

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БАРАНОВИЧСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

**Методические указания по выполнению
лабораторных работ для студентов
инженерных специальностей**

В 2 частях

Часть 2

Барановичи
РИО БарГУ
2011

УДК 631.171:636(072)
ББК 31.261:31.264я73
Э45

Рекомендовано к печати методической комиссией
инженерного факультета

Составители:

И. В. Дубень, С. И. Козлов, М. И. Гридюшко

Рецензенты:

Д. А. Ционенко, кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой физико-математических дисциплин БарГУ;
А. В. Никишов, старший преподаватель кафедры механизации
и энергообеспечения производства БарГУ

Э45

Электрические машины и аппараты [Текст] : метод. указания
по выполнению лаб. работ для студентов инженер. специальностей :
в 2 ч. / сост.: И. В. Дубень, С. И. Козлов, М. И. Гридюшко. — Бар-
новичи : РИО БарГУ, 2011. — Ч. 2. — 67, [3] с. : ил. — 99 экз.

Приведены правила техники безопасности при работе в лаборатории электротехники, порядок подготовки к лабораторным занятиям и оформления отчетов, методика проведения опытов и обработки опытных данных при экспериментальном исследовании электрических машин и аппаратов.

Издание предназначено для студентов инженерных специальностей дневной и заочной форм получения образования, изучающих дисциплины «Электротехника, электрические машины и аппараты» и «Электрооборудование сельскохозяйственного производства».

Рис. 28. Табл. 9.

УДК 631.171:636(072)
ББК 31.261:31.264я73

ã БарГУ, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Введение</i>	4
Требования техники безопасности при выполнении лабораторных работ	5
<i>Лабораторная работа 1.</i> Исследование однофазного трансформатора	7
<i>Лабораторная работа 2.</i> Исследование работы трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором	21
<i>Лабораторная работа 3.</i> Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором	31
<i>Лабораторная работа 4.</i> Исследование трехфазного синхронного генератора ..	44
<i>Лабораторная работа 5.</i> Исследование двигателя постоянного тока парал- лельного возбуждения	60
Список источников	69

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы, представленные в настоящих методических указаниях, выполняются на базе комплектных лабораторных стендов НТЦ-23, которыми оснащена лаборатория электротехники, электрических машин и аппаратов.

Подготовка к лабораторным работам

1. Предварительно необходимо ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.
2. По лекциям и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной работе.
3. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе согласно методическим указаниям по соответствующей лабораторной работе.

Студенты, явившиеся на занятие неподготовленными, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Выполнение лабораторных работ

1. На рабочем месте необходимо ознакомиться с приборами, аппаратами и прочим оборудованием, записать в отчет технические данные объектов и средств исследования. При этом нужно выяснить, какие зажимы приборов соответствуют тем или иным точкам электрической схемы и в какие положения нужно установить органы управления блока питания.
2. Сборку электрических цепей следует производить, пользуясь соответствующей электрической схемой и указаниями преподавателя.
3. При сборке цепей следует избегать излишнего пересечения соединительных проводов.
4. При сборке цепей постоянного тока необходимо соблюдать полярность включения приборов в соответствии с полярностью источника тока.
5. Во время выполнения работы необходимо следить за показаниями приборов и не перегружать их.
6. По окончании выполнения лабораторной работы необходимо отключить лабораторный стенд, показать преподавателю полученные результаты и, с его разрешения, разобрать электрическую схему.

Уход из лаборатории до окончания занятий не разрешается. Время, отводимое студентам для выполнения лабораторной работы, равно двум академическим часам.

Отчеты по лабораторным работам оформляются согласно общепринятым на инженерном факультете нормам и правилам. Все вычисления следует производить в системе единиц СИ. Построение экспериментальных кривых выполняется в прямоугольной системе координат. Координатные оси должны иметь обозначения изображаемых величин, размерность и масштаб.

Отчеты должны содержать:

- 1) наименование работы и ее номер, цель работы в краткой формулировке;
- 2) электрическую схему лабораторной установки (выполняется карандашом с соблюдением правил начертания и обозначения элементов согласно системе ЕСКД);

- 3) перечень используемой аппаратуры, ее технические данные, условные обозначения;
- 4) основные расчетные формулы с подробной расшифровкой условных обозначений и указанием единиц измерения;
- 5) результаты измерений и расчетов;
- 6) графические зависимости и векторные диаграммы (при необходимости);
- 7) анализ результатов работы и выводы.

Отчеты, выполненные с отступлениями от вышеперечисленных требований, к защите не допускаются.

Лабораторная работа считается защищенной, если студент показал знание цели, физической сущности исследуемых процессов, методики выполнения опытов, может объяснить и проанализировать полученные результаты и разъяснить основные выводы.

ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К работе в учебной лаборатории электротехники, электрических машин и аппаратов допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности. За проведенный инструктаж они в обязательном порядке расписываются в журнале регистрации.

Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо:

- 1) изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе;
- 2) изучить методические указания по выполнению работы, правила работы с приборами и оборудованием, а также правила техники безопасности при работе в лаборатории;
- 3) ознакомиться с экспериментальной установкой, подготовить рабочее место, убрав все посторонние предметы;
- 4) убедиться, что переключатели напряжения на блоках питания находятся в нулевом положении, и все рукоятки регулирования выведены в крайнее левое положение.

При выполнении лабораторной работы необходимо выполнять следующие рекомендации:

1. Строго соблюдать правила работы с используемыми приборами и оборудованием.
2. Не наклоняться низко над приборами и оборудованием, не передавать через них предметы и не опираться на них.
3. Быть внимательным, соблюдать порядок, не вмешиваться в работу других студентов и не отвлекать их от работы.
4. Не включать приборы и оборудование, работа которых не предусмотрена заданием.
5. Не оставлять без присмотра включенное оборудование.
6. На рабочем месте поддерживать чистоту и порядок, не загромождать рабочие места и проходы.
7. Перед сборкой электрических схем следует убедиться в исправности изоляции используемых соединительных проводов. Запрещается пользоваться проводами без наконечников.
8. Собирать электрические цепи разрешается только при выключенных лабораторных стендах.
9. После окончания сборки схемы тщательно проверить правильность соединений в соответствии со схемами, прилагаемыми к лабораторным работам.
10. Включать стенды под напряжение разрешается только после проверки электрических цепей руководителем и только в его присутствии.

11. Нельзя прикасаться к неизолированным проводам, соединительным зажимам и другим частям электрических цепей, которые находятся под напряжением.

12. Прежде чем производить какие-либо изменения в исследуемой цепи, нужно отключить ее от источника электрической энергии и после присоединения получить разрешение руководителя на повторное включение.

13. Запрещается без надобности в течение долгого времени держать собранную цепь под напряжением во избежание перегрева источников питания и элементов цепи.

14. При отключении цепей переменного тока, содержащих индуктивности и емкости, следует сначала плавно снизить напряжение питания рукояткой лабораторного автотрансформатора, так как при резком отключении могут возникнуть значительные ЭДС, опасные для человека и для изоляции обмоток.

15. Обнаружив любую неисправность в электротехническом устройстве, находящемся под напряжением, а также при появлении дыма, специфического запаха или искрения, следует немедленно сообщить о случившемся преподавателю.

16. Перед разборкой цепи необходимо убедиться, что источник питания отключен. Запрещается выдергивать соединительные провода из зажимов.

17. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать цепь и привести в порядок рабочее место.

18. При эксплуатации стенда необходимо соблюдать «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

В случае возникновения аварийной ситуации следует выполнить следующие действия:

1. Немедленно прекратить работу.

2. Отключить вышедшее из строя оборудование либо отключить напряжение в лаборатории общим выключателем и доложить о случившемся преподавателю.

3. В случае поражения человека электрическим током немедленно оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь, освободив его от действия электротока, сообщить о случившемся преподавателю и вызвать в скорую помощь.

4. При возникновении пожара или возгорания следует немедленно сообщить о случившемся преподавателю или в городскую пожарную службу.

Помните! Несоблюдение правил техники безопасности может привести к поражению электрическим током или к выходу из строя дорогостоящего оборудования.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

ИССЛЕДОВАНИЕ

ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы:

- изучить назначение и паспортные данные силового двухобмоточного трансформатора;
- экспериментально определить параметры трансформатора, а также величины, характеризующие его магнитную систему;
- построить векторную диаграмму токов и напряжений.

1.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы

1. Изучите необходимые разделы в рекомендуемой литературе, а также теоретические сведения, приведенные в подразделе 1.4.
2. Запишите и поясните паспортные данные исследуемого трансформатора.
3. Вычертите принципиальную электрическую схему лабораторной установки.
4. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и расчетов.

1.2 Объект и средства исследования

Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины». Объектом исследования является однофазный двухобмоточный трансформатор, входящий в комплект стенда. Номинальные данные трансформатора: первичное напряжение $U_{1ном} = 220$ В, вторичное напряжение $U_{2ном} = 110$ В, мощность $S_{ном} = 150$ В · А, площадь поперечного сечения сердечника $s = 10 \cdot 10^{-4}$ м², коэффициент заполнения магнитопровода сталью $c = 0,95$.

Средствами исследования служат:

1) инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощность 1,5 кВт; номинальный ток 7 А; диапазон задания линейного напряжения — 0...220 В с дискретностью 1 В; диапазон задания частоты — 0...163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

2) цифровые измерительные приборы, входящие в комплект стенда с номинальным напряжением 500 В и номинальными током 5 А.

1.3 Порядок выполнения работы

1. Пользуясь схемами (рис. 1.1—1.4), изучите расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда.

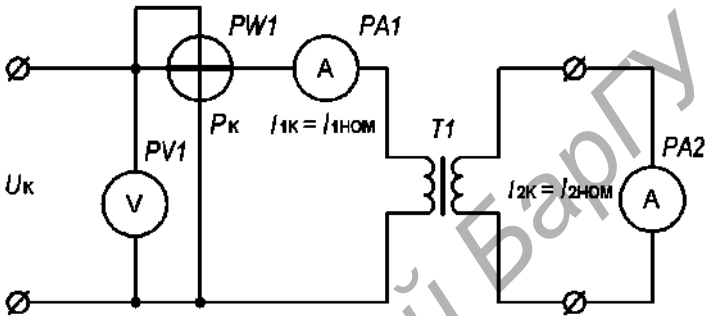


Рисунок 1.1 — Схема опыта короткого замыкания

2. Все переключатели стенда установите в положение «ВЫКЛЮЧЕНО», регулировочные рукоятки переведите в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

3. Для проведения опыта короткого замыкания соберите электрическую цепь (см. рис. 1.2) с помощью соединительных проводников и произвести настройку стенда: переключателем SA27 установите режим работы инвертора «Независимое управление напряжением и частотой», рукоятки регуляторов RP4 и RP5 повернуть в крайнее левое положение.

4. После разрешения преподавателя автоматическими выключателями «СЕТЬ» подключите стенд к сети. Включите питание цепи управления выключателем SA1. Кнопкой SB1 и выключателем SA26 включить питание инвертора. Задайте частоту напряжения инвертора 50 Гц, контролируя ее по частотомеру HZ1. Изменяя напряжение инвертора регулятором RP5, установите значение тока короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора $I_{2к} = I_{2ном} = 1,4$ А, контролируя его по амперметру PA2.

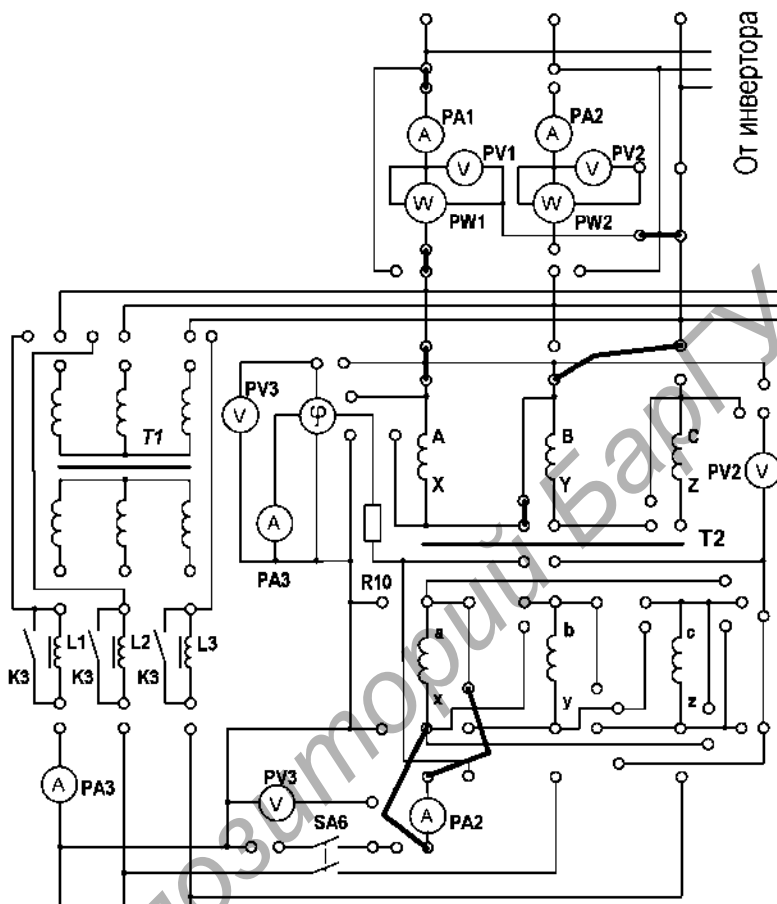


Рисунок 1.2 — Схема подключения трансформатора для проведения опыта короткого замыкания

5. Запишите в таблицу 1.1 показания измерительных приборов ток первичной обмотки $I_{1к}$ по амперу PA1; напряжение короткого замыкания $U_{1к}$ по вольтметру PV1 (при переключателе «PV1/PW1» в положении «PW1»), ток короткого замыкания $I_{2к}$ по амперметру PA2, мощность потерь P_k по ваттметру PW1 (при переключателе «PV1/PW1» в положении «PW1»).

После выполнения измерений отключите питание инвертора кнопкой SB2 и верните все выключатели и регулировочные рукоятки в исходное положение.

Т а б л и ц а 1.1 — Результаты опыта короткого замыкания

Величина	Обозначение. Расчетная формула	Единица измерения	Значение
Ток первичной обмотки	$I_{1к}$	А	
Ток вторичной обмотки	$I_{2к}$	А	
Напряжение короткого замыкания	$U_{1к}$	В	
Мощность активных потерь	P_k	Вт	
Полное сопротивление	$Z_k = U_{1к} / I_{1к}$	Ом	
Активное сопротивление	$R_k = P_k / I_{1к}$	Ом	
Реактивное сопротивление	$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$	Ом	
Относительное напряжение короткого замыкания	$u_{1к\%} = \frac{U_{1к}}{U_{1ном}} 100$	%	

6. Определите расчетные параметры трансформатора в режиме короткого замыкания и запишите их в таблицу 1.1.

7. Для проведения опыта холостого хода соберите цепь (см. рис. 1.4), с помощью соединительных проводников произведите настройку стенда: переключателем SA27 установите режим работы инвертора «Независимое управление напряжением и частотой», рукоятки регуляторов RP4 и RP5 поверните в крайнее левое положение, переключатель «PV3/φ» установите в положение «PV3».

