в обмотке якоря. При нагрузке ток в обмотке якоря создает 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, влечет за собой изменение величины и формы наводимой в якоре ЭДС и всех величин, прямо или косвенно зависящих от нее. Таким образом, воздействие намагничивающей силы якоря на основную намагничивающую силу индуктора оказывает большое внимание на работу синхронной машины и называется реакцией якоря.

- Реакция якоря при $\psi = 0^\circ$ (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 поперек основного поля, причем на набегающем крае полюса оно ослабляет основное поле, на сбегающем усиливает его. Такое поле и соответственно такая реакция якоря называется поперечным.

- 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 $\psi = 90^\circ$ (емкостная нагрузка). Емкостная нагрузка представляет собой случай противоположный предыдущему, а поэтому реакция якоря имеет продольно намагничивающий характер.

Рабочие характеристики представляют собой зависимости тока I_1 , 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 $M = f(P_2)$, 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 $n_1 = f(P_2)$ 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 сокращению 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 трех 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 создает ток I_1 , который пропорционален МДС якоря, и создает магнитный поток реакции якоря $\Phi_{р.я}$.

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 [4]

$$M_{н.я} = \frac{mUE_0}{\omega_1 X_{сн}} \sin \theta ;$$

$$M_{я.п} = \frac{mUE_0}{\omega_1 X_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta ;$$

$$P_2 = M_2 \omega_1 .$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой универсального стенда рис. 1.1.
2. Установить коммутирующие и регулирующие аппараты в исходное положение (S_{11} – «Г»; $S_1 - S_7$ – 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 КМ₄.
7. Снять данные на холостом ходе, занести их в табл. 5.1.
8. Установить необходимое возбуждение ГПН (АТР₁).
9. Изменяя нагрузку ГПН ($S_1 - S_7$), снять показания приборов и занести их в табл. 5.1.
10. Рассчитать необходимые параметры и построить характеристики СД.

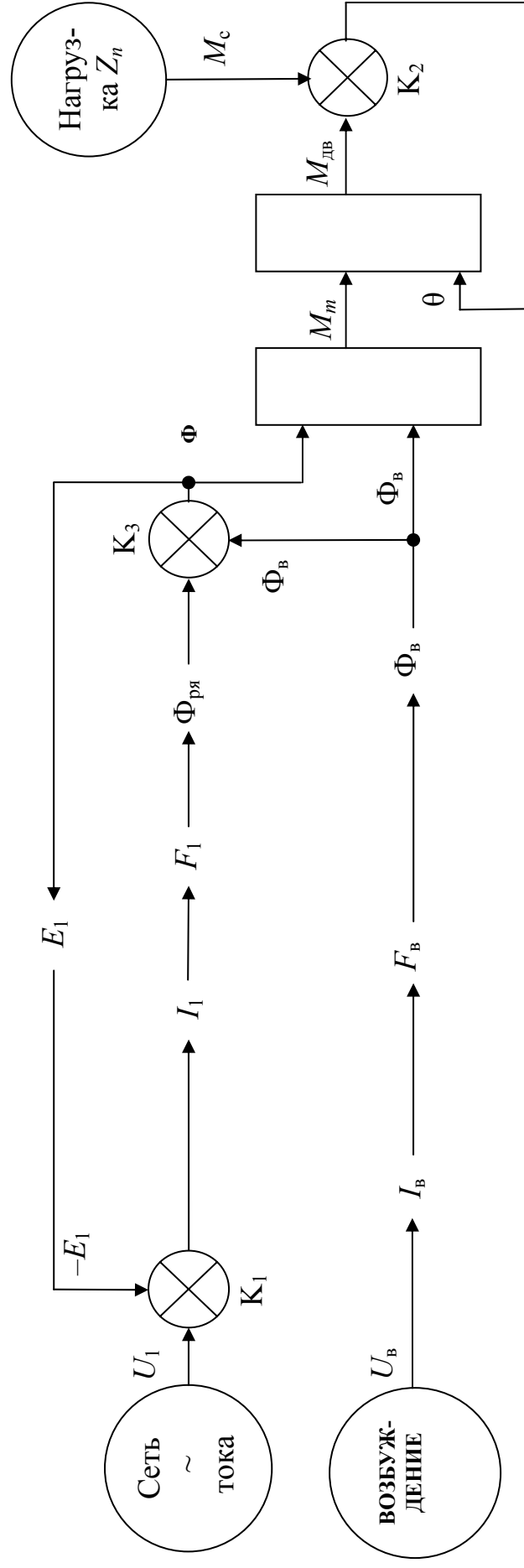


Рис. 5.1. Синхронный электродвигатель (структурно-логическая схема преобразований)

