

Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Волжская государственная академия водного транспорта»

Кафедра электротехники и электрооборудования
объектов водного транспорта

Исследование электрических машин на лабораторном стенде НТЦ-23

Часть 1

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов очного и заочного обучения специальностей
180407 «Эксплуатация судового электрооборудования
и средств автоматики» и 180405 «Эксплуатация СЭУ»

Составители: Е.Л. Лисицкий, С.В. Попов,
Ю.С. Малышев

Нижний Новгород
Издательство ФБОУ ВПО «ВГАВТ»
2013

УДК 621.313
И85

Исследование электрических машин на лабораторном стенде НТЦ-23. Часть 1 : метод. указания к выпол. лабор. работ для студ. оч. и заоч. обуч. : специальности 180407 и 180405 / сост. – Е.Л. Лищицкий, С.В. Попов, Ю.С. Малышев. – Н. Новгород : Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. – 101 с.

Изложен краткий теоретический материал по курсу «Судовые электрические машины». Даны методические указания для выполнения лабораторных работ. Приведены электрические схемы и таблицы для снятия опытных данных, а также вопросы для самоконтроля.

Для студентов очного и заочного обучения специальностей 180407 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» и 180405 «Эксплуатация СЭУ».

Работа рекомендована к изданию кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта (протокол № 12 от 27.06.2012 г.).

Лабораторная работа № 1

Исследование однофазного трансформатора

1.1. Цель работы:

- испытание однофазного трансформатора в различных режимах работы;
- определение параметров схемы замещения трансформатора;
- построение внешней характеристики трансформатора;
- построение векторных диаграмм для различных режимов работы трансформатора.

1.2. 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.

Трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода, собранного из тонких, изолированных друг от друга листов электротехнической стали, на котором находятся две обмотки, выполненные изолированным медным проводом. На первичную обмотку подается напряжение сети, к зажимам вторичной присоединяется нагрузка.

Переменный магнитный поток, возбужденный в магнитопроводе трансформатора, наводит в обеих обмотках действующие эдс:

$$E_1 = 4,44 \cdot W_1 \cdot f \cdot \Phi_m, \quad (1.1)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot W_2 \cdot f \cdot \Phi_m, \quad (1.2)$$

где Φ_m – амплитуда магнитного потока;

f – частота переменного тока;

W_1 и W_2 – числа витков соответственно первичной и вторичной обмоток.

Различают следующие режимы работы трансформатора:

- 1) режим холостого хода;
- 2) режим короткого замыкания;
- 3) режим нагрузки.

1.2.1. Режим холостого хода

Режим холостого хода является таким предельным режимом, при котором вторичная обмотка разомкнута. Напряжение U_{20} на ее зажимах равно E_2 . Опыт холостого хода дает возможность определить:

1) коэффициент трансформации:

$$K_{\text{тр}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}}, \quad (1.3)$$

где $U_{1\text{ном}}$ – номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора;

2) ток холостого хода:

$$I_{10} = \llcorner \dots 10 \% \rceil I_{1\text{ном}}, \quad (1.4)$$

где $I_{1\text{ном}}$ – номинальный ток трансформатора;

3) активную мощность P_0 , которая представляет собой 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.

Используя результаты опыта холостого хода и паспортные данные трансформатора, можно определить параметры (Z_0, R_0, X_0) схемы замещения (рис. 1.1) трансформатора.

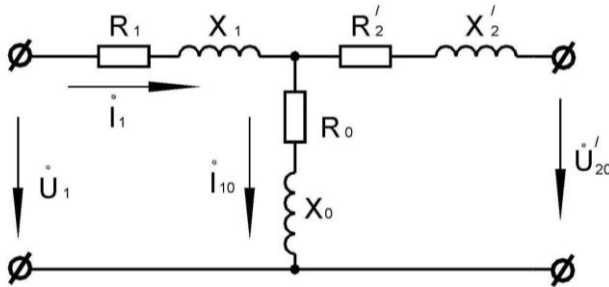


Рис. 1.1. Схема замещения трансформатора, работающего в режиме холостого хода

$$z_0 = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{10}}, \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1\text{ном}} \cdot I_{10}}, \quad \alpha = 90^\circ - \varphi_0, \quad R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - R_0^2}, \quad (1.5)$$

где R_0 – активное сопротивление, потери мощности в котором равны потерям мощности в магнитопроводе трансформатора;

- x_0 – индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное основным магнитным потоком;
- z_0 – полное сопротивление;
- φ_0 – угол сдвига по фазе между током и напряжением первичной обмотки в режиме холостого хода;
- α – угол между током холостого хода и магнитным потоком в режиме холостого хода.

1.2.2. Режим короткого замыкания

Режим короткого замыкания является другим 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 опытном режиме короткого замыкания на первичную обмотку подается такое пониженное напряжение короткого замыкания ($U_{1к}$), при котором по вторичной обмотке протекает номинальный ток.

$$U_{1к} = \dots 10\% \cdot U_{ном}. \quad (1.6)$$

Схема замещения трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания, показана на рис. 1.2.

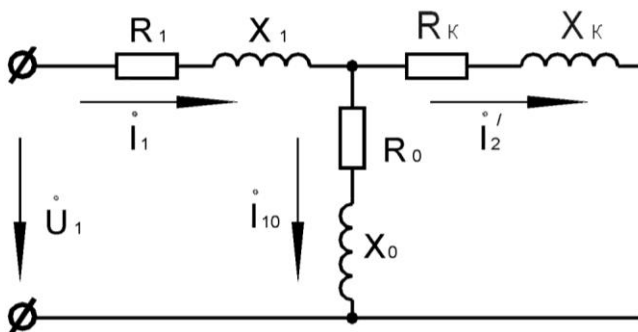


Рис. 1.2. Схема замещения трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания

Мощность P_κ , определяемая из опыта короткого замыкания, представляет собой электрические потери в активных сопротивлениях обоих обмоток трансформатора:

$$P_\kappa = I_{\text{ном}}^2 \cdot R_1 + I_{2\text{ном}}^2 \cdot R_2, \quad (1.7)$$

где R_1 и R_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

В опыте короткого замыкания определяют потери мощности в обмотках трансформатора и уточняют значение коэффициента трансформации. По результатам измерения и паспортным данным определяют параметры (R_1, R'_2, X_1, X'_2) схемы замещения трансформатора (см. рис. 1.1 и рис. 1.2).

$$z_\kappa = \frac{U_{1\kappa}}{I_{\text{ном}}}, \quad \cos \varphi_\kappa = \frac{P_\kappa}{U_{1\kappa} \cdot I_{\text{ном}}}, \quad R_\kappa = \frac{P_\kappa}{I_{\text{ном}}^2}, \quad x_\kappa = \sqrt{z_\kappa^2 - R_\kappa^2}, \quad (1.8)$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_\kappa}{2}, \quad x_1 = x'_2 = \frac{x_\kappa}{2}, \quad R_2 = \frac{R'_2}{K_{\text{тр}}^2}, \quad x = \frac{x'_2}{K_{\text{тр}}}, \quad (1.9)$$

где R_κ и X_κ – активное и реактивное сопротивления короткого замыкания трансформатора;

R'_2 и X'_2 – приведенные сопротивления вторичной обмотки трансформатора к первичной обмотке.

Для приведенного трансформатора имеем:

$$U'_2 = K_{\text{тр}} \cdot U_2 = U_1, \quad I'_2 = \frac{I_2}{K_{\text{тр}}} = I_1. \quad (1.10)$$

1.2.3. Режим нагрузки

В режиме нагрузки трансформатор нагружается в пределах от нуля до номинальной одной из нагрузок: активной, активно-индуктивной или активно-емкостной.

Схема замещения трансформатора, работающего на нагрузку Z_n , показана на рис. 1.3.

Система уравнений электрического состояния этого режима составлена по схеме замещения (см. рис. 1.3):

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(R_2 + jX_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + (-\dot{I}_2), \end{cases}$$

где \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 – комплексы полных сопротивлений обмоток трансформатора.

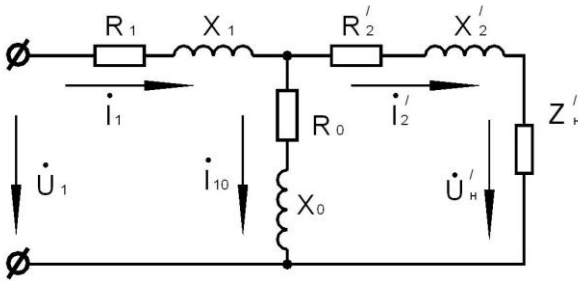


Рис. 1.3. Схема замещения трансформатора, работающего с нагрузкой

Зависимость $U_2 = f(I_2)$ называется внешней характеристикой трансформатора (рис. 1.4).

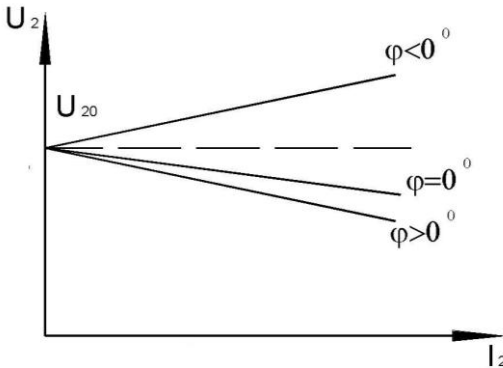


Рис. 1.4. Внешние характеристики трансформатора при различном характере нагрузок

Процентное изменение вторичного напряжения при переменной нагрузке определяют так:

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\% , \quad (1.11)$$

где U_{20} и U_2 – соответственно вторичные напряжения при холостом ходе и заданной нагрузке, определяемой вторичным током и коэффициентом мощности $\cos\varphi_2$ нагрузки.

Величину ΔU_2 можно рассчитать по формуле

$$\Delta U_2 \% = \beta \cdot (U_{a.к.} \% \cdot \cos \varphi_2 + U_{p.к.} \% \cdot \sin \varphi_2), \quad (1.12)$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2ном}}$ – коэффициент загрузки;

$U_{a.к.} \%$ – активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора;

$U_{p.к.} \%$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора в процентах;

$\cos \varphi_2$ – коэффициент мощности нагрузки.

$$U_{a.к.} \% = \frac{P_{\kappa}}{S_{ном}} \cdot 100\% = \frac{R_{\kappa} \cdot I_{н}}{U_{1ном}} \cdot 100\%, \quad (1.13)$$

$$U_{p.к.} \% = \sqrt{(U_{1к} \%)^2 - (U_{a.к.} \%)^2}, \quad (1.14)$$

$$S_{ном} = U_{1ном} \cdot I_{1ном}, \quad (1.15)$$

где $S_{ном}$ – полная мощность трансформатора, В·А.