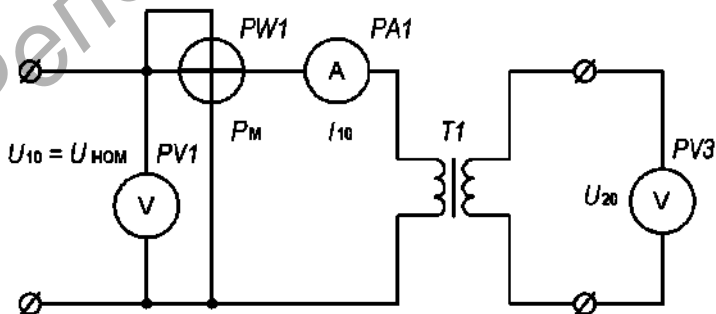


Рисунок 1.3 — Схема опыта холостого хода трансформатора

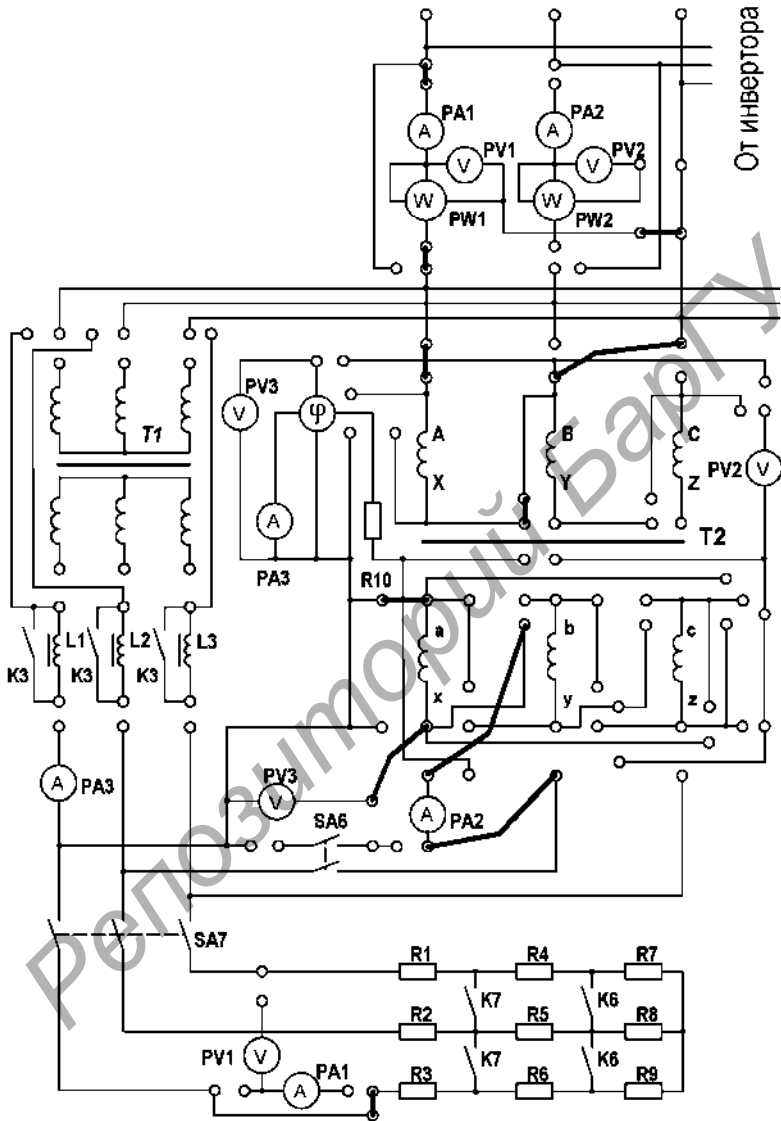


Рисунок 1.4 — Схема подключения трансформатора для проведения опыта холостого хода

8. Включите питание цепи управления выключателем SA1. Кнопкой SB1 и выключателем SA26 включить питание инвертора. Задайте частоту напряжения инвертора 50 Гц, контролируя ее по частотомеру HZ1. Регулятором RP5 напряжения инвертора установите номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора $U_{10} = U_{ном} = 220$ В, контролируя его по вольтметру PV1.

9. Запишите в таблицу 1.2 показания измерительных приборов: ток холостого хода первичной обмотки I_{10} по амперметру PA1; напряжение холостого хода первичной обмотки U_{10} по вольтметру PV1 (при переключателе «PV1/PW1» в положении «PV1»); напряжение холостого хода вторичной обмотки U_{20} по вольтметру PV3; мощность магнитных потерь P_m по ваттметру PW1 (при переключателе «PV1/PW1» в положении «PW1»).

Т а б л и ц а 1.2 — Результаты опыта холостого хода

Величина	Обозначение. Расчетная формула	Единица измерения	Значение
Напряжение первичной обмотки	U_{10}	В	
Напряжение вторичной обмотки	U_{20}	В	
Мощность магнитных потерь	P_m	Вт	
Ток холостого хода	I_{10}	А	
Коэффициент трансформации	$n = U_{10} / U_{20}$	—	
Полное сопротивление	$Z_0 = U_{10} / I_{10}$	Ом	
Активное сопротивление	$R_0 = P_{10} / I_{10}^2$	Ом	
Реактивное сопротивление	$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$	Ом	
Коэффициент мощности	$\cos \varphi_0$	—	
Угол магнитных потерь	$\delta = \arctg (X_0 / R_0)$	—	
Активный ток холостого хода	I_{10a}	А	
Реактивный ток холостого хода	I_{10p}	А	
Амплитуда магнитного потока в сердечнике	$\Phi_m \approx \frac{U_{10}}{4,44 f w_1}$	Вб	
Амплитуда магнитной индукции в сердечнике	$B_m = \frac{\Phi_m}{S_c}$	Тл	
Оптимальное значение коэффициента нагрузки трансформатора	$\beta_{опт} = \sqrt{P_{10} / P_k}$	—	

10. После выполнения измерений отключите питание инвертора кнопкой SB2, не изменяя положение выключателей и регулировочных рукояток.

11. Определите расчетные параметры трансформатора в режиме короткого замыкания и запишите их в таблицу 1.2.

12. Для испытания трансформатора под нагрузкой соберите цепь (рис. 1.4 и 1.5) с помощью соединительных проводников, настройте и включите питание трансформатора согласно пунктам 7 и 8.

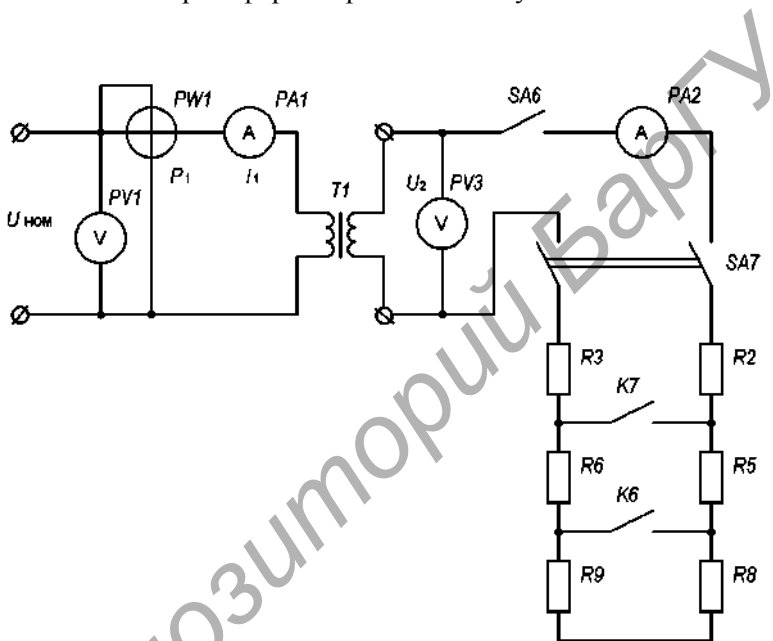


Рисунок 1.5 — Схема испытания трансформатора под нагрузкой

13. Включите выключатели SA6 и SA7. При различных положениях переключателя SA5, управляющего через реле K6 и K7 нагрузочными реостатами R2-R3, R5-R6 и R8-R9, запишите в таблицу 1.3 показания приборов: ток первичной обмотки I_1 по амперметру PA1, напряжение первичной обмотки U_1 по вольтметру PV1 (при переключателе «PV1/PW1» в положении «PV1»), напряжение вторичной обмотки U_2 по вольтметру PV3, активную мощность первичной обмотки P_1 по ваттметру PW1 (при переключателе «PV1/PW1» в положении «PW1»).

14. После выполнения измерений отключите питание инвертора кнопкой SB2 и верните все выключатели и регулировочные рукоятки в исходное положение.

15. Определите расчетные параметры трансформатора в нагрузочном режиме и запишите их в таблицу 1.3:

- коэффициент загрузки трансформатора β по формуле

$$\beta = I_2 / I_{2\text{ном}};$$

- коэффициент полезного действия трансформатора η (%)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100 = \frac{\beta U_2 I_2 \cos \varphi_n}{\beta U_2 I_2 \cos \varphi_n + P_0 + \beta^2 P_k} 100.$$

При расчетах принять коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_n = 1$.

16. Постройте внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$ и зависимость КПД $\eta = f(I_2)$ по опытным и расчетным данным, проанализируйте полученные зависимости.

1.4 Основные теоретические сведения

Трансформатор представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения при неизменной частоте.

Т а б л и ц а 1.3 — Результаты испытания трансформатора под нагрузкой

Величина	Обозначение	Единица измерения	Режим			
			холостой ход	1	2	3
Напряжение первичной обмотки	U_1	В				
Напряжение вторичной обмотки	U_2	В				
Ток первичной обмотки	I_1	А				
Ток вторичной обмотки	I_2	А				
Активная мощность	P_1	Вт				
Коэффициент загрузки	β	—				
КПД	η	%				

Однофазный двухобмоточный трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода, собранного из тонких изолированных листов электротехнической стали, и двух обмоток, выполненных из изолированного медного провода. На первичную обмотку подается напряжение сети, к зажимам вторичной присоединяется нагрузка.

Переменный магнитный поток E , возбужденный в магнитопроводе трансформатора, наводит в обеих обмотках ЭДС, действующие значения которых равны

$$E_1 = 4,44w_1 f \Phi_m ;$$

$$E_2 = 4,44w_2 f \Phi_m ,$$

где w_1 и w_2 — число витков соответственно первичной и вторичной обмоток;

f — частота переменного тока, Гц;

Φ_m — амплитуда магнитного потока, Вб.

Различают следующие режимы работы трансформатора:

- 1) режим короткого замыкания;
- 2) режим холостого хода;
- 3) нагрузочный (рабочий) режим.

Режим короткого замыкания является предельным режимом работы трансформатора, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко. Различают короткое замыкание в процессе эксплуатации трансформатора и опытный режим короткого замыкания. При эксплуатационном коротком замыкании к первичной обмотке приложено полное напряжение сети и по обмоткам протекают токи значительно больше номинальных.

В опыте короткого замыкания (см. рис. 1.1) на первичную обмотку подается такое пониженное напряжение короткого замыкания $U_{1к} = (0,03...0,10) U_{1ном}$, при котором по первичной и вторичной обмотке протекают номинальные токи $I_{1к} = I_{1ном}$ и $I_{2к} = I_{2ном}$.

Мощность P_k , определяемая из опыта короткого замыкания, представляет собой сумму электрических потерь в активных сопротивлениях обеих обмоток трансформатора:

$$P_k = I_{1к}^2 R_1 + I_{2к}^2 R_2,$$

где R_1 и R_2 — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток.

По результатам измерений или паспортным данным определяют параметры схемы замещения трансформатора (см. рис. 1.5 и 1.6).

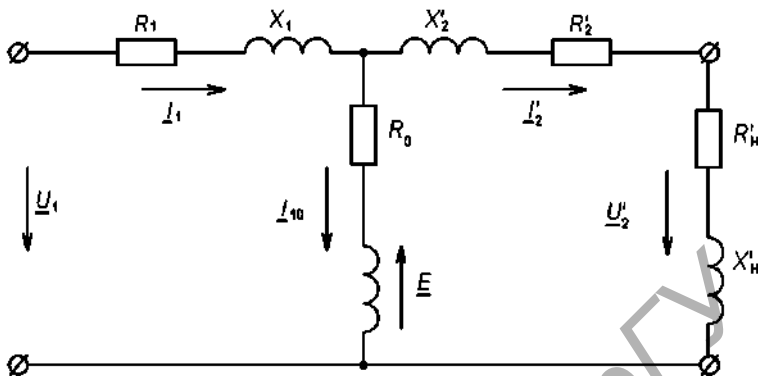


Рисунок 1.6 — Схема замещения однофазного трансформатора в нагруженном режиме

Полное Z_k , активное R_k и реактивное сопротивление X_k короткого замыкания трансформатора:

$$Z_k = U_{1к} / I_{1к};$$

$$R_k = P_k / I_{1к}^2;$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_{1к} I_{1ном}}.$$

Относительное напряжение короткого замыкания (%)

$$u_{1к\%} = \frac{U_{1к}}{U_{1ном}} \cdot 100.$$

Режим холостого хода является предельным режимом работы, при котором вторичная обмотка разомкнута (сопротивление нагрузки $Z_n = \infty$). Напряжение на зажимах первичной обмотки равно номинальному $U_{10} = U_{1ном}$.

Опыт холостого хода (см. рис. 1.3) дает возможность измерить:

1) напряжение на вторичной обмотке U_{20} , равное ЭДС $U_{20} = E_2$;
2) ток холостого хода I_{10} , значение которого составляет $(0,03 \dots 0,10) I_{1ном}$, где $I_{1ном}$ — номинальный ток первичной обмотки трансформатора;

3) активную мощность P_m — потери мощности при холостом ходе, идущие на затраты активной мощности на перемагничивание магнитопровода с частотой сети, а также на компенсацию размагничивающего действия вихревых токов, возникающих в толще листов магнитопровода трансформатора.

По результатам измерений определяются следующие величины:

1) коэффициент трансформации:

$$n = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}} = \frac{U_{1ном}}{U_{20}};$$

2) полное Z_0 , активное R_0 и реактивное сопротивление X_0 первичной обмотки трансформатора на холостом ходу (Ом):

$$Z_0 = U_{10} / I_{10} = U_{1ном} / I_{10};$$

$$R_0 = P_0 / I_{10}^2;$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

3) коэффициент мощности трансформатора на холостом ходу

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_{10}};$$

4) угол магнитных потерь δ , равный углу сдвига фаз между током холостого хода и магнитным потоком в режиме холостого хода:

$$\delta = 90^\circ - \varphi_0 = \arctg \frac{X_0}{R_0};$$

5) амплитуда магнитного потока в стали сердечника (Вб)

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 f w_1} \approx \frac{U_{10}}{4,44 f w_1};$$

б) амплитуда индукции в сердечнике (Тл)

$$B_m = \frac{\Phi_m}{s c},$$

где s — площадь поперечного сечения сердечника, м^2 ;

c — коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

На схеме замещения приведенного трансформатора электрическая связь между обмотками заменена эквивалентной электрической связью (см. рис. 1.6), что позволяет значительно упростить расчет его параметров. Уравнения связи вторичной обмотки схем замещения реального и приведенного трансформаторов имеют вид:

$$R'_2 = R_2 n^2;$$

$$X'_2 = X_2 n^2;$$

$$Z'_n = Z_n n^2;$$

$$U'_2 = U_2 n = U_1;$$

$$I'_2 = I_2 / n.$$

При этом активное и реактивное сопротивления первичной и вторичной обмоток при номинальных значениях тока практически равны:

$$R_1 \approx R'_2 = R_k / 2;$$

$$X_1 \approx X'_2 = X_k / 2.$$

В нагрузочном режиме активная, активно-индуктивная или емкостная нагрузка сопротивлением Z_n подключена ко вторичной обмотке трансформатора, в результате ток вторичной обмотки I_2 принимает определенное значение в интервале от нуля до номинального значения $I_{2\text{ном}}$. Коэффициент загрузки трансформатора имеет вид:

$$\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}.$$

Уравнения электрического состояния трансформатора в комплексном виде имеют вид:

$$U_1 = -E_1 + I_1 (R_1 + jX_1) = -E_1 + I_1 Z_1;$$

$$U_2 = E_2 - I_2 (R_2 + jX_2) = E_2 - I_2 Z_2;$$

$$I_1 = I_{10} + I'_2 = I_{10} + I_2 n,$$

где Z_1 и Z_2 — полные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора в комплексном виде.