Таблица 5.1

№ опыта	Фазы	Измерено				Вычислено			
		P_1 , Вт	I_1 , А	I_2 , А	U_2 , В	$\cos\varphi$	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								

Формулы для расчета

$$\cos\varphi_1 = P_{\text{вх}}/S; \tag{5.1}$$

$$P_{\text{вх}} = P_{1A} + P_{1B} + P_{1C}; \tag{5.2}$$

$$S = 3U_{\phi}I_{\phi}; \tag{5.3}$$

$$P_{1Г} = P_{2\text{дв}} = I_2U_2/\eta_{Г}. \tag{5.4}$$

КПД генератора постоянного напряжения, определяется по универсальной кривой $\eta = f(P_{2Г})$:

$\eta_{Г}$	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); $P_{2Г} = I_2U_2$ – мощность на выходе генератора.

$$\eta = P_2/P_1; \tag{5.5}$$

$$M = 9,55P_2/n_{2Н}. \tag{5.6}$$

Содержание отчета

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.

Лабораторная работа 6

ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: изучить конструкцию генератора постоянного напряжения; опытным путем получить характеристики холостого хода, нагрузочную, внешнюю и регулировочную для генераторов с независимым возбуждением.

Общие положения [7]

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 напряжения от нуля до номинальной величины, а также изменение 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 фазным ротором (рис. 1.1). Мощность, потребляемая двигателем из сети, измеряется ваттметром W_1 . Ток двигателя контролируется амперметром A_1 (К50). Напряжение и ток генератора контролируются приборами: вольтметром V_2 и амперметром A_2 . Ток возбуждения измеряется прибором A_4 .

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 создает частоту вращения якоря генератора – n_2 .

Напряжение возбудителя U_b посредством создаваемой постоянной МДС F_b возбуждает основной магнитный поток генератора Φ_b . Результирующий магнитный поток Φ с учетом реакции якоря $\Phi_{р.я}$ наводит в обмотке якоря ЭДС E_2 , которая после вычитания падения напряжения создает напряжения $U_я$.

Ток якоря определяется как напряжением $U_я$, так и ЭДС $E_я$, которая, в свою очередь, является функцией частоты вращения якоря $n_я$.

Основные аналитические зависимости [2]

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}} ; \quad (6.1)$$

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

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}} ; \quad (6.3)$$

$$P_1 = U I_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} ; \quad (6.4)$$

$$e_{\text{в}} = I_{\text{в}} R_{\text{в}} + L_{\text{в}} \frac{dI_{\text{в}}}{dt} . \quad (6.5)$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой стенда рис. 1.1, расположением приборов и пускорегулировочной аппаратурой; записать основные паспортные данные испытуемой машины, технические характеристики приборов и приводного двигателя.
2. Установить коммутационные аппараты в исходное положение (S_{11} – «Г»; $S_1 - S_7$ – выкл.; АТР₁ – на минимум). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.
3. Подать напряжение на стенд (QF_1).
4. Подать напряжение на обмотки статора АД с фазным ротором (SB_1).
5. Перевести АД с фазным ротором в режим АД с короткозамкнутым ротором, для чего включить КМ₅ – КМ₈.
6. Снять характеристику холостого хода $E_{\text{Г}} = f(I_{\text{в}})$. Изменяя значения тока возбуждения $I_{\text{в}}$ (A_4), снять значение ЭДС, данные измерения свести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

$I_{\text{в}}, \text{A}$						
$E_{\text{Г}}, \text{В}$						

7. По данным табл. 6.1 построить характеристику холостого хода $E_{\text{Г}} = f(I_{\text{в}})$ при $I_2 = 0, n = \text{const}$.
8. Снять нагрузочную характеристику $U_{\text{Г}} = f(I_{\text{в}})$. Установить ток нагрузки I_2 , увеличивая нагрузку ($S_1 - S_7$) и изменяя ток возбуждения таким образом, чтобы $I_2 = \text{const}$, снять значения напряжения $U_{\text{Г}}$. Данные свести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