1.2.4. Коэффициент полезного действия трансформатора

По данным режима холостого хода, короткого замыкания и режима нагрузки трансформатора определяется КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{\kappa}}, \quad (1.16)$$

где $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$ – активная полезная мощность, снимаемая с зажимов вторичной обмотки;

$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ – активная мощность, потребляемая трансформатором из сети.

Зависимость $\eta = f(\beta)$ приведена на рис. 1.5.

Здесь β_{\max} – коэффициент загрузки трансформатора, при котором КПД трансформатора достигает максимального значения:

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\kappa}}}. \quad (1.17)$$

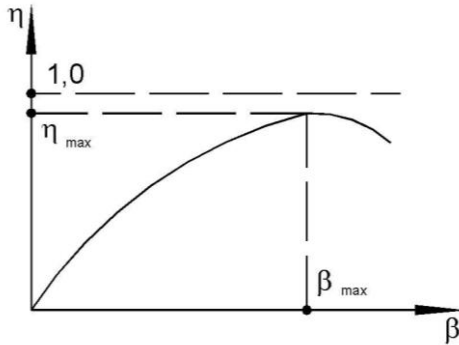


Рис. 1.5. Зависимость $\eta = f(\beta)$

1.2.5. Векторные диаграммы трансформатора

Векторные диаграммы трансформатора, работающего в режиме холостого хода и короткого замыкания, показаны на рис. 1.6, *а* и рис. 1.6, *б* соответственно.

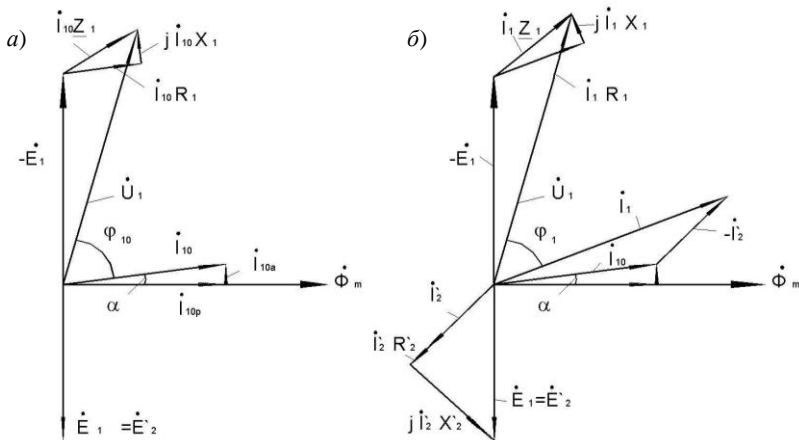


Рис. 1.6. Векторные диаграммы трансформатора:
а) для режима холостого хода; *б*) для режима короткого замыкания

На рис. 1.7 приведены векторные диаграммы нагруженного трансформатора с нагрузками – активной (рис. 1.7, *а*) и активно-индуктивной (рис. 1.7, *б*).

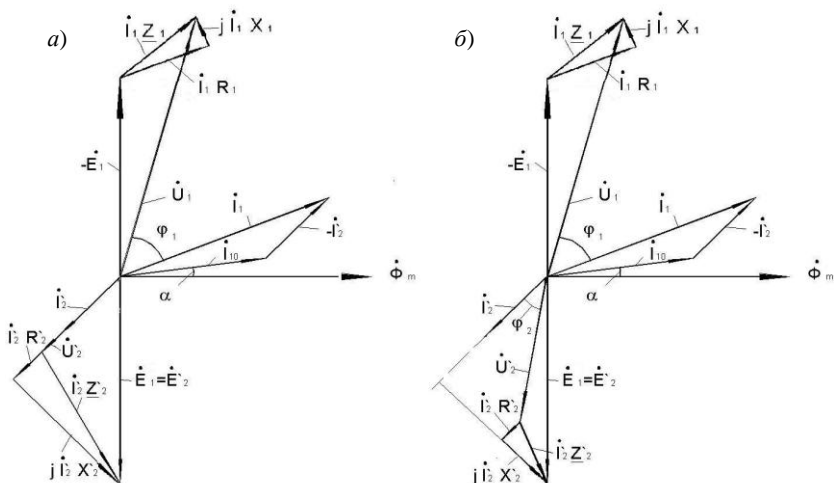


Рис. 1.7. Векторные диаграммы трансформатора с нагрузкой:
 а) активной; б) активно-индуктивной

1.3. Задание на выполнение лабораторной работы

1.3.1. Опыт холостого хода

В схеме включения однофазного трансформатора при опыте х. х. для регулирования напряжения используется Инвертор. В качестве первичной используйте обмотку низшего напряжения (НН). Сделайте не менее пяти замеров через приблизительно одинаковые интервалы тока х. х., изменяя подводимое к трансформатору напряжение от $0,5U_{2ном}$ до $1,15U_{2ном}$. Показания измерительных приборов занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Номер измерения и вычисления	Измерения				Вычисления				
	U_1 , В	I_0 , А	P_0 , Вт	U_{20} , В	R_0 , Ом	X_0 , Ом	Z_0 , Ом	$\cos \varphi_0$	$K_{тр}$

Рассчитать, используя результаты измерений: R_0 , X_0 , Z_0 , $\cos \varphi_0$, $K_{тр}$.

Полученные значения вычисленных величин занести в табл. 1.1. Величины, соответствующие номинальному первичному напряжению

$I_{\text{НОМ}}$, следует выделить, например, подчеркнув их жирной линией. По данным таблицы построить характеристики х. х. трансформатора (на общей координатной сетке $I_0, P_0, \cos \varphi_0$ в функции U_1). На характеристиках отметить точки $I_{0\text{НОМ}}, P_{0\text{НОМ}}$ и $\cos \varphi_{0\text{НОМ}}$, соответствующие номинальному напряжению $U_{1\text{НОМ}}$.

1.3.2. Опыт короткого замыкания

При опыте к.з. трансформатора напряжение обычно подводят к обмотке ВН, номинальное значение тока в которой меньше, чем в обмотке НН. В некоторых случаях это позволяет включать ваттметр в первичную цепь без трансформатора тока.

Изменяя величину тока к.з. от нуля до значения $1,2 \cdot I_{1\text{НОМ}}$ через приблизительно одинаковые интервалы тока к.з. измерить напряжение короткого замыкания U_{κ} и мощность короткого замыкания P_{κ} . Результаты измерений, а также результаты вычислений занести в табл. 1.2. Значения величин, соответствующих значению тока к.з. $I_{1\text{н}} = I_{1\text{НОМ}}$, подчеркнуть.

Таблица 1.2

Номер измерения и вычисления	Измерения			Вычисления				
	U_{κ} , В	$I_{1\kappa}$, А	P_{κ} , Вт	$U_{\kappa a}$, %	$U_{\kappa p}$, %	R_{κ} , Ом	X_{κ} , Ом	$\cos \varphi_{\kappa}$

По данным таблицы построить характеристики к.з. (на общей координатной сетке $I_{1\kappa}, P_{\kappa}, \cos \varphi_{\kappa}$ функции U_{κ}). На характеристиках отметить точки $U_{\kappa\text{НОМ}}, P_{\kappa\text{НОМ}}$, соответствующие току к.з. $I_{\kappa} = I_{1\text{НОМ}}$.

Полученные из опыта к.з. значения $P_{\kappa\text{НОМ}}$ и $U_{\kappa\text{НОМ}}$ следует привести к рабочей температуре $\theta_2 = 75^\circ\text{C}$.

Приведенное значение мощности к.з.:

$$P'_{\kappa\text{НОМ}} = P_{\kappa\text{НОМ}} \cdot [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)], \quad (1.18)$$

где $\alpha = 0,004$ – температурный коэффициент для меди и алюминия;

θ_1 – температура обмоток трансформатора при проведении опыта, $^\circ\text{C}$.

В связи с тем, что температура обмоток трансформатора влияет лишь на активную составляющую напряжения к. з.

$$U_{\kappa a} = U_{\kappa\text{НОМ}} \cos \varphi_{\kappa}, \quad (1.19)$$

то и приводить к рабочей температуре следует лишь активную составляющую напряжения к.з.

$$U'_{к.а} + [1 + \alpha (K = \theta_2 - \theta_1)]. \quad (1.20)$$

Приведенное к рабочей температуре напряжение к.з.

$$U'_{к.ном} = \sqrt{U'^2_{к.а} + U^2_{к.р}}, \quad (1.21)$$

где реактивная составляющая напряжения к.з.

$$U_{к.р} = \sqrt{U^2_{к.ном} - U^2_{к.а}}. \quad (1.22)$$

1.3.3. Внешние характеристики

Для заданных преподавателем значений коэффициента мощности нагрузки ($\cos \varphi_n = 1$, $\cos \varphi_n = 0,8$ – индуктивный характер нагрузки, $\cos \varphi_n = 0,8$ – емкостной характер нагрузки), используя данные опыта короткого замыкания, рассчитать и построить внешние характеристики трансформатора. Данные расчётов занести в табл. 1.3. Для $\cos \varphi_n = 1$ снять внешнюю характеристику экспериментально.

Таблица 1.3

β	$\cos \varphi_2 = 1$		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд)		$\cos \varphi_2 = 0,8$ (емк)	
	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$	$\Delta U, \%$	$U_2, \text{В}$

1.3.4. Зависимость КПД трансформатора от нагрузки

Для заданных преподавателем значений коэффициента мощности нагрузки ($\cos \varphi_n = 1$, $\cos \varphi_n = 0,8$ – индуктивный характер нагрузки), используя паспортные данные, данные опыта короткого замыкания и холостого хода, рассчитать и построить зависимость $\eta = f(\beta)$. Данные расчётов занести в табл. 1.4. Для $\cos \varphi_n = 1$ и значений сопротивлений нагрузки, установленных на стенде, определить η экспериментально.

Таблица 1.4

	β	0,25	0,50	0,75	1,0	1,2
η	При $\cos \varphi_2 = 1$					
	При $\cos \varphi_2 = 0,8$					

Анализ результатов лабораторной работы

1. При анализе характеристик х. х. трансформатора следует обратить внимание на их криволинейность, обусловленную магнитным насыщением магнитопровода, наступающим при некотором значении первичного напряжения U_1 .