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ при определенном значении коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_n$ (рис. 1.7).

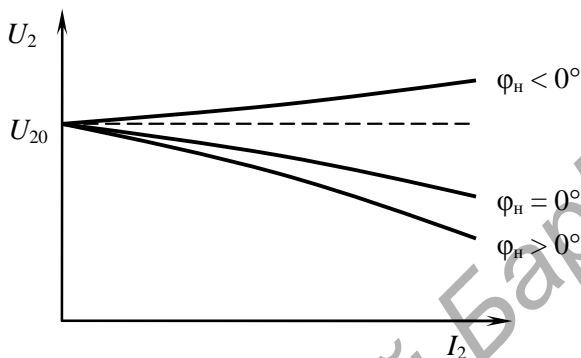


Рисунок 1.7 — Примерная внешняя характеристика трансформатора при различном характере нагрузки

Процентное изменение вторичного напряжения при переменной нагрузке:

$$\Delta u_2 \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100,$$

где U_{20} и U_2 — вторичные напряжения на холостом ходу трансформатора и в определенном нагрузочном режиме.

Коэффициент полезного действия трансформатора (рис. 1.8) определяется по опытным данным режима холостого хода, короткого замыкания и режима нагрузки трансформатора:

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \Delta P),$$

где $P_2 = \beta U_2 I_2 \cos \varphi_n$ — активная полезная мощность нагрузки;

$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ — активная мощность, потребляемая трансформатором из сети;

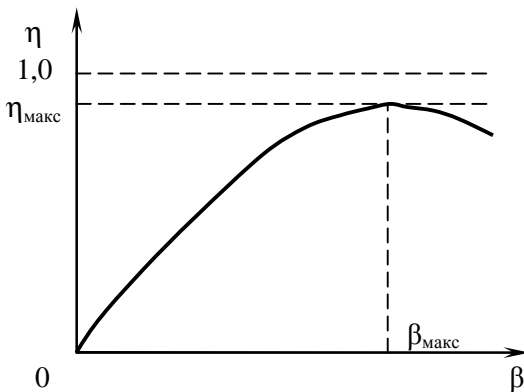


Рисунок 1.8 — Примерная зависимость КПД от степени загрузки трансформатора

$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_k$ — суммарные активные потери.

На основе опытов короткого замыкания и холостого хода можно определить оптимальное значение коэффициента загрузки трансформатора, при котором его КПД достигает максимального значения $\eta_{\text{макс}}$:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{P_{10} / P_k}.$$

1.5 Контрольные вопросы

1. Назовите основные паспортные данные однофазного двухобмоточного трансформатора.
2. С какой целью и как проводится опыт холостого хода?
3. С какой целью и как проводится опыт короткого замыкания?
4. Почему при увеличении тока нагрузки I_2 возрастает ток первичной обмотки I_1 трансформатора?
5. Почему с увеличением тока нагрузки I_2 снижается напряжение U_2 трансформатора?
6. Влияет ли увеличение воздушных зазоров в сердечнике трансформатора на параметры его работы?
7. Почему важно знать оптимальные значения коэффициента загрузки $\beta_{\text{опт}}$ и коэффициента полезного действия $\eta_{\text{опт}}$ трансформатора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы:

- ознакомиться с методикой определения параметров трехфазного электродвигателя методом непосредственной нагрузки;
- снять и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя при номинальном напряжении и частоте сети.

2.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы

1. Изучите необходимые разделы в рекомендуемой литературе, а также теоретические сведения, приведенные в подразделе 2.4.
2. Вычертите схему лабораторной установки.
3. Запишите паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
4. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений.

2.2 Объект и средства исследования

Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины». Объектом исследования является трехфазный асинхронный короткозамкнутый электродвигатель типа АИР71В6У3 с номинальными параметрами: схема соединения обмоток — Δ/Y , напряжение $U_{\text{ном}} = 220/380$ В; сила тока $I_{\text{ном}} = 3,1/1,8$ А; номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 0,55$ кВт; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 920$ об/мин; номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}} = 69\%$; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,68$.

Средствами исследования служат:

- 1) инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощность 1,5 кВт, номинальный ток 7 А, диапазон задания линейного напряжения — 0...220 В с дискретностью 1 В, диапазон задания частоты — 0...163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

2) машина постоянного тока типа 2ПН-801УХЛ4, предназначенная для создания механической нагрузки на валу двигателя, с номинальными параметрами: мощность — 0,55 кВт; напряжение — 220 В; сила тока — 3,32 А; частота вращения — 1 500 об / мин;

3) широтно-импульсные преобразователи ШИП1 и ШИП2, в состав которых входят: интеллектуальный силовой модуль Mitsubishi ASIPM PS11035, полевой транзистор IRF840 (для питания обмотки возбуждения ДПТ), микроконтроллер ATmega16, шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J;

4) цифровые измерительные приборы, входящие в состав стенда, с номинальным напряжением 500 В и номинальным током 5 А.

2.3 Порядок выполнения работы

1. Пользуясь схемами (рис. 2.1 и 2.2), изучите расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда.

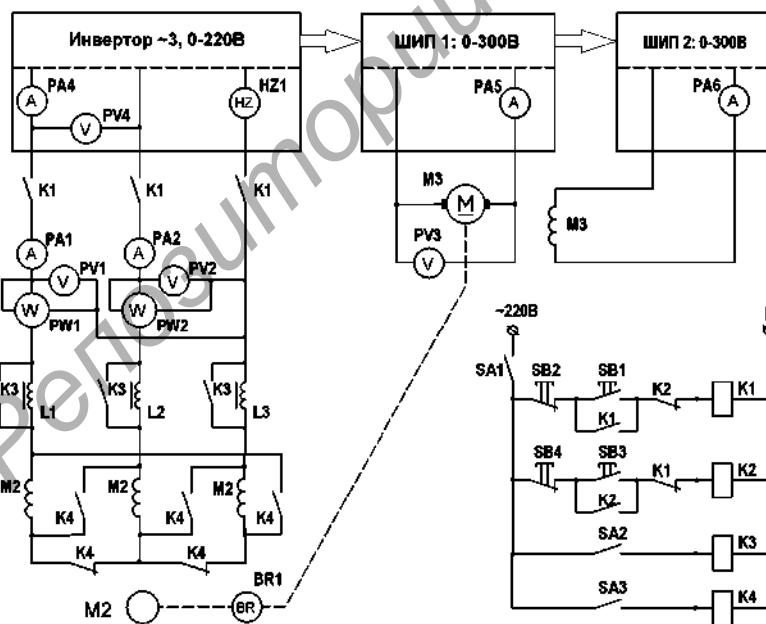


Рисунок 2.1 — Схема испытания трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя

2. Все переключатели стенда установите в положение «ВЫКЛЮЧЕНО», регулировочные рукоятки переведите в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

3. Соберите электрическую цепь (рис. 2.2) с помощью соединительных проводников и произведите настройку стенда: переключателем SA27 установите режим работы инвертора «НЕЗАВИСИМОЕ УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ И ЧАСТОТОЙ», рукоятки регуляторов RP4 и RP5 поверните в крайнее левое положение.

4. Установите режим работы инвертора: 1) переключатель «НЕЗАВИСИМОЕ УПРАВЛЕНИЕ» — в положение «ВКЛЮЧЕНО»; 2) переключатель «PV1/PW1» — в положение «PV1»; 3) выключатель «PV2/PW2» — в положение «PW2»; 4) выключатель «PV3/φ» — в положение «PV3».

5. По указанию преподавателя выберите схему соединения статорных обмоток двигателя «звезда» (переключатели SA2 в положение «ВКЛЮЧЕНО» и SA3 — «ВЫКЛЮЧЕНО») или «треугольник» (переключатели SA2 в положение «ВЫКЛЮЧЕНО» и SA3 — «ВКЛЮЧЕНО»).

6. Автоматическими выключателями «СЕТЬ» подключите стенд к сети. Включите питание цепи управления выключателем SA1. Кнопкой SB1 и выключателем SA26 включите питание инвертора. Задайте частоту напряжения инвертора 50 Гц (контролировать по частотомеру HZ1). Регулятором «ЗАДАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ» плавно увеличьте напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения $U_1 = 220$ В (контролировать по вольтметру PV4) и поддерживайте его на протяжении всего опыта. Прогрейте асинхронный двигатель в течение 10 мин.

7. Для создания механической нагрузки на валу исследуемого двигателя подключите к ШИП1 машину постоянного тока М3 в генераторном режиме в следующем порядке:

- установите режим работы ШИП1 переключателями: SA20 — «ОТКЛЮЧИТЬ ЗАМКНУТУЮ СУ», SA21 — «ЗАДАНИЕ ТОКА», SA22 — «ГЕНЕРАТОРНЫЙ РЕЖИМ»;
- переключателем SA23 включите ШИП1 и регулятором RP1 установите ток якоря $I_{я} = 3$ А;
- переключателем SA25 включите ШИП2 и регулятором RP3 «ЗАДАНИЕ ТОКА» установите требуемую силу тока возбуждения $I_{в}$ (контролировать по амперметру PA6).

8. Увеличивая ток в цепи якоря машины М3 регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП1 (против хода часовой стрелки), снимите показания приборов в пяти точках и запишите их в таблицу 2.1.

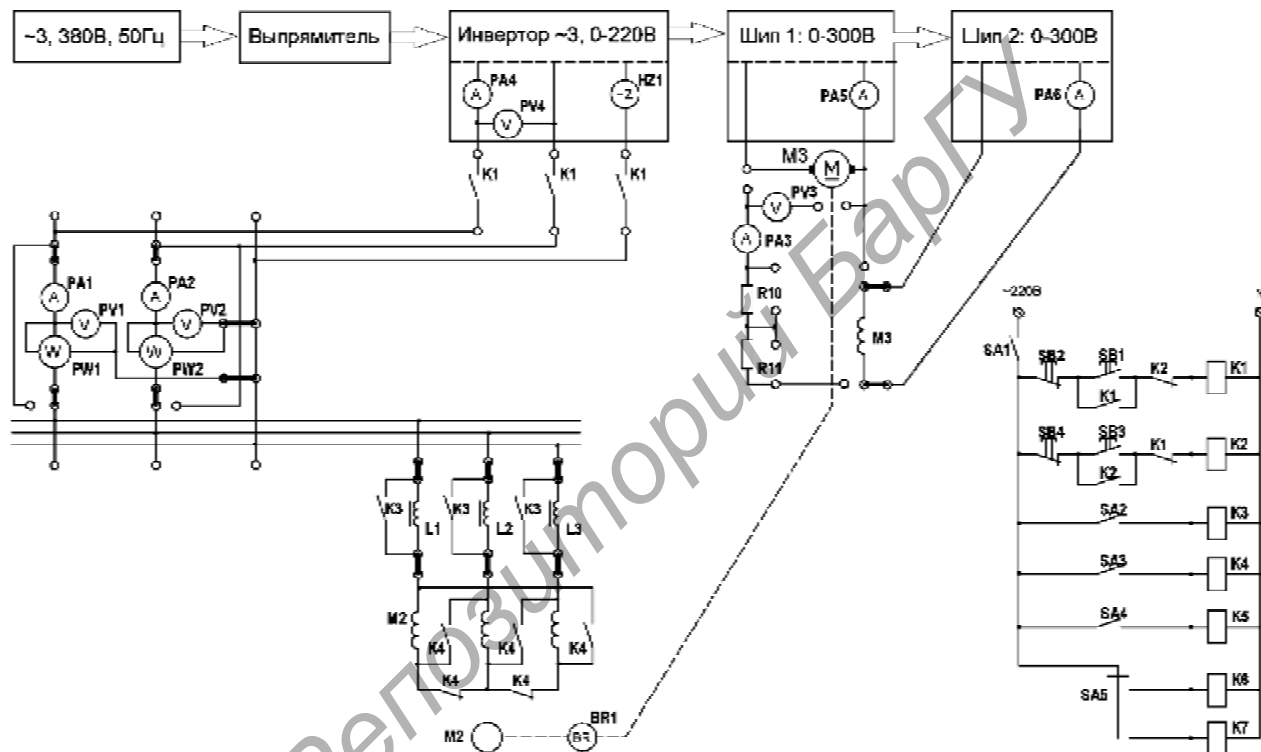


Рисунок 2.2 — Схема подключения асинхронного короткозамкнутого электродвигателя на панели стенда

Т а б л и ц а 2.1 — Рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Величина		Схема «Звезда»				
		1	2	3	4	5
Измерения						
Сила тока якоря ДПТ	$I_{я}, А$					
Напряжение якоря ДПТ	$U_{я}, В$					
Сила тока фазы АД	$I_1, А$					
Линейное напряжение	$U_1, В$					
Активная мощность	$P', Вт$					
Угловая скорость ротора АД	$\omega, рад / с$					
Частота вращения ротора АД	$n, об / мин$					
Вычисления						
Сила тока АД	$I_{1ф}, А$					
Напряжение фазы АД	$U_{1ф}, В$					
Активная мощность двигателя	$P_1, Вт$					
Скольжение	s					
Коэффициент мощности	$\cos \phi$					
Электромагнитный момент МПТ	$M_{эм}, Н \cdot м$					
Момент на валу МПТ	$M, Н \cdot м$					
Мощность на валу АД	$P_2, Вт$					
КПД асинхронного двигателя	$\eta, \%$					
<i>Примечание.</i> МПТ — машина постоянного тока, АД — асинхронный двигатель						

9. Завершив измерения, отключите стенд в следующем порядке:

- регулятором RP3 «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП2 уменьшите ток возбуждения вспомогательной машины до нуля (контролировать по амперметру РА6) и выключьте ШИП2.
- регулятором RP1 «ЗАДАНИЕ» ШИП1 уменьшите напряжение на якоре вспомогательной машины до нуля (контролировать по прибору PV3) и выключьте ШИП1 переключателем SA23;
- уменьшите напряжение на выходе инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4) и отключите кнопкой SB2 исследуемый двигатель;
- выключьте выключатель SA1 и автоматический выключатель «СЕТЬ».

10. Рассчитайте параметры работы асинхронного двигателя в исследуемых режимах:

- силу тока (А) и напряжение (В) фазы двигателя при схеме соединения фаз «звезда» по формулам:

$$I_{\phi} = I_1;$$

$$U_{\phi} = U_1 / \sqrt{3};$$

- силу тока (А) и напряжение (В) фазы двигателя при схеме соединения фаз «треугольник» по формулам:

$$I_{\phi} = I_1 / \sqrt{3};$$

$$U_{\phi} = U_1;$$

- активную мощность, потребляемую двигателем (Вт)

$$P_1 = P \sqrt{3};$$

- частоту вращения ротора (об / мин)

$$n = \frac{30\omega}{\pi};$$

- скольжение ротора (%)

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} 100,$$

где $n_0 = \frac{60f}{p}$ — синхронная частота двигателя, об / мин;

p — число пар полюсов исследуемого асинхронного двигателя ($p = 3$).

- коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{3U_{\phi} I_{\phi}};$$

- электромагнитный момент машины постоянного тока (Н · м)

$$M_{эм} = C_M \Phi I_{я} = \frac{9,55 U_{я} I_{я}}{n},$$

где $C_M \Phi$ — коэффициент момента машины постоянного тока:

$$C_M \Phi = \frac{9,55 U_{\text{я}}}{n};$$

- полезный момент на валу (Н · м)

$$M_2 = M_{\text{эм}} (1 - \eta_{\text{МПТ}});$$

где $\eta_{\text{МПТ}}$ — КПД машины постоянного тока в зависимости от степени ее загрузки (рис. 2.3).