$I_{\text{в}}, \text{A}$						
$U_{\text{Г}}, \text{В}$						

9. По данным табл. 6.2 построить нагрузочную характеристику $U_{\text{Г}} = f(I_{\text{в}})$, совместить ее с характеристикой холостого хода [10].
10. Снять внешнюю характеристику $U_{\text{Г}} = f(I_2)$ при $n_1 = \text{const}, I_{\text{в}} = \text{const}$. Опыт проводится для $I_{\text{в}} = 0,5$ и 1 А. Установить ток возбуждения и, изменяя значение тока нагрузки ($S_1 - S_7$), снять изменение напряжения. Данные свести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

I_2, A						
$U_{\text{Г}}, \text{В}$						

11. По данным табл. 6.3 построить внешнюю характеристику $U_{\text{Г}} = f(I_2)$.
12. Снять регулировочную характеристику $I_{\text{в}} = f(I_2)$. Установить значение напряжения $U_{\text{Г}} = \text{const}$, увеличивая ток нагрузки ($S_1 - S_7$), одновременно изменяя ток возбуждения таким образом, чтобы $U_{\text{Г}}$ не менялось. Данные свести в табл. 6.4.

Таблица 6.4

$I_{\text{в}}, \text{A}$						
$I_{\text{я}}, \text{A}$						

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

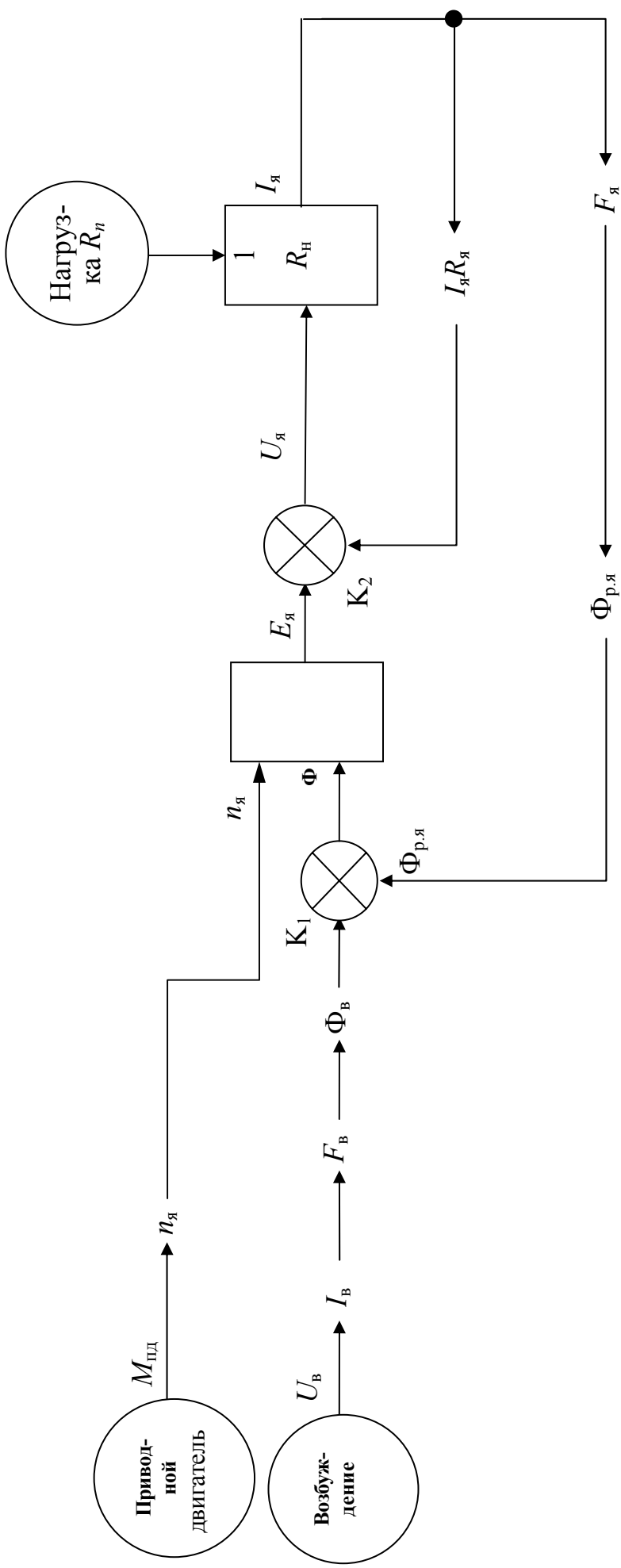


Рис. 6.1. Генератор постоянного напряжения (структурно-логическая схема преобразований)

Содержание отчета

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 $U_r = E - I_a R_a$.
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.
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 щетками.
18. Объясните СЛС генератора постоянного напряжения.
19. Причина снижения напряжения генератора параллельного возбуждения под нагрузкой.
20. Как изменить жесткость внешней характеристики ГПН смешанного возбуждения?
21. Принципиальная электрическая схема стенда УЭСМ-2 для данной работы.
22. Чем отличаются петлевая и волновая обмотки якоря?
23. Какие основные параметры обмотки якоря?
24. Какие условия самовозбуждения ГПН?
25. Какие способы возбуждения ГПН?