Ток х. х. I_0 и мощность х. х. P_0 , полученные опытным путем, сравнивают с их значениями по каталогу на исследуемый трансформатор. Значительное превышение опытных значений I_0 и P_0 над каталожными указывает на наличие дефектов в трансформаторе: к.з. между частью пластин в магнитопроводе или межвитковое к.з. в небольшой части витков какой-либо из обмоток.

2. При анализе характеристик к.з. следует обратить внимание на прямолинейность графика тока к.з., обусловленную ненасыщенным состоянием магнитопровода при опыте к.з. из-за малой величины основного магнитного потока, величина которого пропорциональна величине подведенного к обмотке напряжения к.з. (в трансформаторах средней и большой мощности $U_{\kappa} \leq 10\%$).

3. При анализе внешних характеристик трансформатора необходимо сделать вывод о влиянии характера нагрузки на величину изменения вторичного напряжения трансформатора.

4. При анализе зависимости КПД трансформатора от нагрузки следует объяснить форму этих графиков. Опытное значение КПД сравнивают с его значением по каталогу. Необходимо объяснить причину уменьшения КПД трансформатора при уменьшении коэффициента мощности нагрузки.

1.4. Порядок работы с лабораторной установкой

1.4.1. Опыт холостого хода

ВНИМАНИЕ!!! При сборке схем сетевой автоматический выключатель должен быть выключен, все тумблеры на панели должны быть в нижнем положении.

Собрать схему рис. 1.8. Включить автоматический выключатель «Сеть». Установить резисторы «Задание частоты» и «Задание напряжения» на панели «Режим работы Инвертора» в крайнее левое положение. Установить тумблером на панели «Режим работы Инвертора» «независимое управление». Включить SA1 и нажать

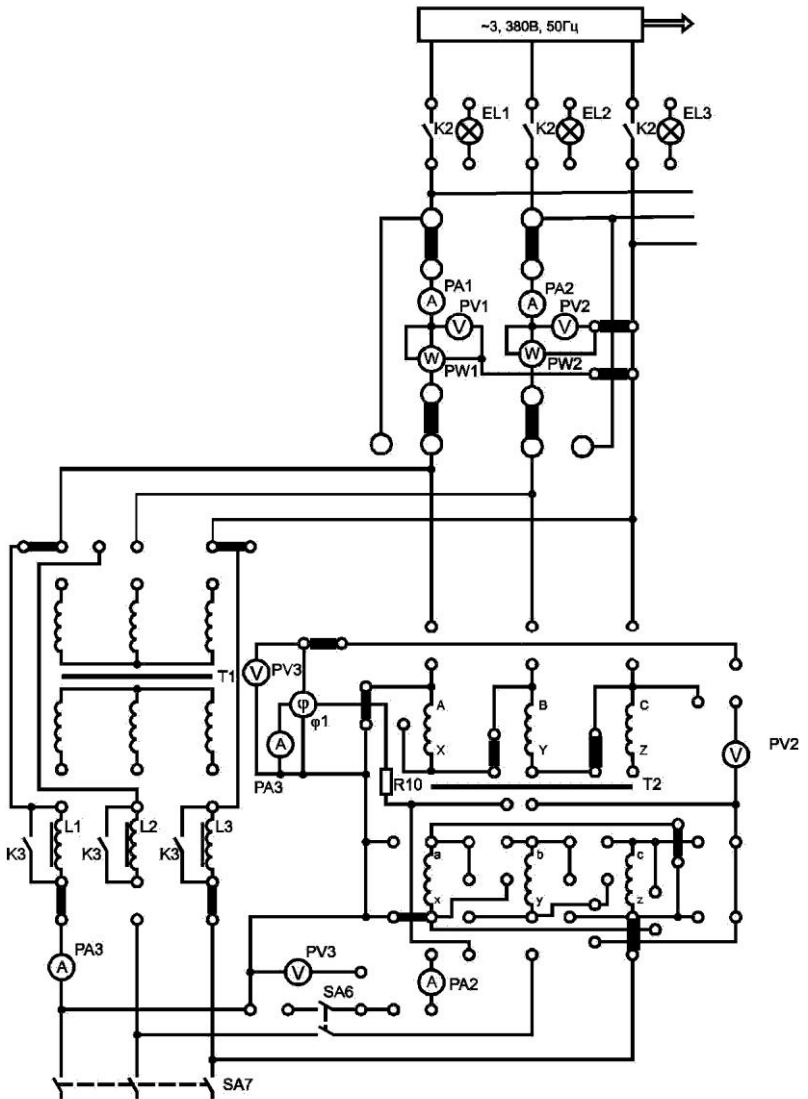


Рис. 1.8. Схема соединений элементов лабораторного стенда для проведения опыта холостого хода трансформатора

кнопку SB1. Включить Инвертор. Резистором «Задание частоты» установить частоту 50 Гц. **Плавно** изменяя резистором «Задание напряжения» напряжение Инвертора (прибор pV4) от 0 до 130 В, через приблизительно равные промежутки для 5–6 точек (одна из них должна соответствовать номинальному напряжению), снять показания приборов pV2, pW2, pA2, pV3. Данные занести в табл. 1.1. Плавно вывести резистор «Задание напряжения» в крайнее левое положение (прибор pV4 = 0). Выключить Инвертор, выключить сетевой автоматический выключатель.

1.4.2. Опыт короткого замыкания

Собрать схемы рис. 1.9. Включить автоматический выключатель «Сеть». Установить резисторы «задание частоты» и «задание напряжения» на панели «Режим работы Инвертора» в крайнее левое положение. Включить «Независимое управление». Включить SA1 и нажать кнопку SB1. Включить Инвертор. Резистором «Задание частоты» задать частоту 50 Гц. **Плавно** вращая резистор «Задание напряжения» на панели «Режим работы Инвертора», изменять ток короткого замыкания трансформатора от 0 до 1 А (прибор pA2). **Внимание! Ток I_k не должен превышать $1,2 \cdot I_{ном}$.** Через приблизительно равные промежутки тока I_k (5–6 точек, одна из них должна соответствовать номинальному току) снять показания приборов pW1, pV1, pA1. Данные занести в табл. 1.2. Плавно вывести резистор «Задание напряжения» в крайнее левое положение (pV4).

1.4.3. Внешние характеристики. Коэффициент полезного действия

Собрать схему рис. 1.10. Включить автоматический выключатель «Сеть». Установить резисторы «Задание частоты» и «Задание напряжения» на панели «Режим работы Инвертора» в крайнее левое положение. Включить SA1 и нажать кнопку SB1. Включить Инвертор. Резистором «Задание частоты» установить частоту 50 Гц. Резистором «Задание напряжения» установить номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора 220 В. Снять показания pA2, pV2, pW2 (первичная цепь), pV1, pA1 (вторичная цепь). Переключатель SA5 включить в крайнее левое положение. Снять

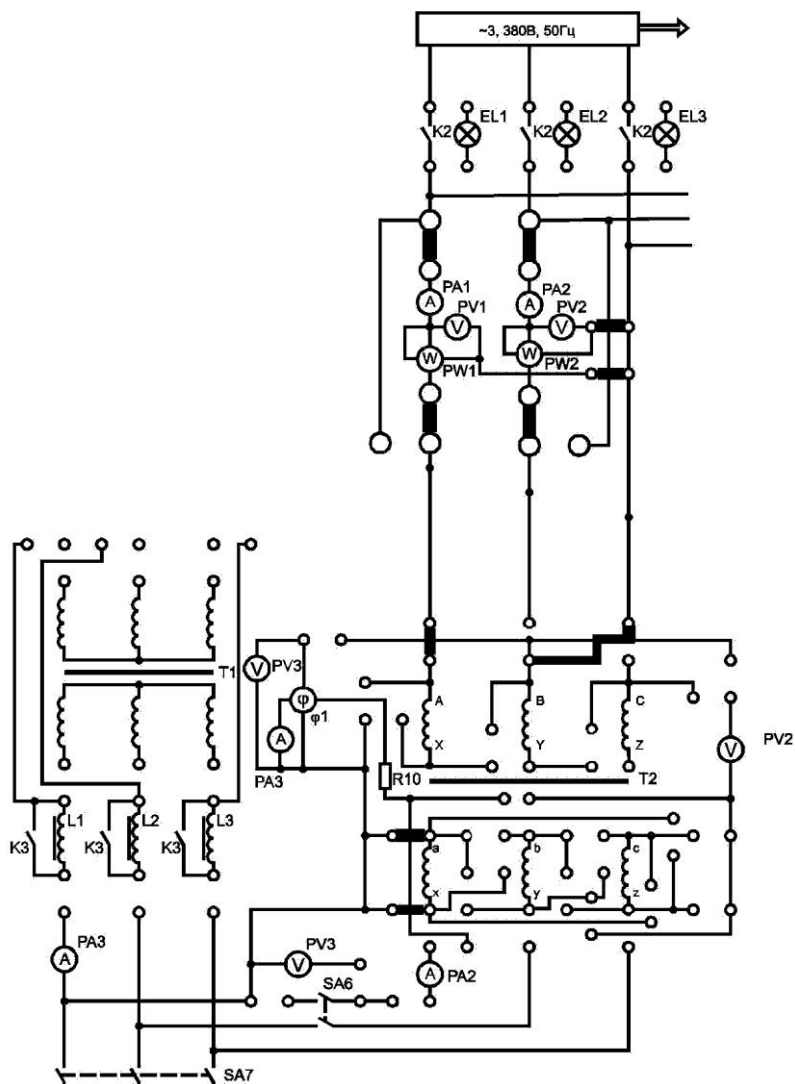


Рис. 1.9. Схема соединений элементов лабораторного стенда для проведения опыта короткого замыкания трансформатора