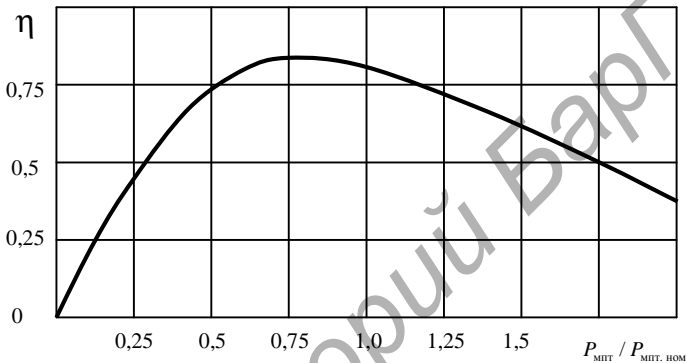


Рисунок 2.3 — Зависимость КПД машины постоянного тока от степени ее загрузки

- полезную мощность асинхронного двигателя (Вт)

$$P_2 = \frac{M_2 n}{9,55};$$

- коэффициент полезного действия асинхронного двигателя (%)

$$h = \frac{P_2}{P_1} 100.$$

11. По опытным данным постройте рабочие характеристики асинхронного двигателя: $(I_1, P_1, n, s, \cos \varphi, M, \eta) = f(P_2)$.

2.4 Основные теоретические сведения

Существует два метода получения данных для построения рабочих характеристик асинхронных двигателей: метод непосредственной нагрузки и косвенный метод.

Метод непосредственной нагрузки применим для двигателей мощностью не более 10...15 кВт и заключается в опытном исследовании двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до режима номинальной нагрузки с измерением необходимых параметров.

Косвенный метод более универсальный, его применение не ограничивается мощностью двигателя. Метод заключается в выполнении опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Опыт холостого хода дает возможность определить возникающие при холостом ходе потери и механические свойства асинхронного двигателя при питании от источника регулируемого напряжения. При этом вал двигателя должен быть свободным от механической нагрузки.

Для получения характеристики холостого хода производят несколько измерений при $n = \text{const}$, $f = \text{const}$ и $U_1 = (0,3 \dots 1,2) U_{\text{ном}}$. В результате получают зависимости P_0 , I_0 , $\cos\phi_0$ от напряжения питания двигателя U_1 .

Наиболее важной частью характеристики холостого хода является кривая насыщения (намагничивания) — зависимость между током намагничивания I_0 и ЭДС $E_0 = U_0$ (падением напряжения на внутреннем активном и индуктивном сопротивлениях за счет малой величины тока холостого хода можно пренебречь, ошибка не превышает 1%). Знание кривой намагничивания очень важно, особенно при проектировании двигателей. Вначале, с увеличением тока возбуждения (тока холостого хода), напряжение растет прямолинейно, затем рост его замедляется и практически приближается к предельному значению (насыщение). Для полного использования свойств стали ЭДС двигателя E_0 и поток Φ должны по возможности иметь высокие значения, в то же время необходимо избегать слишком больших потерь энергии на возбуждение.

Для полной оценки асинхронного двигателя необходимо определение потерь холостого хода — механических потерь $P_{\text{мех}}$, потерь в стали $P_{\text{ст}}$ и потерь в обмотке статора $P_{1\text{эл}}$. Так как значения электрических потерь в статорных обмотках $P_{1\text{эл}}$ незначительны по сравнению с $P_{\text{мех}}$ и $P_{\text{ст}}$, то ими часто пренебрегают.

Опыт короткого замыкания проводится по такой же схеме, как и опыт холостого хода, но при жестко зафиксированном роторе, и жела-

тельно с соединением обмоток статора звездой. В результате получают зависимость тока статора I_k , потребляемой мощности P_k и коэффициента мощности $\cos \varphi_k$ от напряжения питания U_k .

Предельное значение тока статора I_k устанавливают исходя из допустимой токовой нагрузки питающей сети, а также допустимой температуры нагрева статорных обмоток двигателя. Для двигателей мощностью до 1 кВт возможно проведение опыта, начиная с номинального напряжения $U_k = U_{ном}$. В этом случае предельный ток $I_k = (5 \dots 7) I_{ном}$.

Так как характеристика короткого замыкания воспроизводит начальные пусковые условия асинхронного двигателя и позволяет определить пусковой момент двигателя $M_{п}$, кратность пускового момента k_m и кратность пускового тока k_I определяются соответственно по формулам:

$$k_m = M_{п} / M_{ном};$$
$$k_I = I_{п} / I_{ном}.$$

Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором — это зависимости величин P_1 , I_1 , S , $\cos \varphi$ и η от полезной мощности P_2 при условии постоянных значений приложенного напряжения $U_1 = \text{const}$ и частоты $f_1 = \text{const}$.

Для анализа рабочих характеристик двигателя большое значение имеет вид полученных зависимостей. Например, график тока $I_1 = f(U_1)$ не выходит из начала координат, так как в режиме холостого хода двигатель потребляет из сети ток, обусловленный потерями на холостом ходу.

Характеристика частоты вращения ротора $n = f(U_1)$ имеет падающий вид, т. е. с ростом нагрузки частота вращения ротора уменьшается из-за роста скольжения s , и чем больше активное сопротивление обмотки ротора, тем больше наклон этой характеристики к оси абсцисс.

Небольшое значение коэффициента мощности $\cos \varphi$ в зоне малых нагрузок двигателя объясняется тем, что в режиме холостого хода и при небольшой нагрузке на валу ток статора меньше номинального и является, главным образом, намагничивающим током, фазовый сдвиг которого относительно напряжения сети близок к 90° .

Значительная величина намагничивающего тока в асинхронном двигателе обусловлена наличием воздушного зазора между статором и ротором. С ростом нагрузки двигателя ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, увеличивается в основном за счет активной составляющей, что и способствует росту коэффициента мощности $\cos \varphi$.

2.5 Контрольные вопросы

1. Какие характеристики асинхронного двигателя называются рабочими?
2. Почему относительная величина тока холостого хода у асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора такой же мощности?
3. Как изменится электромагнитный момент асинхронного двигателя, если питающее напряжение уменьшить в три раза?
4. Что такое перегрузочная способность асинхронного двигателя, и как ее определить по круговой диаграмме?
5. Почему без нагрузки асинхронный двигатель работает с малыми значениями КПД и коэффициента мощности?
6. Какие виды потерь имеют место в асинхронном двигателе?
7. Почему магнитные потери в сердечнике ротора не учитывают?
8. На какие виды потерь влияют величина воздушного зазора и толщина пластин сердечника статора?
9. Почему график $I_1 = f(P_2)$ не выходит из начала координат?
10. При каких условиях высшие гармоники поля создают в асинхронном двигателе двигательный, генераторный и тормозной режимы?
11. Какими причинами вызван «провал» в механической характеристике?
12. При каких условиях может происходить «прилипание» ротора к статору?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Цель работы:

- изучить конструкцию трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором;
- освоить приемы снятия характеристик холостого хода и рабочих характеристик;
- снять и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя при номинальном напряжении, частоте сети и разных значениях сопротивления пускового реостата.

3.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы

1. Изучите необходимые разделы в рекомендуемой литературе, а также теоретические сведения, приведенные в подразделе 3.4.
2. Вычертите схему лабораторной установки.
3. Запишите паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
4. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений.

3.2 Объект и средства исследования

Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины». Объектом исследования является трехфазный асинхронный электродвигатель с фазным ротором М1 типа МТН011-6У1 с номинальными параметрами: схема соединения обмоток статора — Δ/Y ; номинальное напряжение $U_{ном} = 220/380$ В; номинальная сила тока $I_{ном} = 8,5/4,9$ А; номинальная мощность $P_{ном} = 1,4$ кВт; номинальная частота вращения $n_{ном} = 890$ об / мин; номинальное напряжение ротора 114 В; номинальный ток ротора 8,8 А; номинальный режим работы S3 при повторности нагрузки 40%.

Средствами исследования служат:

- 1) инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощность 1,5 кВт; номинальный ток 7 А; диапазон задания линейного напряжения 0...220 В с дискретностью 1 В; диапазон задания частоты тока 0...163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

2) машина постоянного тока МЗ типа 2ПН90ЛУХЛ4, предназначенная для создания механической нагрузки на валу двигателя М1, с номинальными параметрами: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 0,55$ кВт; номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ В; номинальная сила тока $I_{\text{ном}} = 3,32$ А при частоте вращения $n_{\text{ном}} = 1\,500$ об / мин;

3) широтно-импульсные преобразователи ШИП1 и ШИП2, в состав которых входят: интеллектуальный силовой модуль Mitsubishi ASIPM PS11035, полевой транзистор IRF840 (для питания обмотки возбуждения ДПТ), микроконтроллер ATmega16, шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J;

4) цифровые измерительные приборы, входящие в состав стенда, с номинальным напряжением 500 В и номинальными током 5 А.

3.3 Порядок выполнения работы

1. Пользуясь схемой (рис. 3.1 и 3.2), изучите расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда.

2. Все переключатели стенда установите в положение «ВЫКЛЮЧЕНО», регулировочные рукоятки переведите в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

3. Соберите электрическую цепь (см. рис. 3.1) с помощью соединительных проводников и произведите настройку стенда: переключатель SA27 установите в положение «НЕЗАВИСИМОЕ УПРАВЛЕНИЕ», переключатель «PV1/PW1» — в положение «PV1», переключатель «PV2/PW2» — в положение «PW2», переключатель «PV3/φ» — в положение «PV3».

4. После разрешения преподавателя автоматическими выключателями «СЕТЬ» подключите стенд к сети. Включите питание цепи управления выключателем SA1.

5. Регулятором «ЗАДАНИЕ ЧАСТОТЫ» инвертора установите частоту тока $f = 50$ Гц, контролируя ее по прибору HZ1. Регулятором «ЗАДАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ» инвертора установите напряжение $U_1 = 0$ В (контролировать по вольтметру PV4). Кнопкой SB1 подключите исследуемый двигатель к выходу инвертора.

6. Регулятором «ЗАДАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ» плавно увеличьте напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения $U_1 = 220$ В. Прогрейте асинхронный двигатель в течение 15 мин.

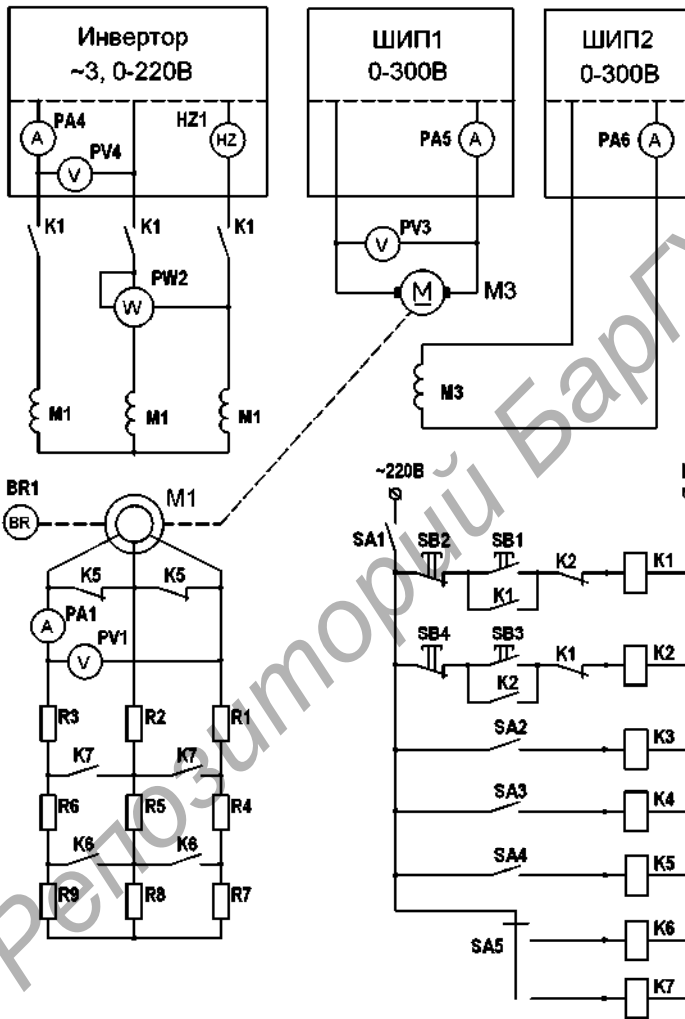


Рисунок 3.1 — Электрическая схема опыта по исследованию асинхронного электродвигателя с фазным ротором

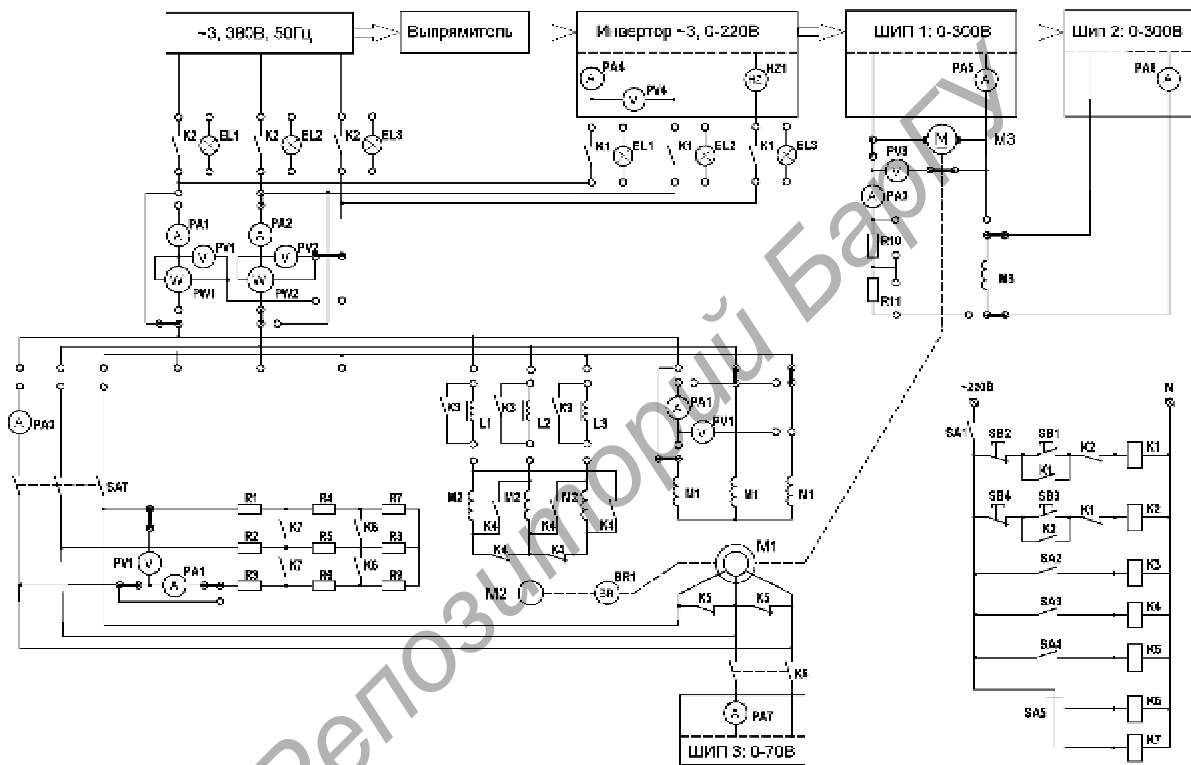


Рисунок 3.2 — Схема подключения асинхронного электродвигателя с фазным ротором на панели стенда

7. Для создания механической нагрузки на валу исследуемого двигателя нужно подключить к сети вспомогательную машину постоянно-го тока МЗ в генераторном режиме:

- а) установите выключатель ШИП2 в положение «ВКЛЮЧЕНО»;
- б) регулятором RP3 «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП2 установите номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ $I_b = 3,3$ А, контролируя его по амперметру РА6;
- в) установите режим работы ШИП1: «ОТКЛЮЧИТЬ ЗАМКНУТУЮ СУ», «ЗАДАНИЕ ТОКА» и «ГЕНЕРАТОРНЫЙ РЕЖИМ»;
- г) регулятором «ЗАДАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ» ШИП1 плавно увеличьте напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения $U_{ном} = 220$ В и поддерживайте его постоянным в течение всего опыта (контролировать по вольтметру PV4);
- д) тумблером включите ШИП1.