Лабораторная работа 7

ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: ознакомиться с устройством и особенностью пуска двигателя постоянного тока, получить опытными путем механические и рабочие характеристики.

Основные 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.

Двигатели постоянного тока 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 пересчет мощности P 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 выходной мощности синхронного генератора P_r осуществляется ваттметром комплекта К50.

Частота вращения якоря

$$n_2 = E_{\text{тг}}/C, \quad (7.2)$$

где C – постоянная тахогенератора; $E_{\text{тг}}$ – ЭДС тахогенератора V_3 .

При холостом ходе

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

Для исследования двигателя постоянного тока на стенде УСЭМ-2 используется регулируемая механическая нагрузка, создаваемая на валу с помощью асинхронного двигателя с фазным ротором, работающего в режиме синхронного генератора.

Структурно-логическая схема двигателя постоянного тока (рис. 7.1)

СЛС двигателя постоянного тока содержит три компаратора, которые соответствуют трем уравнениям равновесия:

K_1 – уравнение электрического равновесия;

K_2 – уравнение магнитного равновесия;

K_3 – уравнение механического равновесия, а также два блока умножения и один интегрирующий.

Напряжение сети $U_{\text{я}}$ с учетом противо-ЭДС $E_{\text{я}}$ определяет величину тока якоря $I_{\text{я}}$ и через МДС F_1 создает магнитный поток реакции якоря $\Phi_{\text{ря}}$. Напряжение возбуждения $U_{\text{в}}$ определяет через МДС $F_{\text{в}}$ величину основного магнитного потока ДПТ Φ . Взаимодействие магнитного потока Φ и тока якоря создает вращающий момент двигателя $M_{\text{дв}}$.

Алгебраическая сумма моментов двигателя $M_{\text{дв}}$ и момента нагрузки дает величину динамического момента

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

который после интегрирующего звена определяет скорость вращения якоря – n_2 .

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

Основные аналитические зависимости [2]