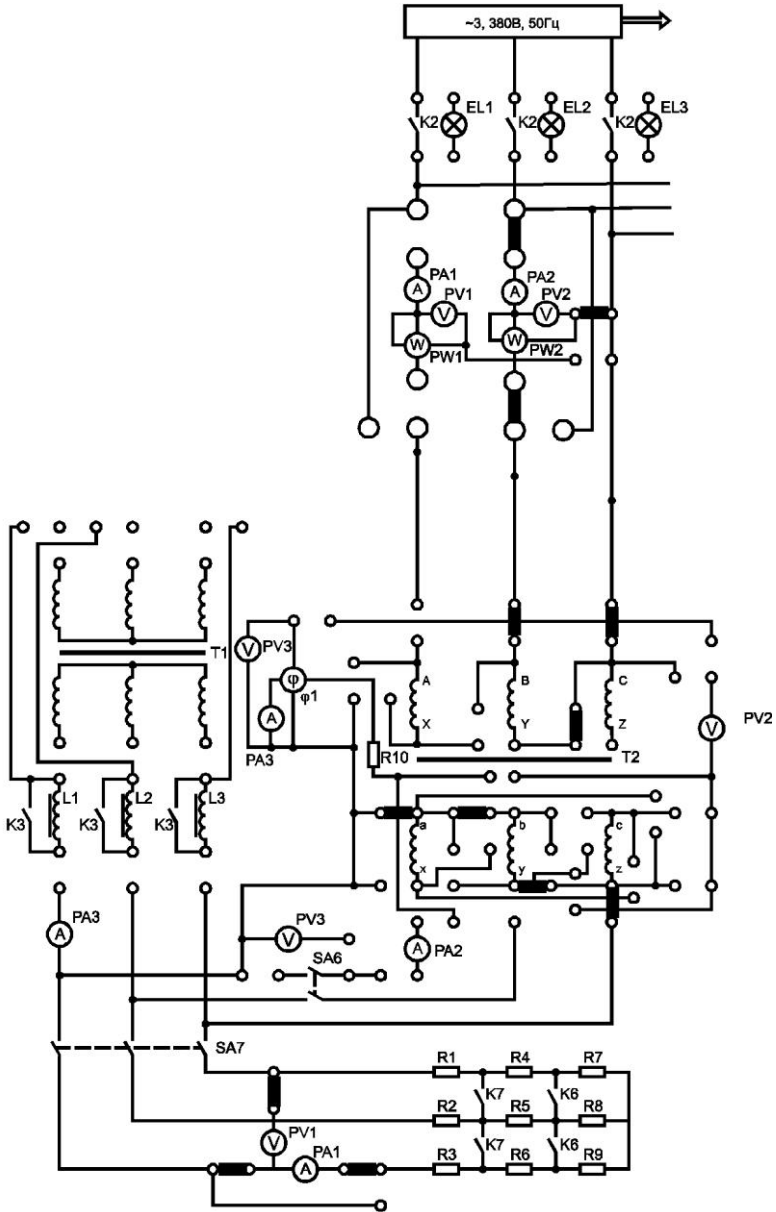


Рис. 1.10. Схема соединений элементов лабораторного стенда для проведения опыта – трансформатор с нагрузкой

показания приборов рА2, рV2, рW2 (первичная цепь), рV1, рА1 (вторичная цепь). Сопротивление нагрузки в этом случае $R_n = R1 + R4 + R7 + R9 + R6 + R3$ (номиналы взять из паспортных данных стенда либо измерить при отключенном стенде). SA5 перевести в среднее положение. Снять показания приборов рА2, рV2, рW2 (первичная цепь), рV1, рА1 (вторичная цепь). Сопротивление нагрузки в этом случае $R_n = R1 + R4 + R6 + R3$. SA5 перевести в крайнее правое положение. Снять показания приборов рА2, рV2, рW2 (первичная цепь), рV1, рА1 (вторичная цепь). Сопротивление нагрузки в этом случае $R_n = R1 + R3$. Вывести SA5 в крайнее левое положение. Выключить SA1. Выключить Инвертор. Установить резисторы «Задание частоты» и «Задание напряжения» на панели «Режим работы Инвертора» в крайнее левое положение. Выключить автоматический выключатель.

Контрольные вопросы

1. Как устроен однофазный трансформатор?
2. От чего зависят эдс обмоток трансформатора?
3. В каких случаях трансформатор называется повышающим и когда понижающим?
4. Что называется коэффициентом трансформации?
5. Как определить номинальные токи обмоток трансформатора, если известны его номинальная мощность и напряжения?
6. Что называется внешней характеристикой трансформатора?
7. Какие потери энергии имеют место в трансформаторе и от чего они зависят?
8. Что называют схемой замещения трансформатора и как определить её параметры?
9. Как выполняют опыты холостого хода и короткого замыкания?
10. Для чего магнитопровод трансформатора собирают из отдельных листов электротехнической стали?
11. Почему ваттметр в цепи первичной обмотки трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке практически измеряет мощность магнитных потерь.
12. Почему в режиме холостого хода трансформатора его сердечник нагревается, а обмотки остаются холодными?
13. Почему в опыте короткого замыкания значительно снижают напряжение на первичной обмотке трансформатора?

14. Почему в режиме короткого замыкания трансформатора его обе обмотки нагреваются, а магнитопровод остается холодным?

15. Почему уменьшается напряжение на зажимах вторичной обмотки при увеличении тока нагрузки при активной и активно-индуктивной нагрузке?

Лабораторная работа № 2

Опытное определение групп соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора

2.1. Цель работы:

– изучить различные группы соединений фазных обмоток трехфазных трансформаторов;

– экспериментально подтвердить теоретические сведения о группах соединения трансформаторов и приобрести практические навыки по опытному определению групп соединения трехфазных трансформаторов.

2.2. Основные теоретические положения

Каждому типу фазных обмоток трехфазного трансформатора соответствует определенный угол смещения векторов линейных низших напряжений к соответствующим им векторам линейных высших напряжений.

Сдвиг фаз между эдс \dot{E}_{AX} и \dot{E}_{ax} принято выражать *группой соединения*. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360° , а кратность сдвига составляет 30° , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

Для трехфазных трансформаторов угол смещения вектора линейной эдс обмотки низшего напряжения (НН) по отношению к вектору линейной эдс обмотки ВН определяют умножением числа, обозначающего группу соединения, на 30° . Угол смещения отсчитывают от вектора эдс обмотки высшего напряжения (ВН) по часовой стрелке до вектора эдс обмотки НН. Например, группа соединения 5 указывает, что вектор линейной эдс обмоток НН отстает по фазе от вектора линейной эдс обмоток ВН на угол $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$.

Применением разных способов соединения обмоток в трехфазных трансформаторах можно создать 12 различных групп соединений.

При одинаковых схемах соединения обмоток ВН и НН, например Y/Y или Δ/Δ , получают четные группы соединения, а при неодинаковых схемах, например Y/Δ или Δ/Y , – нечетные.

Четыре группы соединения 0, 6, 11 и 5 называют *основными*.

Соотношение и угол смещения между векторами линейных эдс обмоток НН по отношению к векторам линейных эдс обмоток ВН наглядно иллюстрируются с помощью топологических диаграмм (рис. 2.1).

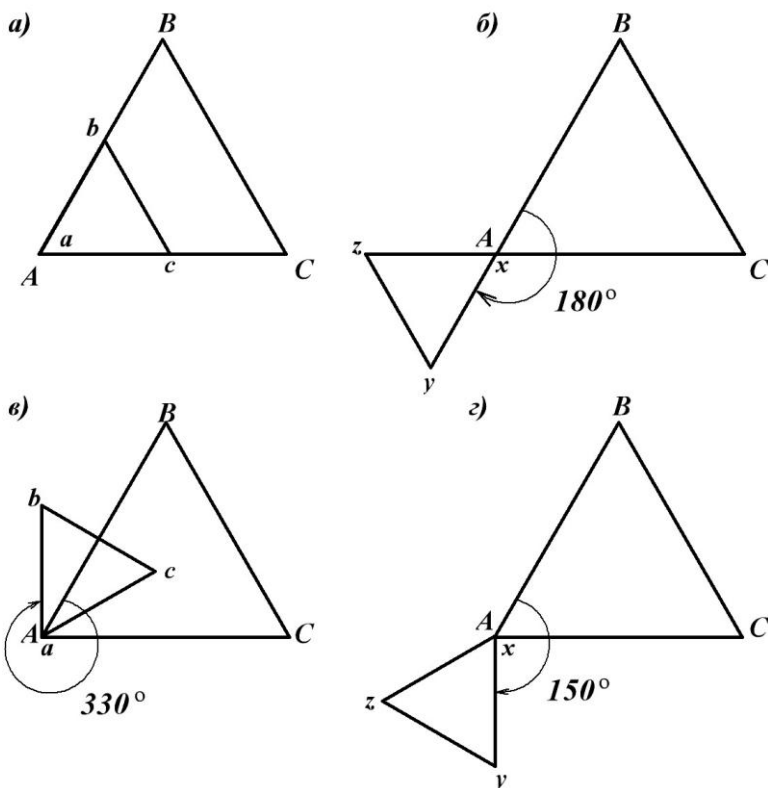


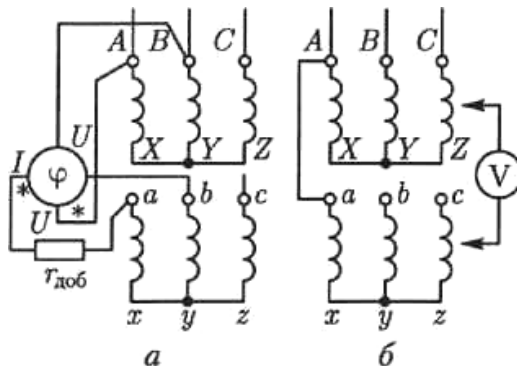
Рис. 2.1. Топографические диаграммы линейных напряжений групп соединения обмоток трансформатора:

а) нулевой; б) шестой; в) одиннадцатой; з) пятой

При изготовлении или в процессе эксплуатации трансформаторов иногда возникает необходимость в опытной проверке группы соединения. Существует несколько методов такой проверки, но наиболее распространены методы фазометра и вольтметра.

Метод фазометра. Основан на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями (эдс) обмоток ВН и НН с помощью фазометра φ , включенного по схеме, показанной на рис. 2.2, а. Параллельную обмотку фазометра U подключают к стороне ВН, а последовательную обмотку I – к стороне НН. Для ограничения тока в последовательной обмотке ее включают через добавочное сопротивление $r_{доб}$. Затем трансформатор включают в сеть с симметричным трехфазным напряжением. Для удобства измерений желательно, чтобы фазометр имел полную (360°) шкалу.

Рис. 2.2. Проверка группы соединения Y/Y – 0 методами фазометра (а) и вольтметра (б)



Метод вольтметра. Непосредственного измерения угла фазового сдвига между линейными напряжениями (эдс) этот метод не дает. Это *косвенный* метод, и он основан на измерении вольтметром напряжений (эдс) между одноименными выводами обмоток ВН и НН. Если проверяют группу соединения Y/Y – 0, то, соединив проводом выводы A и a, измеряют напряжение U_{bB} (между выводами b и B) и U_{cC} (между выводами c и C). Если предполагаемая группа соединения Y/Y – 0 соответствует фактической, то напряжения

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{ab}(K_{л} - 1), \quad (2.1)$$

где $K_{л} = U_{AB} / U_{ab}$ – отношение линейных напряжений (эдс) обмоток ВН и НН, т.е. коэффициент трансформации линейных напряжений (эдс).