8. Для каждой ступени пускового реостата R1...R9 (переключаются SA5) снимите показания приборов при напряжении $U_{ном}$ в трех повторностях, изменяя ток в цепи якоря машины МЗ регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП1. Результаты опыта запишите в таблицу 3.1.

9. Завершив эксперимент, необходимо:

- а) регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля и выключить ШИП1;
- б) регулятором «ЗАДАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ» инвертора уменьшить напряжение до нуля и кнопкой SB2 отключить исследуемый двигатель;
- в) регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ равное нулю и затем выключить ШИП2 переключателем SA25;
- г) выключателем SA1 отключить питание цепи управления и автоматическим выключателем «СЕТЬ» отключить питание стенда от сети.

10. По результатам измерений определите следующие величины:

- частоту вращения ротора (об / мин)

$$n_2 = \frac{30 \cdot \omega}{\pi},$$

где ω — угловая скорость ротора (рад / с);

- активную мощность, потребляемую двигателем (Вт)

$$P_1 = P' \sqrt{3};$$

- скольжение двигателя

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100 ;$$

- коэффициент мощности двигателя

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3}U_1 I_1} .$$

- мощность и момент на валу двигателя — по соответствующим параметрам машины постоянного тока М2 (Вт):

$$P_2 = P_{\text{МПТ}} = U_{\text{я}} I_{\text{я}} \eta_{\text{МПТ}},$$

где $U_{\text{я}}$ и $I_{\text{я}}$ — соответственно напряжение и ток якоря машины постоянного тока;

$\eta_{\text{МПТ}}$ — КПД машины постоянного тока, зависящий от степени ее загрузки (рис. 3.3);

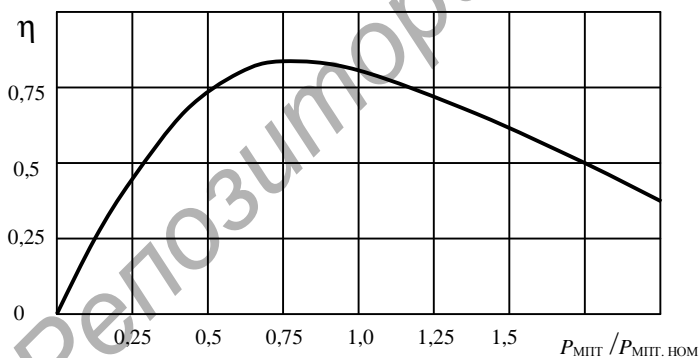


Рисунок 3.3 — Зависимость КПД машины постоянного тока от степени ее загрузки

- крутящий момент M на валу исследуемого двигателя (Н · м)

$$M_2 = \frac{9,55 P_2}{n_2} ;$$

- коэффициент полезного действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (%)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100.$$

11. По опытным данным постройте в одной системе координат рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: $(I_{1\phi}, P_1, n_2, s, \cos \varphi, M, \eta) = f(P_2)$.

3.4 Основные теоретические сведения

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны по сравнению с короткозамкнутыми двигателями, но они обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами.

Асинхронный двигатель с фазным ротором (рис. 3.4) конструктивно отличается от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, главным образом устройством ротора.

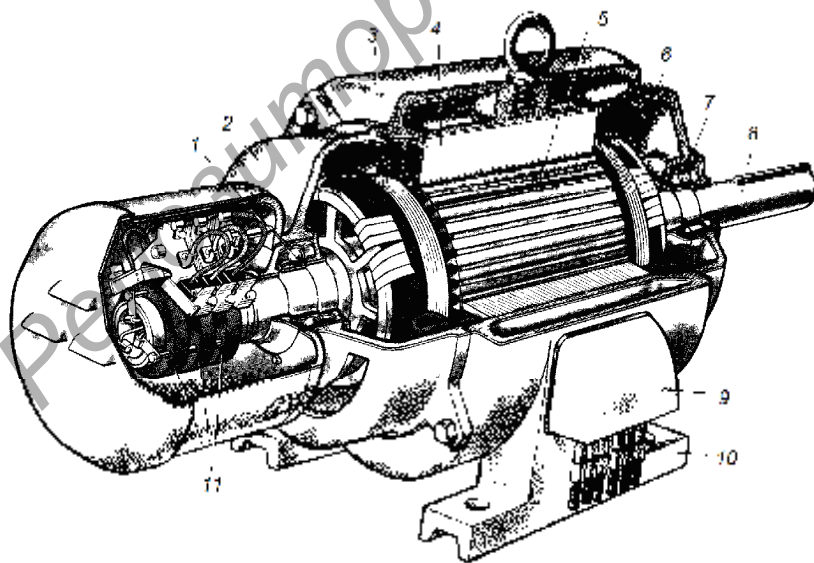


Рисунок 3.4 — Устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором

Статор двигателя состоит из корпуса 3 и сердечника 4 с трехфазной обмоткой. Сердечник собран в пакет из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, покрытых слоем изоляционного лака и скрепленных специальными скобами или продольными сварными швами по наружной поверхности. Такая конструкция сердечника способствует значительному уменьшению вихревых токов, возникающих в процессе его перемагничивания вращающимся магнитным полем.

На внутренней поверхности сердечника статора имеются продольные пазы, в которых расположены пазовые части обмотки статора и лобовые части, находящиеся за пределами сердечника по его торцовым сторонам.

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет подшипниковые щиты 2 и 6 с подшипниками качения 1 и 7. К корпусу 3 прикреплены лапы 10 и коробка выводов 9.

В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя — ротор, состоящий из вала 8 и сердечника 5. По сравнению с короткозамкнутым, фазный ротор имеет более сложную конструкцию. На валу 8 закреплен шихтованный сердечник 5 с трехфазной обмоткой, выполненной аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют звездой, а ее концы присоединяют к трем контактными кольцам 11, расположенным на валу и изолированным друг от друга и от вала. Для осуществления электрического контакта с обмоткой вращающегося ротора к каждому контактному кольцу прижимаются две щетки, закрепленные в щеткодержателях. Каждый щеткодержатель снабжен пружинами, обеспечивающими прижатие щеток к контактному кольцу.

На корпусе асинхронного двигателя прикреплена табличка, на которой указаны тип двигателя, завод-изготовитель, год выпуска и номинальные данные (полезная мощность, напряжение, ток, коэффициент мощности, частота вращения и КПД).

Охлаждение двигателя осуществляется методом обдува наружной поверхности корпуса. Поток воздуха создается центробежным вентилятором.

Монтаж двигателя в месте его установки осуществляется либо посредством лап 10, либо посредством фланца. В результате на подшипниковом щите со стороны выступающего конца вала делают фланец с отверстиями для крепления двигателя к рабочей машине.

Для предохранения обслуживающего персонала от возможного поражения электрическим током двигателя снабжаются болтами заземления (не менее двух).

Пуск двигателя с фазным ротором. В процессе пуска ступени пускового реостата переключают таким образом, чтобы ток ротора оставался приблизительно неизменным, а среднее значение пускового момента было близко к наибольшему $M_{п. макс.}$.

Пусковой реостат имеет несколько ступеней пусковых сопротивлений, что позволяет в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление, поддерживая высокое значение момента на валу двигателя. Выключение отдельных ступеней пускового реостата в процессе разгона двигателя может осуществляться вручную или автоматически, а также в функции времени или тока двигателя.

Сначала двигатель включается в работу по характеристике 4 (рис. 3.5), соответствующей максимальному сопротивлению пускового реостата $R_1 + R_4 + R_7$, $R_2 + R_5 + R_8$ и $R_3 + R_6 + R_9$ и развивает вращающий момент $M_{п. макс.}$. По мере увеличения частоты вращения ротора вращающий момент M уменьшается и может стать меньше некоторого момента $M_{п. мин.}$. Поэтому при $M = M_{п. мин.}$ часть пускового реостата $R_7 \dots R_9$ выключается контактами К6 при помощи переключателя SA5. Вращающий момент при этом мгновенно возрастает до значения $M_{п. макс.}$, а затем с увеличением частоты вращения изменяется по характеристике 3, соответствующей сопротивлению реостата $R_1 + R_4$, $R_2 + R_5$ и $R_3 + R_6$.

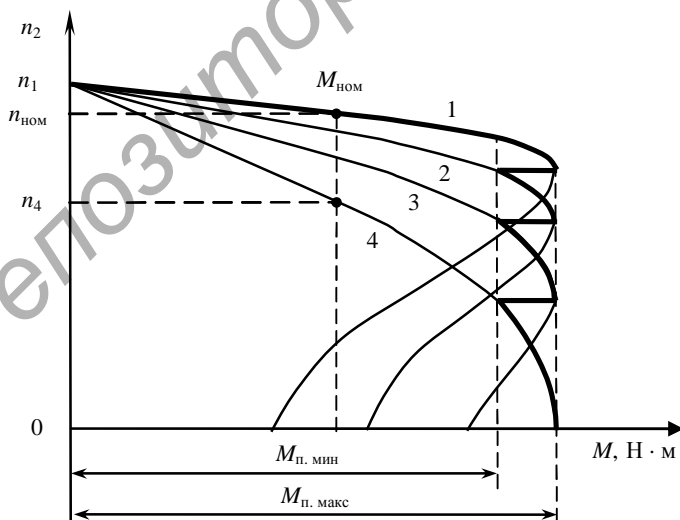


Рисунок 3.5 — Механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором при различных значениях сопротивления пускового реостата

При дальнейшем уменьшении момента M до $M_{п. мин}$ часть реостата R4...R6 снова выключается контактами K7 и двигатель переходит на работу по характеристике 2, соответствующей сопротивлению ступени R1...R3.

Таким образом, при ступенчатом уменьшении сопротивления пускового реостата вращающий момент двигателя изменяется от $M_{п. макс}$ до $M_{п. мин}$, а частота вращения возрастает по ломаной кривой (жирная линия на рисунке 3.5).

По мере разгона двигателя сопротивление пускового реостата уменьшают, переходя с одной его ступени на другую. В конце пуска пусковой реостат полностью выводят переключателем SA7, обмотка ротора замыкается накоротко, а двигатель переходит на естественную механическую характеристику I . Отключение ступеней реостата может осуществляться как вручную, так и автоматически с помощью контактов магнитного пускателя.

Ступени пускового сопротивления рассчитываются так, чтобы при переключениях вращающий момент двигателя менялся в выбранных пределах от $M_{п. макс}$ до $M_{п. мин}$.

Пусковые реостаты состоят из кожуха, рычага с переключающим устройством и ступеней сопротивлений, выполненных из металлической проволоки или ленты, намотанной в виде спирали. Пусковые реостаты рассчитаны на кратковременное протекание тока, а поэтому рычаг пускового реостата нельзя долго задерживать на промежуточных ступенях, так как сопротивления реостата могут перегореть. В то же время при слишком быстром переключении ступеней реостата пусковой ток двигателя может достигнуть недопустимо больших значений.

Рабочая характеристика асинхронного электродвигателя — это зависимость потребляемой из сети активной мощности P_1 , тока статора I_1 , скольжения s , коэффициента мощности $\cos \varphi$, КПД η от полезной мощности на валу P_2 при условии неизменного приложенного напряжения и его частоты. Снятие рабочей характеристики производят при нагретых до рабочей температуры обмоток статора и ротора.

При пуске двигателя с фазным ротором в цепь ротора включается добавочное активное сопротивление — пусковой реостат, который обычно имеет несколько ступеней и рассчитывается на кратковременное протекание тока. Это позволяет уменьшить пусковой ток $I_{п}$ при одновременном увеличении пускового момента $M_{п}$.

Активное сопротивление цепи ротора R'_2 определяется выражением:

$$R'_2 = r'_2 + r_p,$$

где r'_2 — приведенное активное сопротивление ротора;

r_p — сопротивление пускового реостата, приведенное к обмотке статора.

Влияние возросшего значения активного сопротивления R'_2 на пусковой момент двигателя $M_{\text{п}}$ следует из формулы:

$$M_{\text{п}} = \frac{3pU_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(r_1 + R'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2]},$$

где p — число пар полюсов обмотки статора;

r_1 и x_1 — соответственно активное и реактивное сопротивление обмотки статора;

x'_2 — приведенное реактивное сопротивление ротора.

Это влияние графически показано на рисунке 3.6, из которого видно, что при отсутствии пускового реостата, т. е. при активном сопротивлении цепи ротора $R'_2 = r'_2$, пусковой момент $M_{\text{п}}$ равен начальному моменту $M_{\text{п}}^0$.

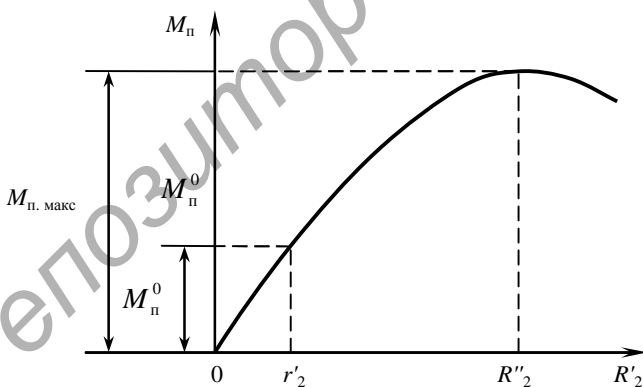


Рисунок 3.6 — Зависимость пускового момента от активного сопротивления цепи ротора

При введении в цепь ротора добавочного активного сопротивления r_p приведенное сопротивление ротора $R'_2 = r'_2 + r_p$, тогда пусковой момент возрастает и при значении $R''_2 = r'_2 + r_p = x_1 + x'_2$ достигает наибольшего значения $M_{\text{п. макс}}$. При $R'_2 > x_1 + x'_2$ пусковой момент уменьшается.

При выборе сопротивления пускового реостата r_p исходят из условий пуска двигателя:

– если двигатель включают при значительном нагрузочном моменте на валу, сопротивление пускового реостата r_p выбирают таким, чтобы обеспечить наибольший пусковой момент (см. рис. 3.5);

– если двигатель включают на холостом ходу или при небольшом нагрузочном моменте на валу, то значение сопротивления пускового реостата r_p целесообразно выбирать несколько большим наибольшего пускового момента, что соответствует условию $R'_2 > x_1 + x'_2$. В этом случае пусковой момент не достигает наибольшего значения, но зато пусковой ток значительно уменьшается.

В асинхронных двигателях с фазным ротором обеспечивается наиболее благоприятное соотношение между пусковым моментом и пусковым током: большой пусковой момент при небольшом пусковом токе (в 2-3 раза больше номинального). Недостатками пусковых свойств двигателя с фазным ротором являются сложность, продолжительность и неэкономичность пусковой операции.

3.5 Контрольные вопросы

1. Объясните устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.

2. Объясните принцип действия асинхронного двигателя с фазным ротором.

3. Чем отличается конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором от асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?

4. Объясните порядок действий при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором.

5. Каким образом снимаются рабочие характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором?

6. Что называется перегрузочной способностью асинхронного двигателя?

7. Почему с увеличением нагрузки на валу асинхронного двигателя с фазным ротором возрастает потребляемая из сети мощность?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы:

- изучить устройство синхронного генератора;
- экспериментально определить основные характеристики синхронного генератора.

4.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы

1. Изучите необходимые разделы в рекомендуемой литературе, а также теоретические сведения, приведенные в подразделе 4.4.
2. Вычертите схему лабораторной установки (рис. 4.1 и 4.3).
3. Запишите паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
4. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений.