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

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

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

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

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

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

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

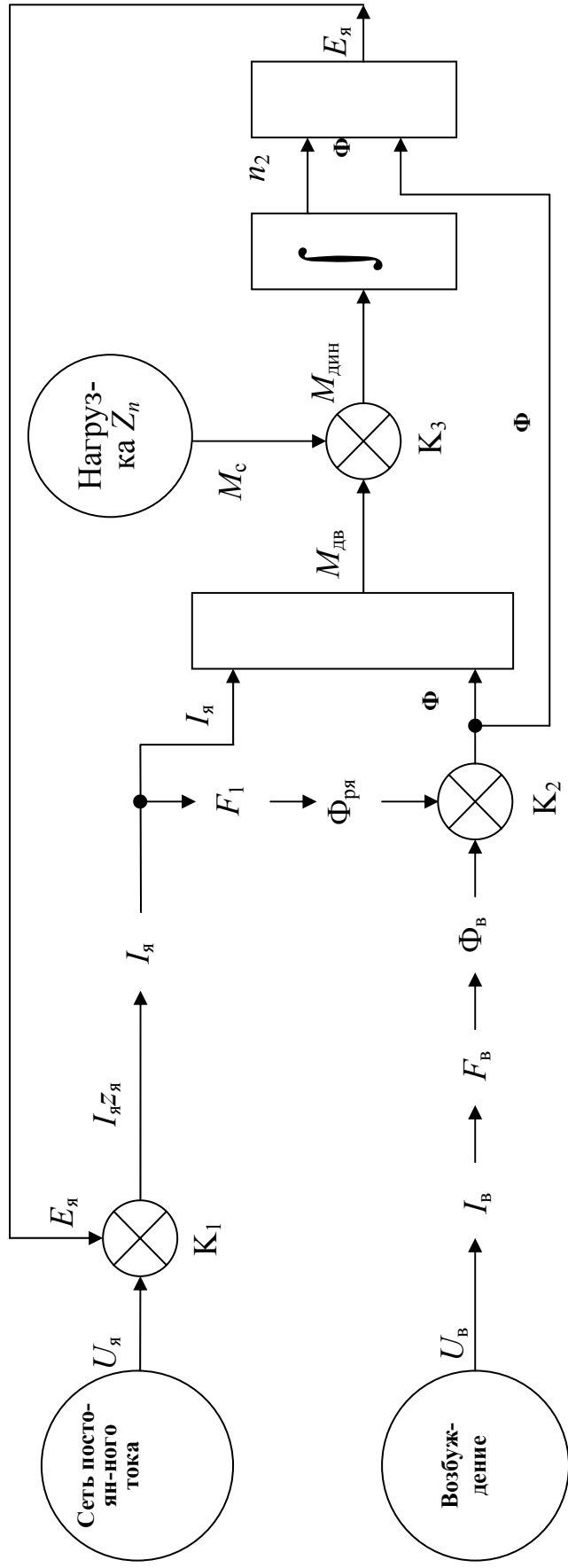


Рис. 7.1. Двигатель постоянного тока (структурно-логическая схема преобразований)

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 ($S_1 - S_7$ – отключены; S_{11} – в положении «ТП», $R_{зад}$ – на минимум; $АТР_1$ – на максимум). Установить переключатели К505 (К50) в соответствии с ожидаемыми величинами токов и напряжений.
3. Подать напряжение на стенд QF_1 .
4. Включить ТП (SB_3).
5. Подключить нагрузку синхронного генератора – SB_2 .
6. Подать напряжение на ДПТ с помощью $R_{зад}$.
7. Снять рабочие характеристики, изменяя величину нагрузки ($S_1 - S_7$), напряжение U_y ($R_{зад}$) и ток возбуждения ДПТ ($АТР_1$) [11].
8. Полученные данные занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

№ опыта	Измеренное					
	U_y	I_y	V_3	U_1	I_1	P_1
1						
2						
3						
4						
5						
6						
№ опыта	Вычислено					
	ω_2 , рад/с	M , Н·м	η	P_2 , Вт		
1						
2						
3						
4						
5						
6						

13. Построить рабочие характеристики ДПТ (M , η , ω_2 , $I_y = f(P_2)$).

Содержание отчета

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. Против-ЭДС и ее 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. Обрыв в цепи 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. В каком случае произойдет реверс на ходу под нагрузкой ДПТ смешанного возбуждения?
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. Какие назначения основных конструктивных элементов ДПТ?
29. Какие аварийные режимы работы возможны для ДПТ?
30. Каков результат обрыва цепи возбуждения ДПТ независимого возбуждения?

Лабораторная работа 8

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТП-Д

Цель работы: изучение структурной схемы системы ТП-Д с обратной связью по скорости, по напряжению и по току нагрузки, построение механических характеристик системы ТП-Д.

Общие положения [3]

Система электропривода тиристорный преобразователь-двигатель постоянного тока (ТП-Д) получила широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства, 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 $\Delta U = U_3 - U_{тр}$.

Выход ПУ является управляющим напряжением V_2 для СИФУ, которая выполняет две функции: изменяет фазу управляющего импульса и осуществляет формирование прямоугольных управляющих импульсов. Силовой блок (СБ) содержит симистор, последовательно включенный с силовым диодным мостом. Узел токоограничения представляет собой отрицательную связь по току, осуществляемой с помощью дополнительной обмотки дросселя, включенного в цепь якоря двигателя.

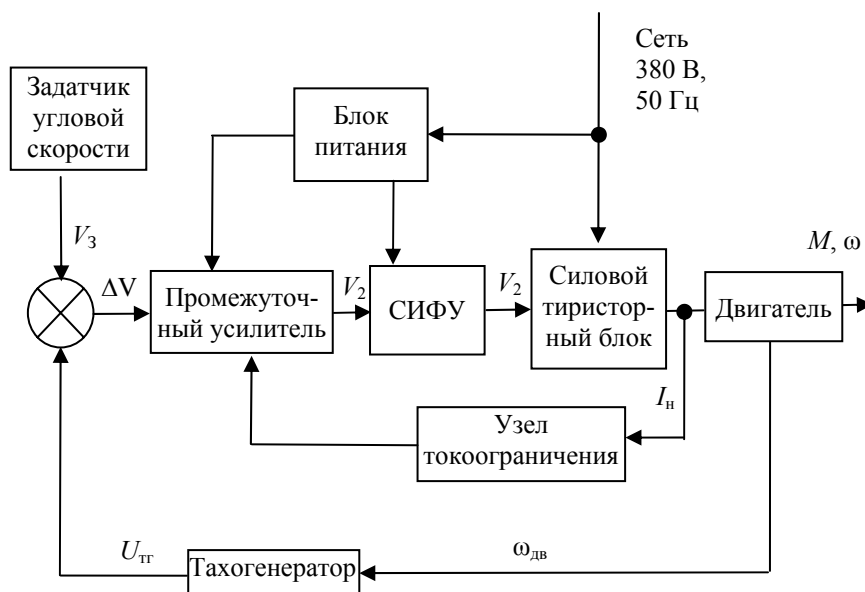


Рис. 8.1. Структурная схема системы ТП-Д

Зависимость между углом открытия тиристорov 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