Если проверяют группы соединения 6, 11 или 5, то для измеренных значений напряжений пользуются формулами:

$$\text{группа Y/Y} - 6: \quad U_{yB} = U_{zC} = U_{xy}(K_l + 1); \quad (2.2)$$

$$\text{группа Y/D} - 11: \quad U_{bB} = U_{cC} = U_{ab}\sqrt{1 - \sqrt{3}K_l + n_l^2}; \quad (2.3)$$

$$\text{группа Y/D} - 5: \quad U_{yB} = U_{zC} = U_{xy}\sqrt{1 + \sqrt{3}K_l + K_l^2}, \quad (2.4)$$

где U_{ab} и U_{xy} – линейные напряжения на выводах обмоток НН, ВН.

Если условия равенства напряжений по результатам измерений и приводимым формулам не соблюдаются, то это свидетельствует о нарушениях в маркировке выводов трансформатора.

2.3. Задание на выполнение лабораторной работы

2.3.1. Используя данные опыта холостого хода лабораторной работы № 1 рассчитайте K_l для 0, 5, 6 и 11-й групп соединения.

2.3.2. Экспериментально проверить 0, 5, 6 и 11-ю группы соединения трехфазного трансформатора.

2.3.3. По экспериментальным данным построить топографические диаграммы линейных напряжений для четырех основных групп соединения трехфазного трансформатора.

2.3.4. Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

Анализ результатов лабораторной работы

При анализе результатов лабораторной работы необходимо иметь в виду следующее:

1. Группы соединения трансформаторов определяются не только схемой соединения обмоток ВН и НН, но и маркировкой их выводов (направлением намотки).

2. Исследованные в лабораторной работе четыре группы соединений являются основными и каждая из них может быть преобразована в две производные группы соединения путем круговой перемаркировки выводов обмотки либо на стороне ВН, либо на стороне НН; следует указать, какие производные группы соединения могут быть получены из каждой основной.

3. Необходимо отметить, какие из групп соединения, рассмотренных в данной работе, предусмотрены ГОСТ.

2.4. Порядок работы с лабораторной установкой

2.4.1. Соединение вторичной обмотки в схему «прямая звезда». Метод вольтметра. Все тумблеры на лицевой панели в нижнем положении

Собрать схему рис. 2.3. Вольтметр $pV2$ подсоединить к выводам трансформатора bB . Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой $SB3$ подать питание на катушку пускателя $K2$, контакты которой подключат испытуемый трансформатор к сети – 3×380 В, 50 Гц. Записать показания приборов $pV3$ (U_{ab}) и $pV2$ (U_{bB}). Кнопкой $SB4$ отключить пускатель $K2$. Вольтметр $pV2$ подсоединить к выводам cC (рис. 2.3 – пунктирная линия). Кнопкой $SB3$ включить $K2$. Записать показание $pV2$ (U_{cC}). Кнопкой $SB4$ отключить пускатель $K2$. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

2.4.2. Соединение вторичной обмотки в схему «прямая звезда». Метод фазометра. Все тумблеры на лицевой панели в нижнем положении

Собрать схему рис. 2.4. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой $SB3$ подать питание на катушку пускателя $K2$. Записать показания фазометра. Кнопкой $SB4$ отключить пускатель $K2$. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

2.4.3. Соединение вторичной обмотки в схему «обратная звезда». Метод вольтметра. Все тумблеры на лицевой панели в нижнем положении

Собрать схему рис. 2.5. Вольтметр $pV2$ подсоединить к выводам трансформатора yB . Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой $SB3$ подать питание на катушку пускателя $K2$, контакты которой подключат испытуемый трансформатор к сети – 3×380 В, 50 Гц. Записать показания приборов $pV3$ (U_{xy}) и $pV2$ (U_{yB}). Кнопкой $SB4$ отключить пускатель $K2$. Вольтметр $pV2$ подсоединить к выводам zC (см. рис. 2.5 – пунктирная линия). Кнопкой $SB3$ включить $K2$. Записать показание $pV2$ (U_{zC}). Кнопкой $SB4$ отключить пускатель $K2$. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

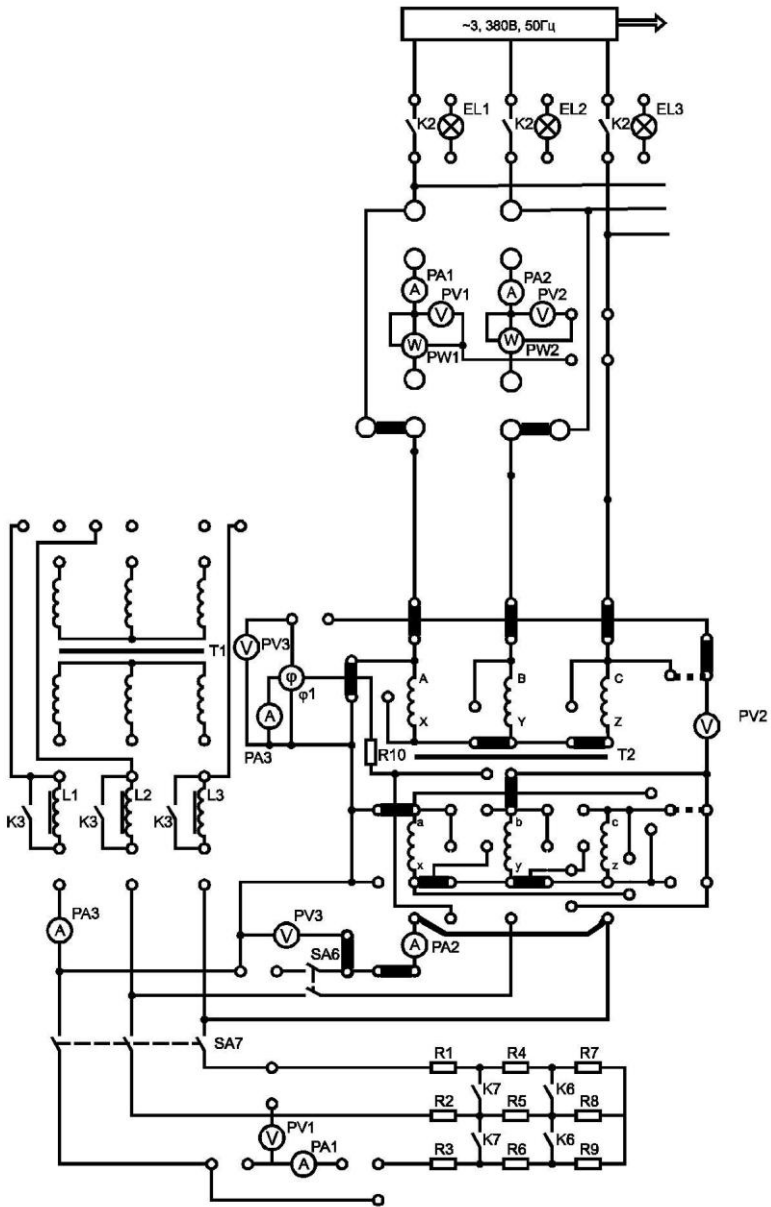


Рис. 2.3. Соединение обмоток трансформатора по схеме «прямая звезда». Метод вольтметра

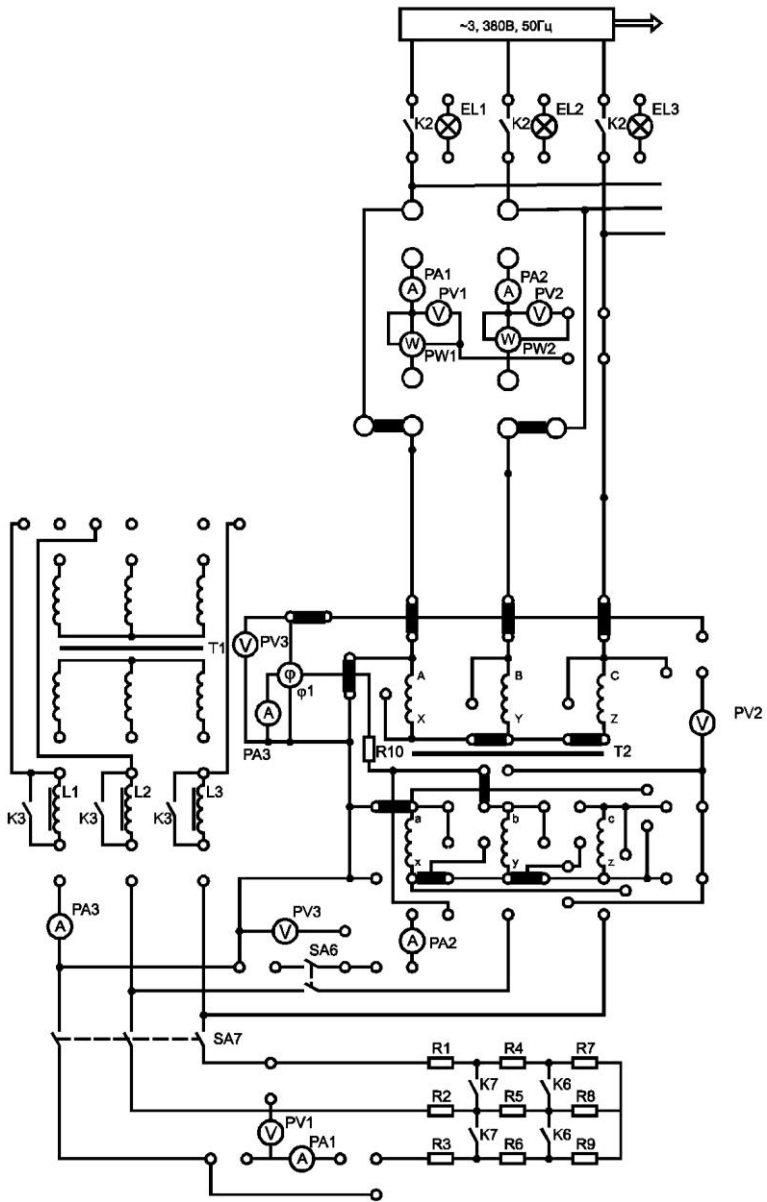


Рис. 2.4. Соединение обмоток трансформатора по схеме «прямая звезда». Метод фазометра