4.2 Объект и средства исследования

Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины». Объектом исследования является синхронный генератор (машина М1), в качестве которого используется трехфазный асинхронный электродвигатель с фазным ротором типа МТН011-6У1. Номинальные параметры электродвигателя: схема соединения обмоток статора — Δ/Y ; номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220/380$ В; номинальная сила тока $I_{\text{ном}} = 8,5/4,9$ А; номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 1,4$ кВт; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 890$ об / мин; номинальное напряжение ротора 114 В; номинальный ток ротора 8,8 А, номинальный режим работы S3 при повторности нагрузки 40%.

Средствами исследования служат:

1) инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощность 1,5 кВт; номинальный ток 7 А; диапазон задания линейного напряжения 0...220 В с дискретностью 1 В; диапазон задания частоты тока 0...163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

2) широтно-импульсные преобразователи ШИП1, ШИП2 и ШИП3, в состав которых входят: интеллектуальный силовой модуль Mitsubishi

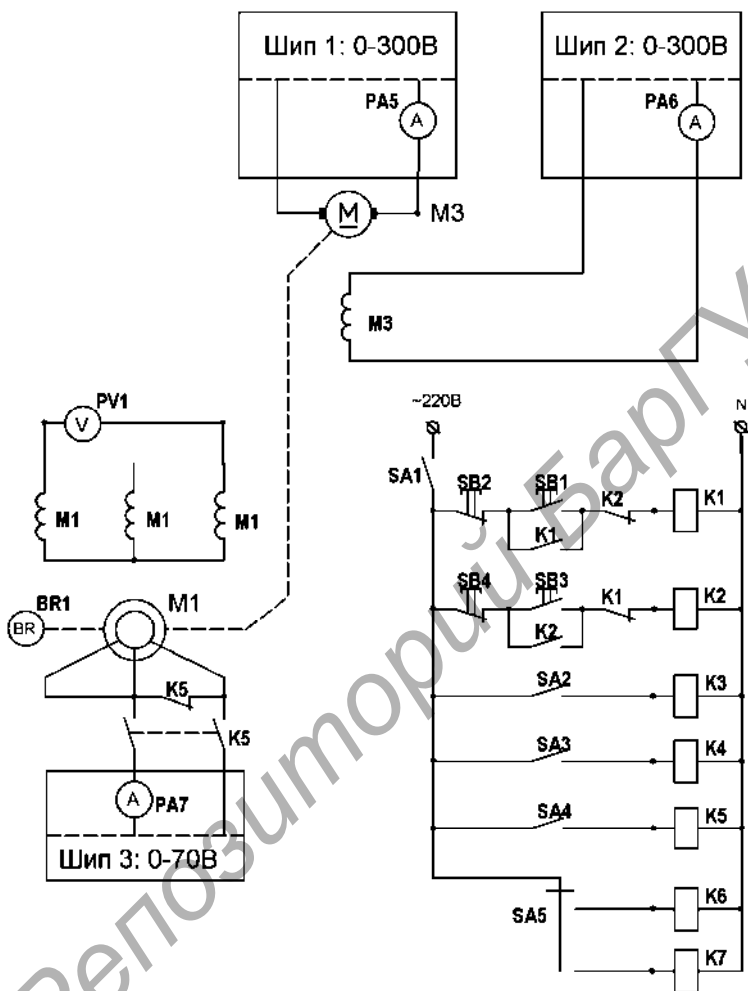


Рисунок 4.1 — Схема опыта холостого хода синхронного генератора

ASIPM PS11035, полевой транзистор IRF840 (для питания обмотки возбуждения ДПТ), микроконтроллер ATmega16, шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J;

3) машина постоянного тока типа 2ПН90ЛУХЛ4, предназначенная для привода генератора, с номинальными параметрами: номинальная мощность $P_{м.ном} = 0,55$ кВт; номинальное напряжение $U_{м.ном} = 220$ В; номинальная сила тока $I_{м.ном} = 3,32$ А; номинальная частота вращения $n_{м.ном} = 1\ 500$ об / мин.

4) цифровые измерительные приборы, входящие в состав стенда, с номинальным напряжением 500 В и номинальным током 5 А.

4.3 Порядок выполнения работы

Получение характеристики холостого хода генератора

1. Пользуясь схемой (см. рис. 4.1 и 4.2), изучите расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда.

2. Все переключатели стенда установите в положение «ВЫКЛЮЧЕНО», регулировочные рукоятки переведите в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

3. Соберите электрическую цепь (см. рис. 4.1) с помощью соединительных проводников.

4. Включите автоматический выключатель «СЕТЬ» и выключатель SA1.

5. Переключателем SA4 подключите обмотку возбуждения машины M1 к источнику постоянного тока (ШИПЗ). Регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИПЗ установите значение тока возбуждения $I_b = 0$ (контролировать по прибору PA7).

6. Включите ШИП2 и установите регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ток 0,4 А в обмотке возбуждения машины M3 (контролировать по прибору PA6).

7. Установите режимы работы ШИП1 «ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» и «ВКЛЮЧИТЬ ЗАМКНУТУЮ СУ», затем включите ШИП1. Регулятором «ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» ШИП1 установите синхронную скорость вращения ротора машины M1 $\omega = 104$ рад / с (контролировать по прибору BR1);

8. Регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИПЗ увеличивайте ток возбуждения машины M1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = 1,3U_{ном}$ (контролировать по прибору PV1), а затем постепенно уменьшайте ток возбуждения машины M1 до нуля (контролировать по прибору PA7).

9. Измерьте ЭДС синхронного генератора (машины M1) при пяти значениях тока возбуждения I_b (при намагничивании и размагничивании). Результаты измерений запишите в таблицу 4.1.

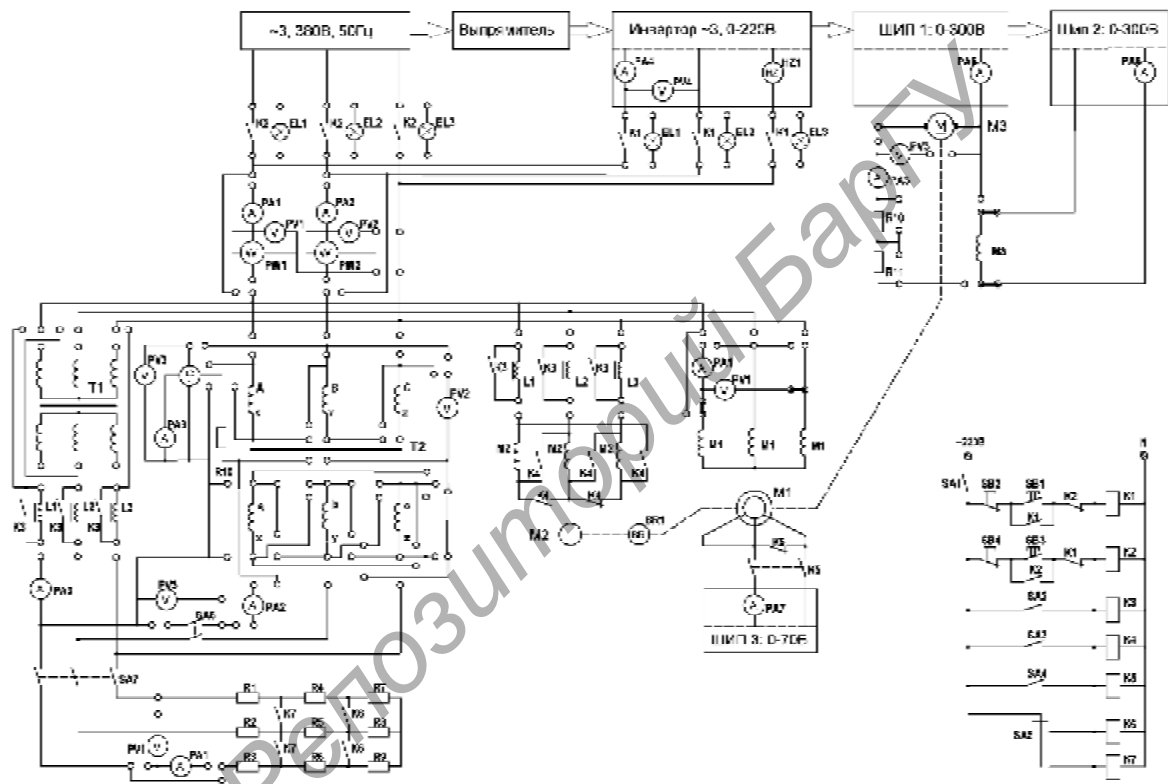


Рисунок 4.2 — Схема подключения синхронного генератора на панели стенда для проведения опыта холостого хода

Т а б л и ц а 4.1 — Результаты опыта холостого хода

№ п/п	Намагничивание		Размагничивание	
	I_b , А	E_0 , В	I_b , А	E_0 , В
1				
2				
3				
4				
5				

Внимание! При снятии данных восходящей ветви характеристики холостого хода необходимо, чтобы изменение тока возбуждения происходило только в направлении нарастания, при снятии данных нисходящей ветви — только в направлении убывания.

10. Завершив эксперимент, необходимо:

- 1) регулятором «ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» ШИП1 уменьшить до нуля скорость вращения ротора машины М1 (контролировать по прибору BR1), затем выключить ШИП1;
- 2) установить регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ток в обмотке возбуждения машины М3 равный нулю (контролировать по прибору PA6), затем выключить ШИП2;
- 3) выключить выключатели SA1 и «СЕТЬ».

11. По результатам измерений и вычислений постройте характеристику холостого хода $E_0 = f(I_b)$. Показания приборов при увеличении тока возбуждения I_b (при намагничивании) соответствуют восходящей ветви характеристики холостого хода, а при уменьшении тока возбуждения (при размагничивании) — нисходящей ветви. За характеристику холостого хода принимают среднюю линию, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями характеристики.

Получение внешних характеристик синхронного генератора

1. Соберите схему, представленную на рисунке 4.3, в соответствии с расположением элементов на панели стенда (рис. 4.4).

2. Включите автоматический выключатель «СЕТЬ» и выключатель SA1.

3. Установите переключатель SA4 в положение «ВКЛЮЧЕНО» и подключите обмотку возбуждения машины М1 к источнику постоянного тока (ШИП3). Регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП3 установите значение тока возбуждения $I_b = 0$ (контролировать по прибору PA7).

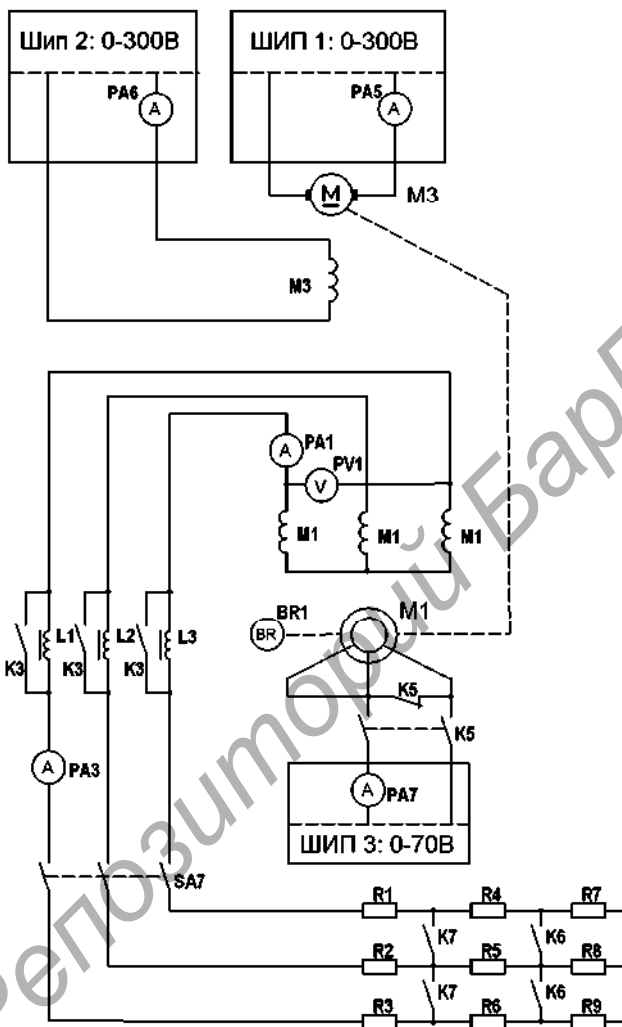


Рисунок 4.3 — Электрическая схема опыта по определению внешних и регулировочных характеристик синхронного генератора

4. Включите ШИП2 и установите регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ток 0,4 А в обмотке возбуждения машины М3 (контролировать по прибору РА6).

5. Установите режим работы ШИП1 «ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» и «ВКЛЮЧИТЬ ЗАМКНУТУЮ СУ», затем включите ШИП1. Регулятором

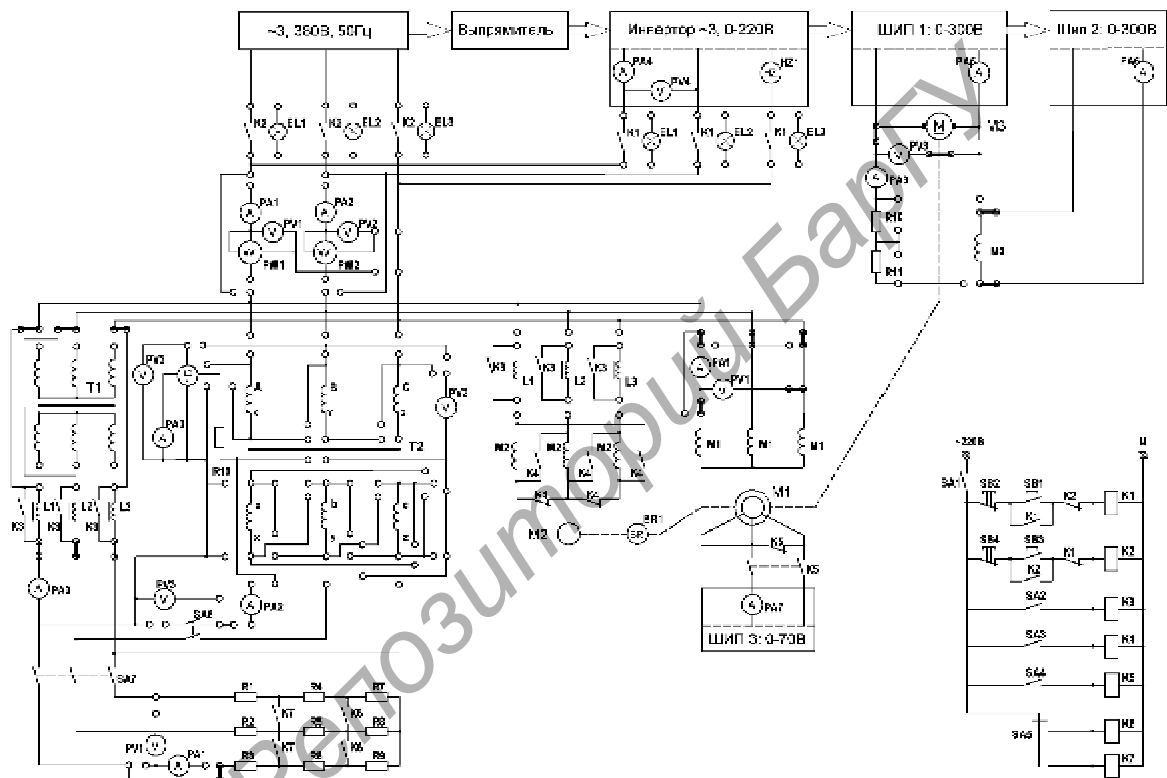


Рисунок 4.4 — Схема подключения на панели стенда для определения внешней и регулировочной характеристик синхронного генератора

«ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» ШИП1 установите синхронную скорость вращения ротора машины М1 $\omega = 104$ рад / с (контролировать по прибору BR1).

6. Регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП3 увеличьте значение тока возбуждения машины М1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = U_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору PV1).