$$\omega = \frac{E_d}{Ce\Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{Cee_{\text{м}}\Phi^2} M; \quad (8.1)$$

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

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

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

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

где $M_{\text{н}}$ – номинальный момент ДПТ.

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

Меньшую зону прерывистых токов имеют трехфазные преобразователи, выполненные по мостовой или нулевой схеме.

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 гонный двигатель ЭМУ (Q_{S1} , Q_{S2}). Переключателем S_2 включить ЭМУ. С помощью кнопки SB_1 включить питание тиристорного преобразователя, а с помощью задатчика скорости разогнать двигатель постоянного тока до номинальной частоты вращения. С помощью потенциометра R_1 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.

Таблица 8.1

$U_{\text{я}} = 220$ В				$U_{\text{я}} = 180$ В				$U_{\text{я}} = 120$ В				$U_{\text{я}} = 80$ В			
$U_{\text{тр}}$, В	ω , с ⁻¹	$I_{\text{я}}$, А	M , Нм	$U_{\text{тр}}$, В	ω , с ⁻¹	$I_{\text{я}}$, А	M , Нм	$U_{\text{тр}}$, В	ω , с ⁻¹	$I_{\text{я}}$, А	M , Нм	$U_{\text{тр}}$, В	ω , с ⁻¹	$I_{\text{я}}$, А	M , Нм

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема стенда.
3. Структурная схема системы ТП-Д.
4. Таблицы измеренных и рассчитанных параметров.
5. Построенные механические характеристики $n_2 = f(M)$.
6. Выводы.
7. Список литературы.

Контрольные вопросы

1. Как регулируется угловая скорость двигателя в системе ТП-Д?
2. Какие особенности механических характеристик в системе ТП-Д?
3. Как осуществляется токоограничение?
4. Как осуществляются автоматическое регулирование скорости в системе ТП-Д при различных возмущениях (по нагрузке или по напряжению питающей сети)?
5. Какова структура системы ТП-Д?
6. Какие бывают схемы силовых блоков ТП?
7. Чему равен 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.

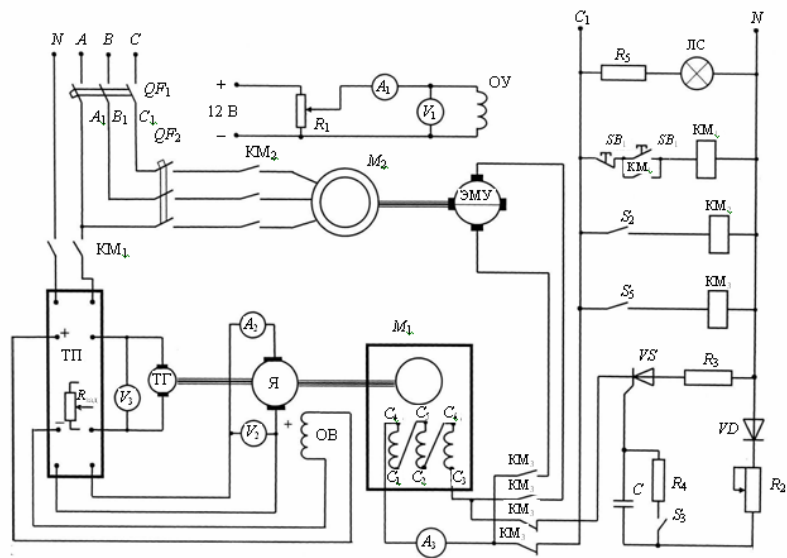


Рис. 8.2. Схема лабораторного стенда

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучить методы компьютерного моделирования физических моделей силовых электрических преобразователей.

Общие положения [2]

Для компьютерного моделирования стенд УСЭМ-2 с помощью специального разъёма подключается к персональному компьютеру Pentium-4 посредством внешнего устройства сбора аналоговой информации с USB портом. В данной работе подключаются аналоговые сигналы входных параметров АД (P_A, P_B, P_C, I, V) и параметры ГПН (V, I, n_2).