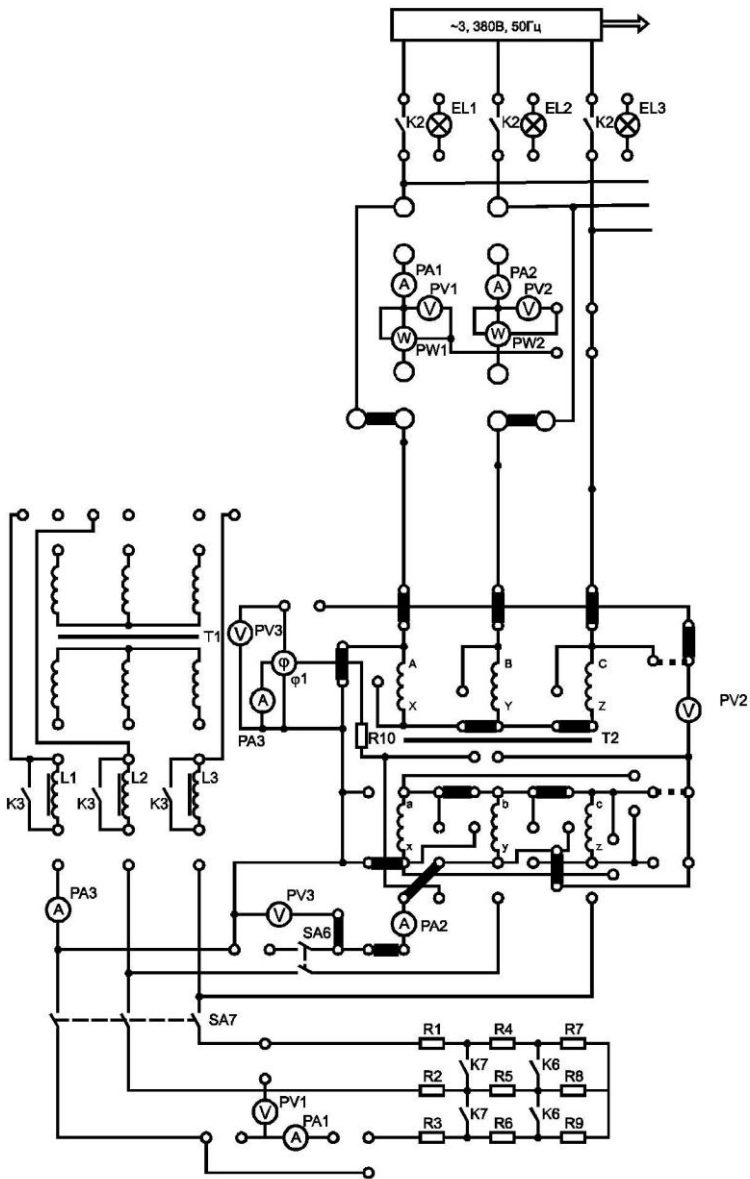


Рис. 2.5. Соединение обмоток трансформатора по схеме «обратная звезда». Метод вольтметра

**2.4.4. Соединение вторичной обмотки
в схему «обратная звезда». Метод фазометра. Все тумблеры
на лицевой панели в нижнем положении**

Собрать схему рис. 2.6. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2. Записать показания фазометра. Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

**2.4.5. Соединение вторичной обмотки
в схему «прямой треугольник». Метод вольтметра. Все тумблеры
на лицевой панели в нижнем положении**

Собрать схему рис. 2.7. Вольтметр pV2 подсоединить к выводам трансформатора bB. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2, контакты которой подключат испытуемый трансформатор к сети – 3×380 В, 50 Гц. Записать показания приборов pV3 (U_{ab}) и pV2 (U_{bB}). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Вольтметр pV2 подсоединить к выводам cC (см. рис. 2.7 – пунктирная линия). Кнопкой SB3 включить К2. Записать показание pV2 (U_{cC}). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

**2.4.6. Соединение вторичной обмотки
в схему «прямой треугольник». Метод фазометра. Все тумблеры
на лицевой панели в нижнем положении**

Собрать схему рис. 2.8. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB1 подать питание на катушку пускателя К2. Записать показания фазометра. Кнопкой SB2 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

**2.4.7. Соединение вторичной обмотки
в схему «обратный треугольник». Метод
вольтметра. Все тумблеры на лицевой панели
в нижнем положении**

Собрать схему рис. 2.9. Вольтметр pV2 подсоединить к выводам трансформатора yB. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2,

контакты которой подключат испытуемый трансформатор к сети – $3 \times 380 \text{ В}$, 50 Гц. Записать показания приборов $pV3 (U_{xy})$ и $pV2 (U_{yB})$. Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Вольтметр $pV2$ подсоединить к выводам zC (см. рис. 2.9 – пунктирная линия). Кнопкой SB3 включить К2. Записать показание $pV2 (U_{zC})$. Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

**2.4.8. Соединение вторичной обмотки
в схему «обратный треугольник». Метод
фазометра. Все тумблеры на лицевой панели
в нижнем положении**

Собрать схему рис. 2.10. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2. Записать показания фазометра. Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

Контрольные вопросы

1. Какие могут быть типы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов?
2. Как определяют с помощью вольтметра группу соединения обмоток трехфазного трансформатора?
3. Чем определяется группа соединения трансформатора?
4. Какие группы соединения могут быть получены при одинаковой схеме соединения обмоток ВН и НН?
5. Какие группы соединения называют основными, а какие – производными?
6. Каким образом из основных групп соединения можно получить производные?
7. Перечислите группы соединения, предусмотренные ГОСТ, нарисуйте соответствующие им схемы соединения обмоток и топографические диаграммы.
8. В чем состоит метод фазометра при определении группы соединения трансформатора?
9. С какой целью при определении группы соединения по методу вольтметра соединяют выводы А-а (см. рис. 2.2, а)?

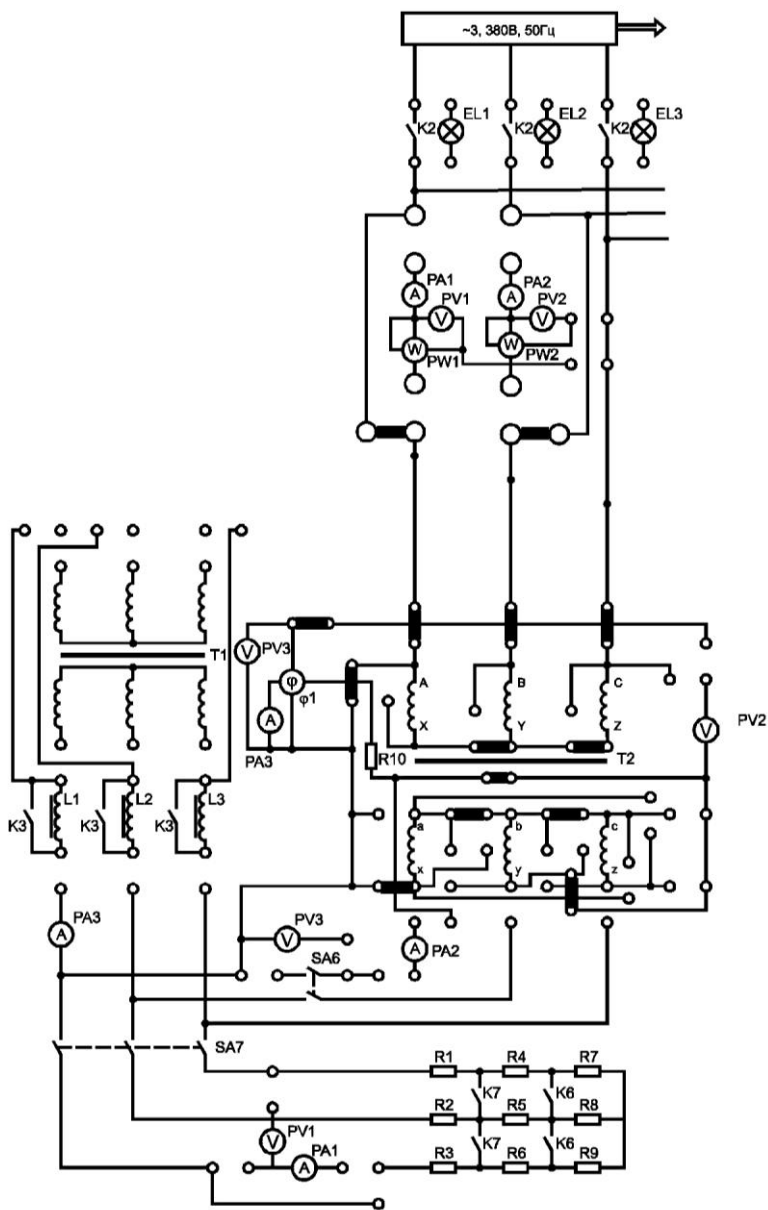


Рис. 2.6. Соединение обмоток трансформатора по схеме «обратная звезда». Метод фазометра

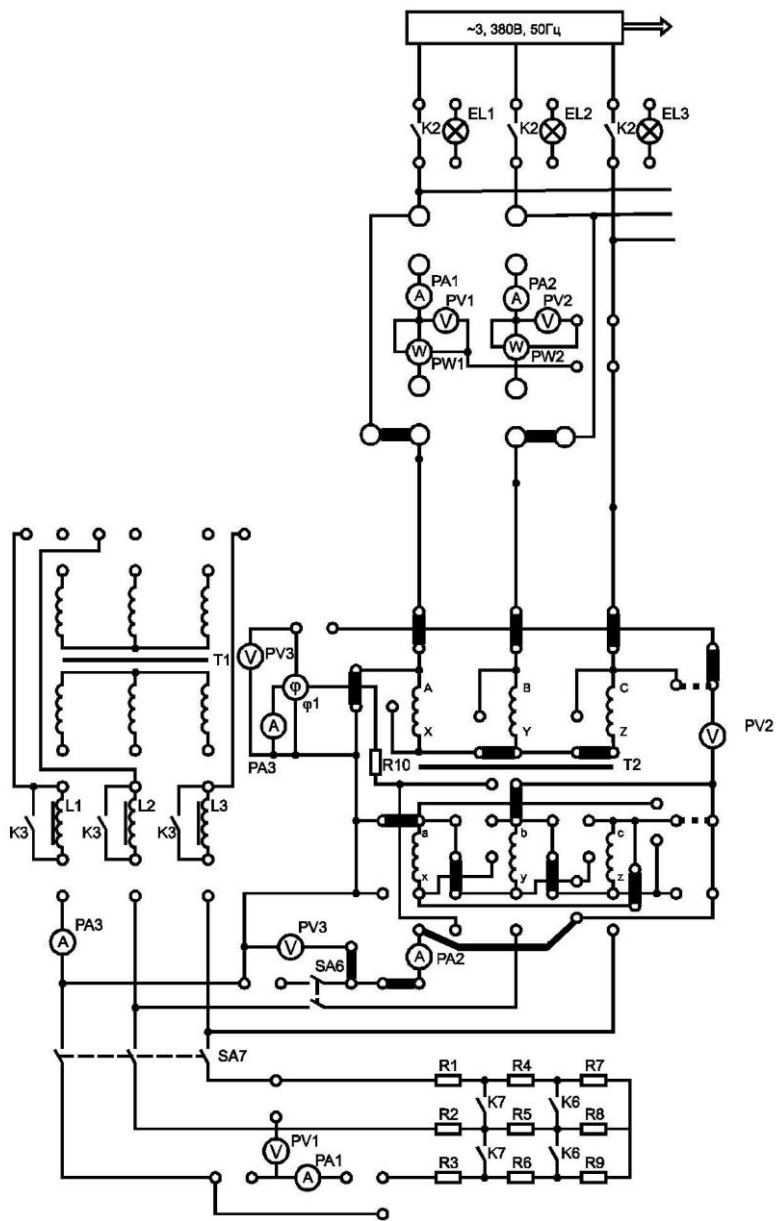


Рис. 2.7. Соединение обмоток трансформатора по схеме «прямой треугольник». Метод вольтметра