7. Переключателем SA2 зашунтируйте катушки L1...L3. Переключателем SA5 измените активное сопротивление нагрузки и измерьте ток (контролировать по прибору PA1) и напряжение генератора (контролировать по прибору PV1). Результаты измерений запишите в таблицу 4.2.

8. Переключателем SA2 отключите шунтирование катушек L1...L3. Переключателем SA5 измените величину активно-индуктивной нагрузки и измерьте ток (контролировать по прибору PA1) и напряжение генератора (контролировать по прибору PV1). Результаты измерений запишите в таблицу 4.2.

9. Завершив эксперимент, необходимо:

а) регулятором «ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины М1 равную нулю (контролировать по прибору BR1), затем выключить ШИП1;

б) регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» установить ток возбуждения машины М3 равный нулю (контролировать по прибору PA6), затем выключить ШИП2;

в) выключить выключатели SA1 и «СЕТЬ».

10. По результатам измерений постройте внешние характеристики синхронного генератора $U = f(I_B)$. По внешним характеристикам определите номинальное изменение напряжения синхронного генератора в процентах по формуле

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100,$$

где E_0 — ЭДС холостого хода генератора при токе возбуждения I_B (определяется по характеристике холостого хода).

Т а б л и ц а 4.2 — Результаты опыта по определению внешних характеристик синхронного генератора

№ п/п	Включенные ступени реостата	Активная		Активно-индуктивная	
		I_1, A	U_1, B	I_1, A	U_1, B
1	R1...R9				
2	R1...R6				
3	R1...R3				

Получение регулировочных характеристик генератора

1. Включите автоматический выключатель «СЕТЬ» и выключатель SA1.
2. Переключателем SA4 подключите обмотку возбуждения машины M1 к источнику постоянного тока (ШИПЗ). Регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИПЗ установите ток возбуждения $I_B = 0$ (контролировать по прибору PA7).
3. Включите ШИП2 и установите регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ток 0,4 А в обмотке возбуждения машины M3 (контролировать по прибору PA6).
4. Установите режим работы ШИП1 «ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» и «ВКЛЮЧИТЬ ЗАМКНУТУЮ СУ», затем включите ШИП1. Регулятором «ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» ШИП1 установите синхронную скорость вращения $\omega = 104$ рад / с ротора машины M1 (контролировать по прибору BR1).
5. Регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИПЗ увеличьте значение тока возбуждения машины M1 до значения, при котором ЭДС холостого хода $E_0 = U_{ном}$ (контролировать по прибору PV1).
6. Переключателем SA2 зашунтируйте катушки L1...L3. Переключателем SA5 измените величину активной нагрузки машины M1, при этом регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИПЗ измените значение тока возбуждения машины M1 так, чтобы напряжение на выходе генератора в течение опыта оставалось неизменным и равным номинальному $U_1 = U_{ном}$ (контролировать по прибору PV1). Измерьте ток нагрузки I_H по прибору PA1 и ток возбуждения синхронного генератора I_B по прибору PA7. Результаты измерений запишите в таблицу 4.3.
7. Переключателем SA2 отключите шунтирование катушек L1...L3. Переключателем SA5 измените величину активно-индуктивной нагрузки машины M1, при этом регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИПЗ измените значение тока возбуждения машины M1 так, чтобы напряжение на выходе генератора в течение опыта оставалось неизменным и равным номинальному $U_1 = U_{ном}$ (контролировать по прибору PV1). Измерьте ток нагрузки I_H по прибору PA1 и ток возбуждения синхронного генератора I_B по прибору PA7. Результаты измерений запишите в таблицу 4.3.

Т а б л и ц а 4.3 — Регулировочные характеристики генератора

№ п/п	Включенная ступень реостата	Активная		Активно-индуктивная	
		I_1 , А	I_B , А	I_1 , А	I_B , А
1	R1...R9				
2	R1...R6				
3	R1...R3				

8. Завершив эксперимент, необходимо:

- 1) регулятором «ЗАДАНИЕ СКОРОСТИ» ШИП1 установить скорость вращения ротора машины М1 равную нулю (контролировать по прибору ВР1), затем выключить ШИП1;
- 2) регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» установить ток в обмотке возбуждения машины М3 равный нулю (контролировать по прибору РА6), затем выключить ШИП2;
- 3) выключить выключатели SA1 и «СЕТЬ».

9. По результатам измерений постройте регулировочные характеристики $I_B = f(I_N)$. По регулировочным характеристикам определите номинальное изменение тока возбуждения в процентах по формуле

$$\Delta I_{B, \text{НОМ}} = \frac{I_{B, \text{НОМ}} - I_B^0}{I_B^0} 100,$$

где $I_{B, \text{НОМ}}$ и I_B^0 — значения токов возбуждения, соответствующие номинальному напряжению генератора $U_{\text{НОМ}}$ при номинальной нагрузке, а также в режиме холостого хода.

4.4 Основные теоретические сведения

Синхронная машина (рис. 4.5) представляет собой машину переменного тока, которая по своему устройству отличается от асинхронных машин только конструкцией ротора, который может быть явнополюсным или неявнополюсным. Важным отличием является то, что скорость вращения ротора синхронной машины равна скорости вращения магнитного поля статора при любой нагрузке ($n_2 = n_1 = \text{const}$), а также возможностью регулирования коэффициента мощности.

Синхронные машины обратимы и могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Синхронные генераторы составляют основу электротехнического оборудования электростанций, так как практически вся электроэнергия вырабатывается синхронными генераторами. В крупных электроэнергетических установках синхронные машины иногда используются в качестве компенсаторов — генераторов реактивной мощности, позволяющих повысить коэффициент мощности всей установки.

Синхронная машина состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. Статор синхронной машины состоит из корпуса, сердечника и трехфазной обмотки, соединенной по схеме «звезда».

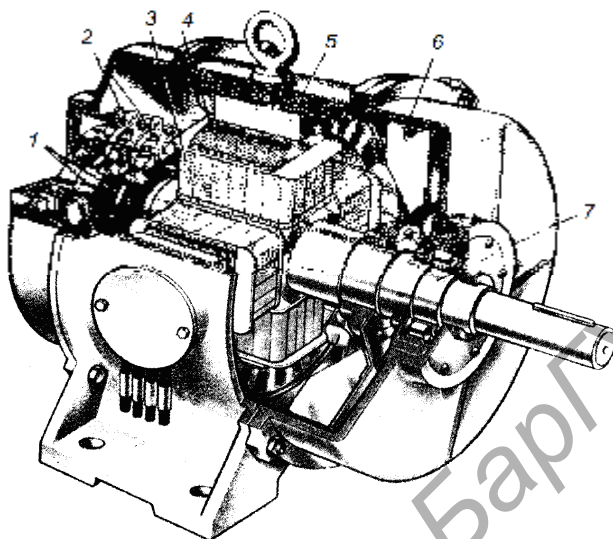


Рисунок 4.5 — Устройство синхронного генератора:

- 1 — контактные кольца; 2 — щеткодержатели;
 3 — полюсная катушка ротора; 4 — полюсный наконечник,
 5 — сердечник статора; 6 — вентилятор; 7 — вал

Роторы синхронных машин могут иметь две принципиальные различающиеся конструкции — явнополюсную и неявнополюсную.

Если первичным двигателем является гидравлическая турбина, то синхронный генератор называют гидрогенератором. Гидравлическая турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60...500 об / мин), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторе применяют ротор с большим числом полюсов. Ротор гидрогенератора имеет явнополюсную конструкцию, при которой каждый полюс выполняют в виде отдельного узла, состоящего из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки. Все полюсы ротора закреплены на обode, являющемся также и ярмом магнитной системы машины. Гидрогенераторы обычно изготавливают с вертикальным расположением вала.

Турбогенератор является быстроходной синхронной машиной, так как ее первичный двигатель — паровая турбина — работает при большой скорости вращения. Роторы этих генераторов могут быть двухполюсными ($n_1 = 3\,000$ об / мин) либо четырехполюсными ($n_1 = 1\,500$ об / мин).

При работе турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому, по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки возбуждения. Обмотка возбуждения неявнополюсного ротора занимает лишь две трети его поверхности по периметру, оставшаяся поверхность образует полюсы. Для защиты лобовых частей обмотки ротора от разрушения действием центробежных сил ротор с двух сторон прикрывают стальными бандажными кольцами (капшами), которые изготавливают обычно из немагнитной стали. Турбогенераторы и дизель-генераторы изготавливают с горизонтальным расположением вала.

Дизель-генераторы рассчитывают на частоту вращения 600...1 500 об / мин и выполняют с явнополюсным ротором. Сердечник статора, запрессованный в стальной корпус, состоит из пакетов-сегментов, собранных из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Для лучшего охлаждения двигателя пакеты разделены радиальными вентиляционными каналами шириной по 10 мм. Обмотка статора двухслойная с укороченным шагом.

Сердечники полюсов ротора крепятся к корпусу шпильками. Обмотка ротора состоит из полюсных катушек. Контактные кольца крепятся на конце вала. Подшипники скольжения установлены на подшипниковых щитах. В обшивке корпуса имеются вентиляционные окна, прикрытые жалюзи. Наружное охлаждение обеспечивается лопатками центробежного вентилятора, закрепленными на валу. На боковой поверхности корпуса расположена коробка выводов.

Между ротором и статором имеется воздушный зазор, который по оси полюса имеет минимальное значение, а на краях — максимальное. Такая форма полюсного наконечника необходима для синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

Основным способом возбуждения синхронных машин является электромагнитное возбуждение.

В современных синхронных генераторах получила применение бесконтактная система электромагнитного возбуждения, при которой синхронный генератор не имеет контактных колец на роторе. Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить ее эксплуатационную надежность и увеличить КПД.

В синхронных генераторах, в том числе гидрогенераторах, получил распространение принцип самовозбуждения, когда энергия переменного тока, необходимая для возбуждения, отбирается от обмотки статора син-

хронного генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь преобразуется в энергию постоянного тока. Принцип самовозбуждения основан на том, что первоначальное возбуждение генератора происходит за счет остаточного магнетизма магнитопровода машины, так как ротор не перемагничивается, и по его сердечнику замыкается постоянный поток возбуждения.

В синхронных машинах малой мощности находит применение принцип возбуждения постоянными магнитами, когда на роторе машины располагаются постоянные магниты. Такой способ возбуждения дает возможность избавить машину от обмотки возбуждения. В результате конструкция машины упрощается, становится более экономичной и надежной. Однако из-за дефицитности материалов для изготовления постоянных магнитов с большим запасом магнитной энергии и сложности их обработки применение возбуждения постоянными магнитами ограничивается только лишь машинами мощностью не более нескольких киловатт.

Основными характеристиками синхронного генератора, работающего на автономную нагрузку, являются характеристики: холостого хода, короткого замыкания, внешняя, регулировочная и нагрузочная.

Характеристику холостого хода снимают при постоянной номинальной скорости вращения ротора в функции тока возбуждения $E = U = f(I_B)$ (рис. 4.6). При увеличении тока возбуждения от нуля ЭДС и магнитный поток сначала изменяются по линейному закону, а затем, из-за насыщения магнитной цепи, — по нелинейному. При больших насыщениях характеристика холостого хода снова становится линейной.

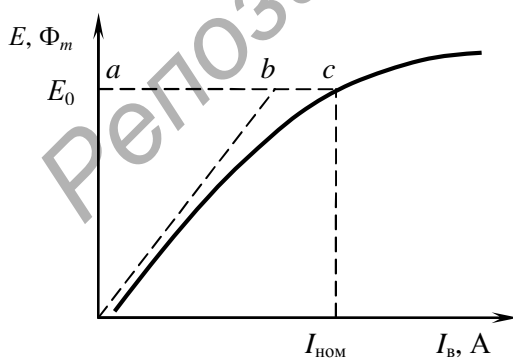


Рисунок 4.6 — Характеристика холостого хода синхронного генератора

По характеристике холостого хода определяют коэффициент насыщения:

$$k_{\text{нас}} = \frac{ac}{ab}.$$

Отрезок bc определяет МДС, приходящуюся на стальные участки магнитной системы. Если машина ненасыщенная, то характеристика холостого хода линейная. Чтобы обеспечить лучшее использование материалов, при проек-

тировании рабочая точка с выбирается на изгибе характеристики холостого хода (рис. 4.4).

При холостом ходе генератора ток в обмотке статора равен нулю. Поле в воздушном зазоре создается током возбуждения I_B , протекающим в обмотке возбуждения, и при вращении ротора в обмотке статора наводится ЭДС (В):

$$E_0 = 4,44k_B k_{об} w_1 \Phi_m f_1,$$

где k_B — коэффициент, зависящий от насыщения магнитной цепи и формы воздушного зазора;

$k_{об}$ — обмоточный коэффициент;

w_1 — число витков в обмотке фазы статора;

Φ_m — амплитуда магнитного потока, создаваемого в воздушном зазоре, Вб;

f_1 — частота тока статора, Гц.

При исследовании характеристики холостого хода сначала строят восходящую ветвь (при увеличении тока возбуждения), а затем при уменьшении — нисходящую. При расчетах используется средняя кривая.

Внешними характеристиками синхронного генератора называются зависимости $U = f(I_n)$ при $n = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$, снятые при неизменном токе возбуждения $I_B = \text{const}$ (рис. 4.7).

Если увеличить ток активной нагрузки, то напряжение на выходе генератора уменьшается вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении машины и влияния поперечной реакции статора.

При индуктивной нагрузке, за счет более сильного размагничивающего действия продольной реакции статора, внешняя характеристика идет ниже внешней характеристики при активной нагрузке.

При емкостной нагрузке реакция статора подмагничивающая, поэтому с ростом нагрузки растет напряжение на выводах генератора.

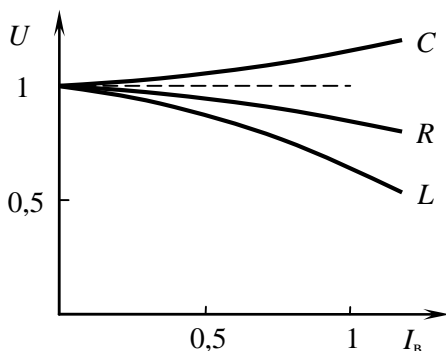


Рисунок 4.7 — Внешние характеристики синхронного генератора при разных видах нагрузки

Номинальным изменением напряжения синхронного генератора $\Delta U_{\text{ном}}$ называется изменение напряжения при изменении нагрузки от нуля до номинальной при неизменном токе возбуждения.

Номинальное изменение напряжения $\Delta U_{\text{ном}}$ определяется по формуле

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100,$$

где E_0 — ЭДС холостого хода генератора при токе возбуждения I_b (определяется по характеристике холостого хода).

Регулировочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения от тока статора $I_b = f(I_n)$ при постоянном напряжении $U = \text{const}$, постоянной скорости вращения $n = \text{const}$ и неизменном $\cos \varphi$ нагрузки.

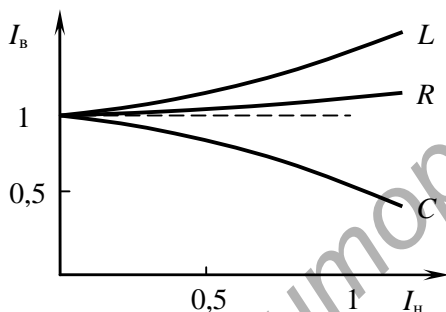


Рисунок 4.8 — Регулировочные характеристики синхронного генератора при различных видах нагрузки

Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выводах генератора оставалось постоянным (рис. 4.8).

Регулировочная характеристика может быть построена, если известна внешняя характеристика $U = f(I_n)$. При увеличении индуктивной нагрузки напряжение уменьшается. Чтобы напряжение оставалось неизменным, необходимо увеличивать

ток возбуждения. Если нагрузка имеет емкостной характер, то при увеличении тока в статоре машины напряжение U на выводах генератора растёт. Чтобы оно оставалось неизменным, надо уменьшать ток возбуждения I_b .