Электромагнитный момент АД создается взаимодействием тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем. Электромагнитный момент M пропорционален электромагнитной мощности:

$$M = P_{эм} / \omega_1; \quad (9.1)$$

$$\omega_1 = 2\pi n_1 / 60 = 2\pi f_1 / p, \quad (9.2)$$

где ω – угловая синхронная скорость вращения магнитного поля статора.

Подставив в (9.1) значение электромагнитной мощности $P_{32} = m_1 I_2'^2 r_2'$, получим

$$M = m_1 I_2'^2 r_2' / (\omega_1 s), \quad (9.3)$$

т.е. электромагнитный момент АД пропорционален мощности электрических потерь в обмотке ротора.

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2] s}. \quad (9.4)$$

По уравнению (9.4) строятся механические характеристики асинхронного двигателя: при номинальных параметрах, при изменении напряжения сети и активного сопротивления обмотки ротора.

Рабочие характеристики АД представляют собой графические выражения зависимости частоты вращения n_2 , КПД η , полезного момента (момент на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos \phi_1$ и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$.

Скоростная характеристика $n_2 = f(P_2)$. Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

Скольжение

$$s = \frac{P_{2э}}{P_{эм}}, \quad (9.5)$$

т.е. скольжение двигателя, а следовательно, и его частота вращения определяется отношением электрических потерь в роторе к электромагнитной мощности $P_{эм}$. Пренебрегая электрическими потерями в роторе в режиме холостого хода, можно принять $P_{2э} = 0$, а поэтому $s_0 \approx 0$ и $n_{20} \approx n_1$. По мере увеличения нагрузки на валу двигателя отношение (9.5) растет, достигая значений 0,01...0,08 при номинальной нагрузке. В соответствии с этим зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую, слабо наклоненную к оси абсцисс. Однако при увеличении активного сопротивления ротора r_2' угол наклона этой кривой увеличивается.

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Зависимость полезного момента на валу двигателя M_2 от полезной мощности P_2 определяется выражением

$$M_2 = P_2 / \omega_2 = 60 P_2 / (2\pi n_2) = 9,55 P_2 / n_2. \quad (9.6)$$

Из этого выражения следует, что если $n_2 = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ представляет собой прямую линию. Но в АД с увеличением нагрузки P_2 частота вращения ротора уменьшается, а следовательно, полезный момент на валу M_2 с увеличением нагрузки возрастает несколько быстрее нагрузки, а следовательно, график $M_2 = f(P_2)$ имеет криволинейный вид.

Зависимость $\cos \phi_1 = f(P_2)$. В связи с тем, что ток статора I_1 имеет реактивную (индуктивную) составляющую, необходимую для создания магнитного поля в статоре, коэффициент мощности АД меньше единицы. Наименьшее значение коэффициента мощности соответствует режиму холостого хода. Объясняется это тем, что ток холостого хода I_0 при любой нагрузке остается практически неизменным. Поэтому при малых нагрузках двигателя ток статора невелик и в значительной степени является реактивным. Коэффициент мощности АД в режиме холостого хода обычно не превышает 0,2. При увеличении нагрузки на валу двигателя растет активная составляющая тока I_1 и коэффициент мощности возрастает, достигая наибольшего значения (0,80...0,90) при нагрузке, близкой к номинальной. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением $\cos \phi_1$, что объясняется возрастанием индуктивного сопротивления ротора за счет увеличения скольжения, а следовательно, и частоты тока в роторе.

Все эти перечисленные характеристики можно получить с помощью *внешнего устройства сбора аналоговой и цифровой информации с usb портом и частотой дискретизации 400 кГц «USB-3»*.

Устройство работает с программой ADCLab, которая позволяет использовать устройство сбора данных без написания собственных программ для расчета и построения графиков. Использование дополнительного программного обеспечения SAVER дает возможность продолжительного сбора данных и записи их в файл на жесткий диск компьютера.

Пример построения механической характеристики $\eta = f(P_2)$:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где $P_1 = P_A + P_B + P_C$; P_A, P_B, P_C – мощности, потребляемые в каждой фазе, измеряются с помощью АЦП (аналого-цифровой преобразователь). Данные передаются в память ПК.

$$P_2 = P_{1г} = P_{2г} / \eta_{г},$$

где $\eta_{г}$ – КПД генератора постоянного напряжения, определяется по таблице:

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); $P_{2н} = U_{г} I_{г}$ – мощность на выходе генератора. Величины $U_{г}$ и $I_{г}$ снимаются с помощью АЦП и заносятся в память ПК.