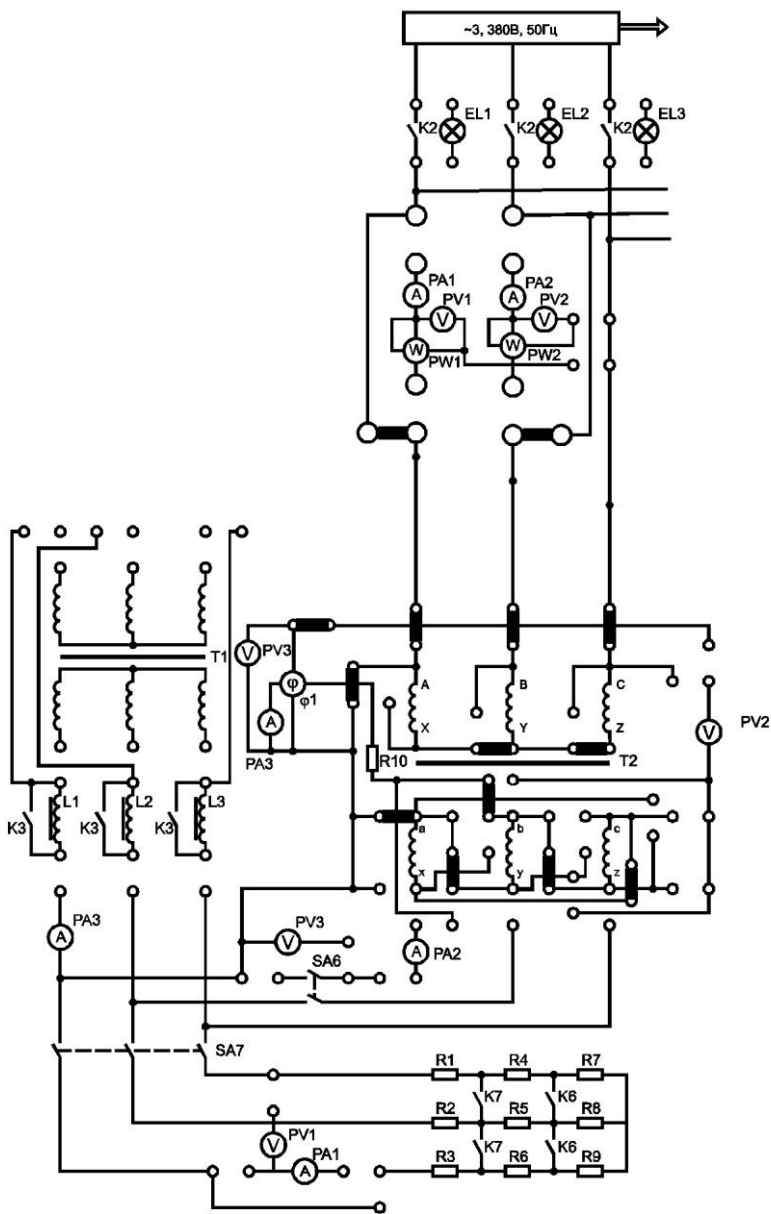


Рис. 2.8. Соединение обмоток трансформатора по схеме «прямой треугольник». Метод фазометра

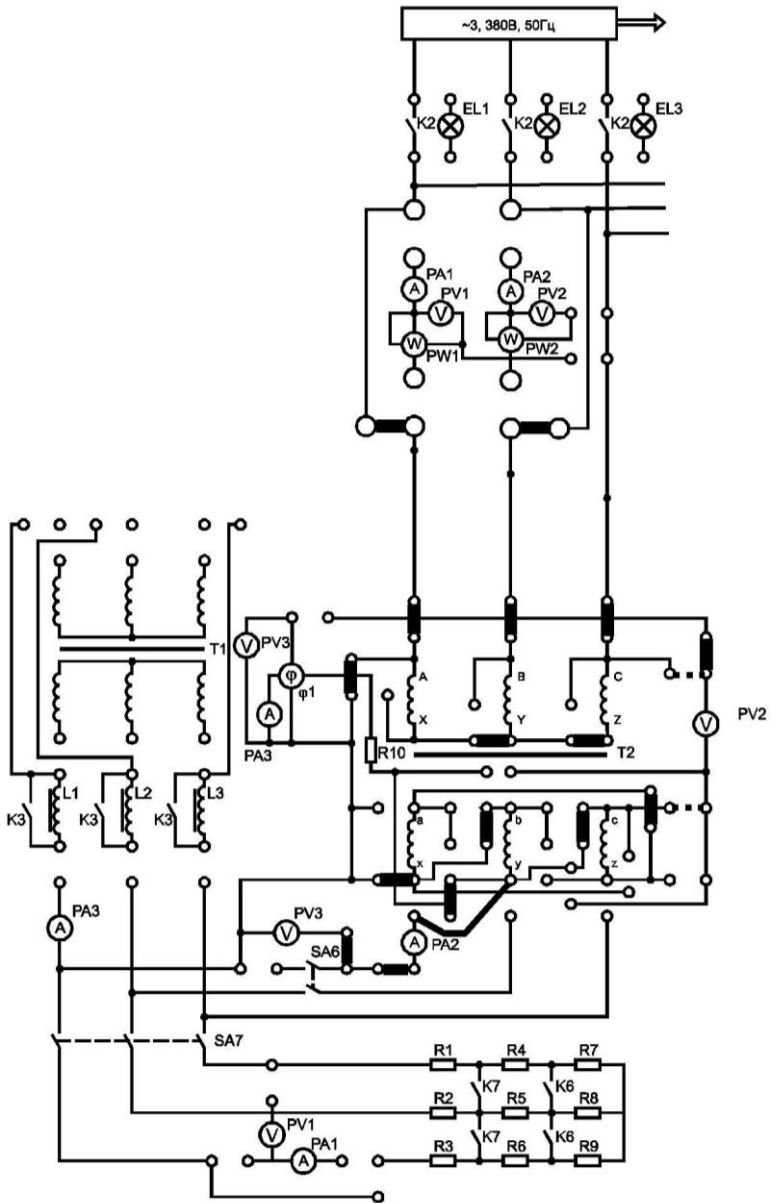


Рис. 2.9. Соединение обмоток трансформатора по схеме «обратный треугольник». Метод вольтметра

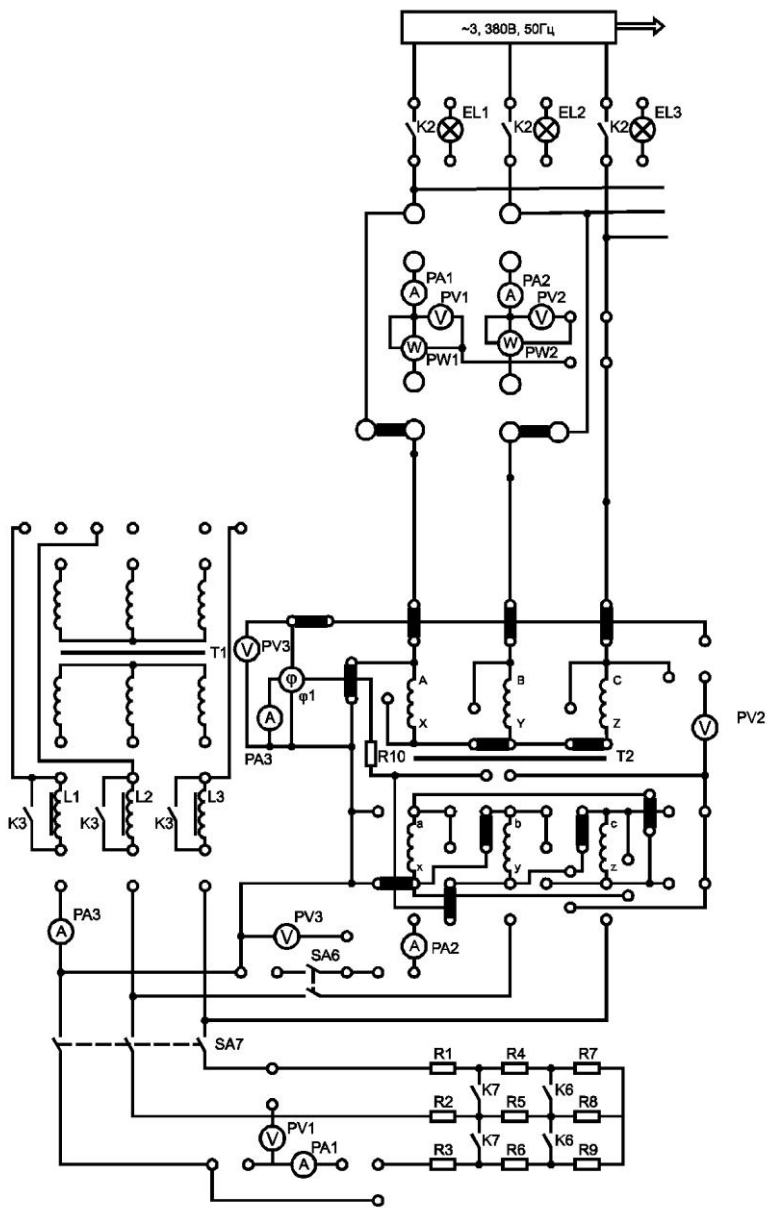


Рис. 2.10. Соединение обмоток трансформатора по схеме «обратный треугольник». Метод фазометра

Лабораторная работа № 3

Исследование параллельной работы трёхфазных двухобмоточных трансформаторов

3.1. Цель работы:

- изучение условий включения трансформаторов на параллельную работу и принципа распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами;
- приобретение практических навыков по включению трехфазных трансформаторов на параллельную работу.