Так же, как и внешние характеристики, регулировочные характеристики при небольших нагрузках линейны. При нагрузках, близких к номинальному значению, из-за насыщения регулировочные характеристики становятся нелинейными.

Нагрузочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость напряжения на генераторе от тока возбуждения $U = f(I_b)$ при постоянных значениях тока статора $I = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$ нагрузки и скорости вращения $n = \text{const}$.

4.5 Контрольные вопросы

1. Какие способы возбуждения синхронных машин существуют?
2. Объясните назначение тиристорного преобразователя в системе самовозбуждения синхронного генератора.
3. Объясните устройство явнополюсных и неявнополюсных роторов.
4. Объясните устройство синхронного генератора.
5. Для чего необходим и чем обеспечивается неравномерный воздушный зазор между полюсами ротора и статором в синхронных машинах?
6. Из каких участков состоит магнитная цепь явнополюсной синхронной машины?
7. Объясните явление реакции статора в синхронном генераторе.
8. Какие виды потерь имеют место в синхронной машине?
9. Можно ли регулировать напряжение синхронного генератора изменением скорости вращения ротора?
10. Почему характеристики холостого хода синхронного генератора при намагничивании и размагничивании не совпадают?
11. Что называется регулировочной характеристикой синхронного генератора?
12. Почему внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора, снятые при разных видах нагрузки, не совпадают?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы:

- изучить конструкцию и принцип действия двигателя постоянного тока;
- освоить приемы снятия характеристики холостого хода и рабочих характеристик;
- снять и построить рабочие характеристики двигателя постоянного тока.

5.1 Подготовка к выполнению лабораторной работы

1. Изучите необходимые разделы в рекомендуемой литературе, а также теоретические сведения, приведенные в подразделе 5.4.
2. Вычертите схему лабораторной установки.
3. Запишите паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.
4. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений.

5.2 Объект и средства исследования

Лабораторная работа выполняется на стенде НТЦ-23 «Электрические машины». Объектом исследования является машина постоянного тока типа 2ПН90ЛУХЛ4 с номинальными параметрами: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 0,55$ кВт; номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 220$ В; номинальная сила тока $I_{\text{ном}} = 3,32$ А; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1\,500$ об / мин.

Средствами исследования служат:

1) трехфазный асинхронный короткозамкнутый электродвигатель типа АИР71В6У3, работающий в режиме генератора для создания механической нагрузки на валу. Номинальные параметры: схема соединения обмоток — Δ/Y , напряжение $U_{\text{ном}} = 220/380$ В; сила тока $I_{\text{ном}} = 3,1/1,8$ А; номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 0,55$ кВт; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 920$ об / мин; номинальный коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}} = 69\%$; номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,68$;

2) инвертор на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035, предназначенный для создания симметричной трехфазной сети с плавным регулированием частоты и напряжения (номинальная мощ-

ность 1,5 кВт; номинальный ток 7 А; диапазон задания линейного напряжения 0...220 В с дискретностью 1 В; диапазон задания частоты тока 0...163 Гц с дискретностью 0,63 Гц);

3) широтно-импульсные преобразователи ШИП1, ШИП2 и ШИП3, в состав которых входят: интеллектуальный силовой модуль Mitsubishi ASIPM PS11035, полевой транзистор IRF840 (для питания обмотки возбуждения ДПТ), микроконтроллер АТМega16, шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J;

4) цифровые измерительные приборы, входящие в состав стенда, с номинальным напряжением 500 В и номинальным током 5 А.

5.3 Порядок выполнения работы

1. Пользуясь схемой (рис. 5.1), изучите расположение используемых узлов и органов управления на панели лабораторного стенда (рис. 5.2).

2. Все переключатели стенда установите в положение «ВЫКЛЮЧЕНО», регулировочные рукоятки переведите в положение, соответствующее нулевому значению напряжения или тока (против часовой стрелки до упора).

3. Соберите электрическую цепь (см. рис. 5.1) с помощью соединительных проводников. Установите переключатель «PV2/PW2» в положение «PW2».

4. Включите автоматический выключатель «СЕТЬ» и выключатель SA2. Переключателем SA2 зашунтируйте катушки L1...L3 в цепи питания асинхронного двигателя, переключателем SA3 включите схему соединения его обмоток в «треугольник».

5. Установите режим работы инвертора « $U/f = \text{const}$ ». Задайте частоту тока $f = 0$.

6. Включите в работу асинхронный двигатель кнопкой SB1. Увеличивая частоту тока регулятором «ЗАДАНИЕ ЧАСТОТЫ» инвертора, разгоните двигателя до угловой скорости $\omega = 157$ рад / с (контролировать по прибору BR1). Выключите инвертор.

7. Установите режим работы ШИП1 «ДВИГАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ», «ОТКЛЮЧИТЬ ЗАМКНУТУЮ СУ». Выведите регулятор «ЗАДАНИЕ ТОКА» в крайнее левое положение. Включите ШИП1 и регулятором «ЗАДАНИЕ ТОКА» ШИП1 разгоните исследуемый двигатель постоянного тока до угловой скорости $\omega = 157$ рад / с.

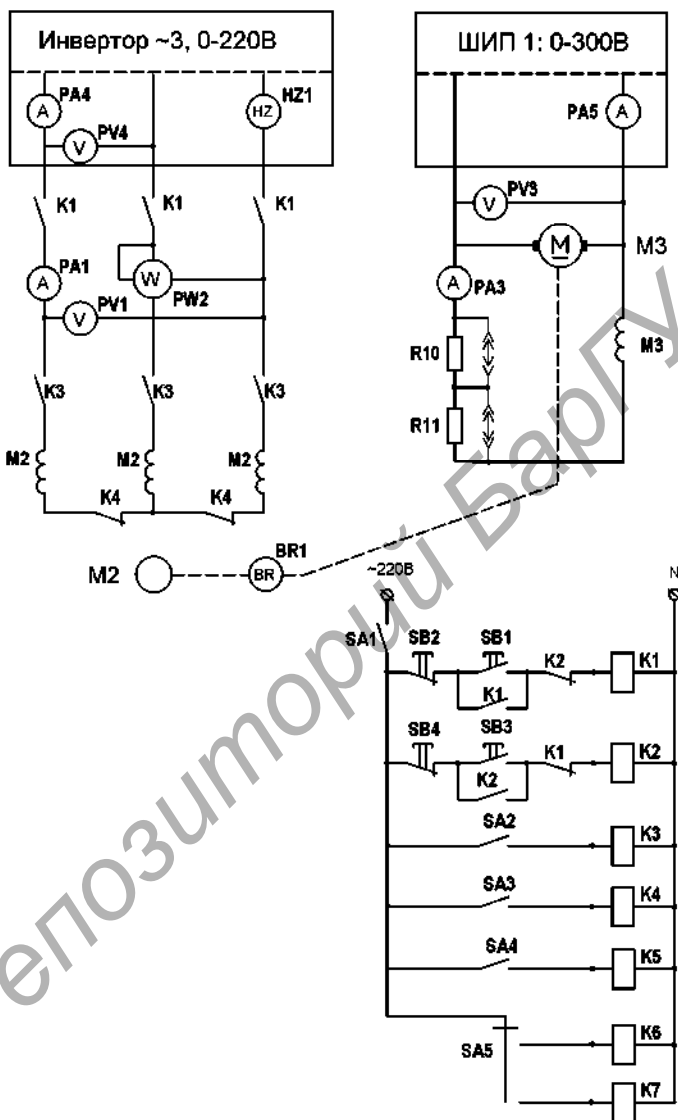


Рисунок 5.1 — Электрическая схема исследования двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

- силу тока якоря (А)

$$I_{\text{я}} = I_{\text{м}} - I_{\text{в}};$$

- активную мощность асинхронного двигателя, работающего в режиме генератора (Вт)

$$P_1 = \sqrt{3} P';$$

- механическую мощность на валу по параметрам работы асинхронного двигателя, работающего в режиме генератора

$$P_{\text{мех}} \approx 3P_1\eta_{\text{ном}},$$

где $\eta_{\text{ном}}$ — КПД асинхронного электродвигателя, зависящий от степени его загрузки по активной мощности $P_1 / P_{1\text{ном}}$ (рис. 5.3):

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 550 / 0,69 = 797 \text{ Вт};$$

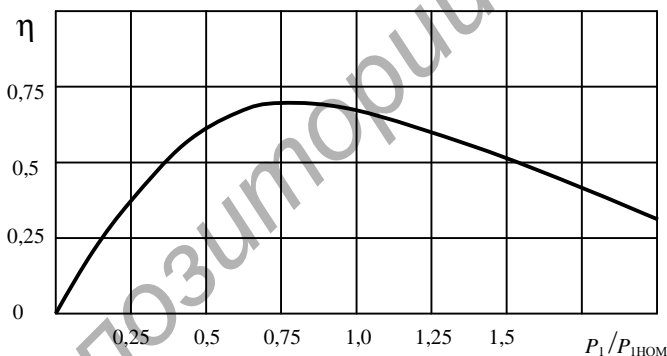


Рисунок 5.3 — Зависимость КПД машины постоянного тока от степени ее загрузки

- момент на валу двигателя (Н · м)

$$M = \frac{9,55P_{\text{мех}}}{n};$$

- коэффициент полезного действия двигателя постоянного тока (%)

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{I_{\text{м}} U_{\text{я}}} 100.$$

12. По результатам опыта постройте:

- а) механические характеристики двигателя постоянного тока $n = f(M)$ при различных значениях тока возбуждения I_B ;
- б) рабочие характеристики двигателя в одной системе координат зависимости $I_a, n, M, \eta = f(P_{\text{мех}})$.

5.4 Основные теоретические сведения

Классификация двигателей постоянного тока производится по способу их возбуждения — соответственно с независимым, параллельным, последовательным или смешанным возбуждением.

У двигателей с параллельным возбуждением обмотка получает питание от независимого источника, что позволяет в широких пределах регулировать магнитный поток возбуждения, и в результате — момент на валу двигателя.

У двигателей с параллельным возбуждением обмотка возбуждения получает питание от того же источника, что и якорь. Ток возбуждения можно регулировать с помощью сопротивления (реостата), включенного последовательно с обмоткой возбуждения.

Для машин постоянного тока принято следующее обозначение выводов обмоток: обмотки якоря Я1-Я2, независимой обмотки возбуждения Н1-Н2, параллельной обмотки возбуждения Ш1-Ш2, последовательной обмотки возбуждения С1-С2, обмотки дополнительных полюсов Д1-Д2, компенсационной обмотки К1-К2. Цифра 1 обозначает начало, а цифра 2 — конец соответствующей обмотки.

По конструктивному выполнению машина постоянного тока с параллельным возбуждением подобна машине с независимым возбуждением, у которой обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения — на статоре.

Основные соотношения, характеризующие работу двигателя постоянного тока, можно представить в виде приведенных ниже уравнений. Эти уравнения справедливы для всех генераторов независимо от способа их возбуждения.

ЭДС якоря (противо-ЭДС) пропорциональна магнитному потоку обмотки возбуждения и току якоря:

$$E_a = C_E \Phi,$$

где C_E — конструктивная постоянная машины;

n — частота вращения якоря, об / мин;
 Φ — магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, Вб.
 Конструктивная постоянная машины:

$$C_E = \frac{pN}{30 \cdot 2a},$$

где p — число полюсов;
 N — общее число проводников в обмотке якоря;
 $2a$ — число параллельных ветвей в обмотке якоря.
 Напряжение питания двигателя:

$$U = E_y + I_y \Sigma R_y + \Delta U_{щ},$$

где $I_y \Sigma R_y$ — падение напряжения на обмотках якоря;
 $\Delta U_{щ}$ — падения напряжения на щеточном контакте.
 Сопротивление ΣR_y включает в себя сопротивления обмотки якоря и всех последовательно соединенных с ней обмоток:

$$\Sigma R_y = R_y + R_d + R_c + R_k,$$

где R_y , R_d , R_c и R_k — сопротивления обмоток якоря, дополнительных полюсов, последовательной (серийной) и компенсационной обмоток соответственно (часть сопротивления у конкретного типа двигателей может отсутствовать).

Для приближенных расчетов используется упрощенное уравнение:

$$U = E_y + I_y(R_y + R_{щ}),$$

где $R_{щ}$ — переходное сопротивление щеточного контакта, которое приближенно принимается постоянным и равным:

$$R_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{я. ном}}.$$

Ток якоря двигателя I_y (А) рассчитывается по формуле

$$I_y = \frac{M}{C_M \Phi},$$

где M — момент на валу двигателя (Н · м);
 C_M — конструктивная постоянная момента машины:

$$C_M = \frac{pN}{2\pi a}.$$

Частота вращения двигателя n (об / мин) имеет вид:

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{C_{\text{Е}}\Phi} \approx \frac{U - I_{\text{я}}R_{\text{я}}}{C_{\text{Е}}\Phi}.$$

Из последней формулы следует, что частоту вращения якоря можно регулировать, изменяя магнитный поток Φ , создаваемый обмоткой возбуждения, изменяя напряжение питания якоря U либо сопротивлением в цепи якоря $R_{\text{я}}$. Наибольшее распространение получил первый способ.

Механическая характеристика двигателя постоянного тока с независимым или параллельным возбуждением называется жесткой, так как при увеличении момента сопротивления на валу до номинального значения частота вращения n уменьшается незначительно — на 1...2%.

Рабочие характеристики отражают зависимость основных величин — тока якоря $I_{\text{я}}$, частоты вращения n , момента на валу M , коэффициента полезного действия η от механической мощности на валу $P_{\text{мех}}$.

5.5 Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия машины постоянного тока.
2. Перечислите способы возбуждения двигателей постоянного тока.
3. Перечислите способы регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока.
4. Что называется механической характеристикой двигателя?
5. Почему механическая характеристика двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением называется жесткой?
6. Как влияет величина тока возбуждения на момент и частоту вращения двигателя?
7. Чем отличается искусственная механическая характеристика от естественной?
8. От чего зависит сопротивление цепи якоря?
9. Укажите обозначение выводов обмоток двигателей постоянного тока.

Список источников

1. *Алиев, И. И.* Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. — М. : РадиоСофт, 2004. — 128 с.
2. *Волынский, Б. А.* Электротехника : учеб. для неэлектрич. специальностей вузов / Б. А. Волынский, Е. Н. Зейн, В. Е. Шатерников. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 528 с.
3. *Касаткин, С. И.* Электротехника / С. И. Касаткин, М. В. Немцов. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 440 с.
4. *Копылов, И. П.* Электрические машины. — М. : Высш. шк., 2000. — 607 с.
5. *Соколова, Е. М.* Электрическое и электротехническое оборудование : учеб. пособие. — М. : Академия, 2003. — 224 с.
6. Электротехника : учеб. для вузов / Ю. М. Борисов [и др.] ; под общ. ред. Ю. М. Борисова. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 552 с.
7. Электротехника : учеб. для неэлектрич. специальностей вузов. / под ред. В. Г. Герасимова. — М. : Высш. шк., 1985. — 480 с.

Производственно-практическое издание

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
И АППАРАТЫ**

**Методические указания по выполнению
лабораторных работ для студентов
инженерных специальностей**

В 2 частях

Часть 2

Составители: *И. В. Дубень, С. И. Козлов, М. И. Гридюшко*

Технический редактор *Н. В. Иванова*

Корректор *О. Н. Майсюк*

Компьютерная верстка *В. В. Кукреши*

Ответственный за выпуск *Е. Г. Хохол*

Подписано в печать 08.11.2011.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Гарнитура Таймс. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 4,06. Уч.-изд. л. 3,06.

Заказ 42. Тираж 99 экз.

ЛИ 02330/0552803 от 09.02.2010

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Барановичский государственный университет»,
225404, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.