По полученным данным строится механическая характеристика $\eta = f(P_2)$ асинхронного двигателя.

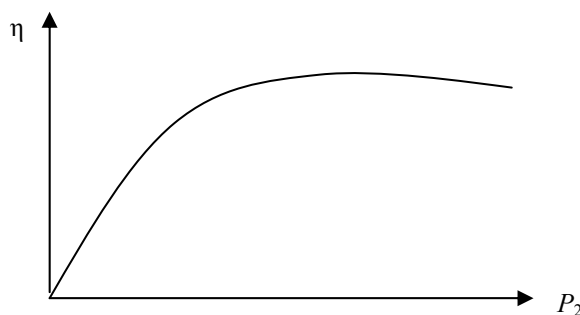


Рис. 9.1. Зависимость КПД от нагрузки двигателя

Порядок выполнения

1. Ознакомиться с работой программы обработки данных и стендом УСЭМ-2 (рис. 1.1).
2. Подготовить стенд для лабораторной работы «Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором».
3. Осуществить подключение ПК к стенду УСЭМ-2, через штекерный разъем.
4. Запустить и настроить программу ADCLab обработки данных, которые будут получены со стенда.
5. Занести в программу все необходимые данные для осуществления расчетов.
6. Запустить программу в режим получения данных.
7. Запустить программу на обработку полученных данных и построение рабочих и регулировочных характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором.
8. Проверить корректность полученных результатов.

Содержание отчета

8. Цель работы.
9. Схема стенда с подключением ПК.
10. Графики регулировочных и рабочих характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором.
11. Выводы.
12. 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 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. Почему ток холостого хода АД больше, чем ток трансформатора такой же номинальной мощности?
7. Как влияет величина нагрузки P_2 на основные параметры АД с фазным ротором?
8. Основные свойства АД.
9. Каков физический смысл электрического эквивалента механической нагрузки?
10. Индукционно-динамическое торможение АД.
11. Координаты характерных точек механической характеристики.
12. Почему при холостом ходе у АД низкий $\cos\varphi$ и КПД?
13. Почему не учитываются магнитные потери ротора?
14. Принципиальная электрическая схема статора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения 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.

Исследование динамических характеристик СЭП, анализ и синтез замкнутых САР электропривода, моделирование аварийных режимов работы преобразователей в процессе эксплуатации, представляют широкий выбор вопросов для курсового и дипломного проектирования, научно-исследовательской работы, решения задач конструирования и оптимальной эксплуатации энергетического оборудования.

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 / А.В. Мищенко // Инженерное образование в XXI веке : труды семинара ТГТУ. – 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 изд. перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1990. – 528 с.
3. Александров, Н.Н. Электрические машины и микромашины : учебник для с/х вузов / Н.Н. Александров. – М. : Колос, 1983. – 384 с.
4. Кацман, М.М. Электрические машины : учебник для техникумов / М.М. Кацман. – М. : Высшая школа, 1983. – 432 с.
5. Вольдек, А.И. Электрические машины : учебник для электротехнических специальностей вузов / А.И. Вольдек. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1974. – 832 с.
6. Важнов, А.И. Электрические машины / А.И. Важнов. – Л., 1974.
7. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М., 1986.
8. Костенко, М.П. Электрические машины / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Л., 1973. Ч. I – II.
9. Расчет магнитных цепей электрических машин переменного тока : метод. указ. / сост. : А.В. Мищенко, В.А. Медведев, Е.М. Наумов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1996. – 19 с.
10. Электрические машины : лаб. раб. и метод. указ. / сост. : А.В. Мищенко, А.К. Паньков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1999. – 50 с.
11. Машины постоянного и переменного тока : метод. указ. / сост. : А.В. Мищенко, Т.А. Оськина. – Тамбов : ТИХМ, 1991. – 31 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ПО «ЭЛЕКТРОМЕХАНИКЕ» И «ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ» УСЭМ-2	5
Лабораторная работа 1 ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР	9
Лабораторная работа 2 ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ	20
Лабораторная работа 3 ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ	32
Лабораторная работа 4 СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР	39
Лабораторная работа 5 СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ	46
Лабораторная работа 6 ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	52
Лабораторная работа 7 ДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ	57
Лабораторная работа 8 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТП-Д	62
Лабораторная работа 9 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	71