3.2. Краткие теоретические сведения

Параллельная работа двух или нескольких трансформаторов состоит в параллельном соединении их обмоток, как на первичной, так и на вторичной сторонах. При параллельном соединении одноименные зажимы трансформаторов присоединяют к одному и тому же проводу сети. Применение нескольких параллельно включенных трансформаторов вместо одного трансформатора суммарной мощности необходимо для обеспечения бесперебойного энергоснабжения в случае аварии в каком-либо трансформаторе или отключения его для ремонта. Это также целесообразно при работе трансформаторной подстанции с переменным графиком нагрузки, когда мощность нагрузки значительно меняется в различные часы суток. В этом случае при уменьшении нагрузки можно отключить один или несколько трансформаторов для того, чтобы нагрузка оставшихся включенными трансформаторов была близка к номинальной. В итоге эксплуатационные показатели работы трансформаторов (КПД и $\cos \varphi_2$) будут сохраняться достаточно высокими. Для того чтобы нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределялась пропорционально их номинальным мощностям, допускается параллельная работа двухобмоточных трансформаторов при следующих условиях:

1) трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации, т. е. при одинаковых первичных напряжениях вторичные напряжения трансформаторов должны быть равны;

2) трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения;

3) трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения к.з.;
 4) схема соединений при включении трансформаторов должна обеспечивать одинаковый порядок следования фаз как на стороне ВН, так и на стороне НН.

Помимо этого рекомендуется, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов, включенных для параллельной работы, было не более чем 3:1.

Нарушение первого и второго условий вызывает появление больших уравнивающих токов между обмотками трансформаторов, что ведет к чрезмерному перегреву трансформаторов, т. е. делает их совместную работу невозможной. Что же касается третьего условия, то неравенство напряжений к.з. трансформаторов более чем на 10% от их среднего значения ведет к тому, что распределение нагрузки между трансформаторами становится в значительной степени непропорциональной их номинальным мощностям.

Равенство коэффициентов трансформации и напряжений к.з. обеспечивается подбором трансформаторов по их паспортным данным. Коэффициенты трансформации $K_{\text{тр}1}$ и $K_{\text{тр}2}$ не должны различаться более чем на $\pm 0,5\%$ от их среднего значения:

$$\Delta K = \frac{K_{\text{тр}1} - K_{\text{тр}2}}{K_{\text{тр}}} \cdot 100 \leq \pm 0,5\% , \quad (3.1)$$

где $K_{\text{тр}} = \sqrt{K_{\text{тр}1} \cdot K_{\text{тр}2}}$ – среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации.

Напряжения к.з. u_{k1} и u_{k2} не должны различаться более, чем на $\pm 10\%$ от их среднего значения:

$$\Delta u_k = \frac{u_{k1} - u_{k2}}{u_k} \cdot 100 \leq \pm 10\% , \quad (3.2)$$

где $u_k = \frac{u_{k1} + u_{k2}}{2}$ – среднее арифметическое значение напряжений к.з.

Прежде чем подключить трансформаторы на параллельную работу, т. е. включить рубильник QS3, при замкнутом рубильнике QS1 (рис. 3.1) необходимо провести фазировку трансформаторов, т. е. проверку соответствия фаз вторичных эдс трансформаторов Тр1 и Тр2. Для этого соединяют проводом одну пару противоположных клемм рубильника 3 и вольтметром pV1 измеряют напряжение между двумя несоединенными парами противоположных

клемм рубильника 3. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра pV1 равны нулю. В этом случае рубильник 3 можно замкнуть, т. е. включить трансформаторы на параллельную работу. Если же вольтметр pV1 показывает некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено (обычно это нарушение одинакового порядка следования фаз), устранить его и вновь провести фазировку трансформаторов.

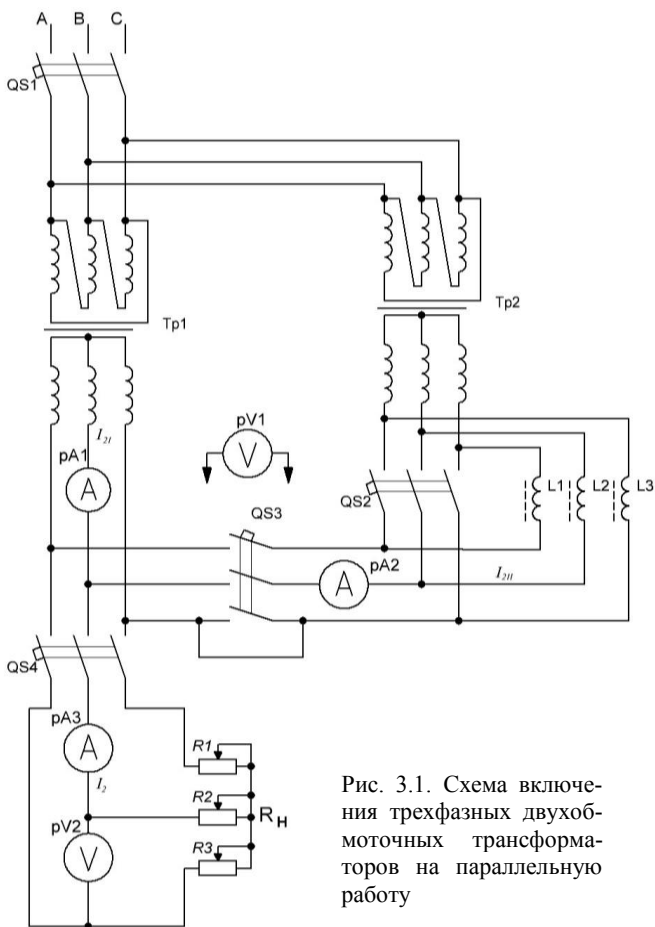


Рис. 3.1. Схема включения трехфазных двухобмоточных трансформаторов на параллельную работу

3.3. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Произведите фазировку трансформаторов.
2. Снимите данные и постройте внешнюю характеристику при

$$u_{k1} = u_{k2}.$$

3. Снимите данные и постройте внешнюю характеристику при

$$u_{k1} = u_{k2}.$$

3.4. Порядок работы с лабораторной установкой

3.4.1. Фазировка

Собрать схему рис. 3.2. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя K2, контакты которой подключат испытуемые трансформаторы к сети – 3×380 В, 50 Гц. Включить SA2 – контакты пускателя K3 зашунтируют дроссели L1 – L3. При выключенном SA6 вольтметр pV3 должен показывать 0. Перейти к выполнению п. 3.4.2.

3.4.2. Снятие внешней характеристики при $u_{k1} = u_{k2}$

Тумблером SA6 включить трансформаторы на параллельную работу. Выключателем SA7 подключить нагрузку. Установить переключатель SA5 в крайнее левое положение. Нагрузка в этом случае симметрична и равна $R1 + R4 + R7 = R2 + R5 + R8 = R3 + R6 + R9$. Снять показания приборов pV1, pA1. Установить переключатель SA5 в среднее положение. Нагрузка в этом случае симметрична и равна $R1 + R4 = R2 + R5 = R3 + R6$. Снять показания приборов pV1, pA1. Установить переключатель SA5 в крайнее правое положение. Нагрузка в этом случае симметрична и равна $R1 = R2 = R3$. Снять показания приборов pV1, pA1. Перевести переключатель SA5 в крайнее левое положение и перейти к выполнению п. 3.4.3.

3.4.3. Снятие внешней характеристики при $u_{k1} = u_{k2}$

Переключателем SA2 обесточить катушку пускателя K3 – дроссели L1 – L3 введены. Снять показания приборов pV1, pA1. Установить переключатель SA5 в среднее положение. Нагрузка в этом случае симметрична и равна $R1 + R4 = R2 + R5 = R3 + R6$. Снять

показания приборов $pV1$, $pA1$. Установить переключатель SA5 в крайнее правое положение. Нагрузка в этом случае симметрична и равна $R1 = R2 = R3$. Снять показания приборов $pV1$, $pA1$. Перевести переключатель SA5 в крайнее левое положение. Выключить SA7, SA6, кнопкой SB4 обесточить K2, выключить автоматический выключатель «Сеть».

Контрольные вопросы

1. С какой целью применяют параллельную работу трансформаторов?
2. Каковы условия включения трансформаторов на параллельную работу?
3. Почему не допускается включение на параллельную работу трансформаторов с разными группами соединения, даже при одинаковых вторичных напряжениях?
4. Каковы допуски на различие коэффициентов трансформации и напряжений к.з. для трансформаторов, включаемых на параллельную работу?
5. Что такое фазировка трансформаторов, для чего и как она выполняется?
6. От чего зависит распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами?

Лабораторная работа № 4

Исследование генератора постоянного тока независимого и параллельного возбуждения

4.1. Цель работы:

- изучить устройство генератора постоянного тока независимого и параллельного возбуждения и приобрести практические навыки в сборке схем и снятии характеристик;
- получить экспериментальное подтверждение свойств генератора постоянного тока независимого и параллельного возбуждения по теоретическим сведениям.

4.2. Теоретические сведения

Классификация генераторов постоянного тока производится по способу их возбуждения. Они подразделяются на генераторы с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

У генераторов с самовозбуждением обмотка возбуждения получает питание от собственного якоря. В зависимости от способа ее включения генераторы с самовозбуждением подразделяются на генераторы с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Согласно ГОСТ 183–74 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 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.

4.3. Основные теоретические сведения

4.3.1. Общие положения

Генераторы постоянного тока являются источниками постоянного тока, в которых осуществляется преобразование механической энергии в электрическую. Якорь генератора приводится во вращение каким-либо двигателем, в качестве которого могут быть использованы электрические двигатели, двигатели внутреннего сгорания и т. д.

Генераторы находят применение в тех отраслях промышленности, где по условиям производства необходим или является предпочтительным постоянный ток (металлургические и электролизные предприятия, транспорт и др.).

В последнее время в связи с развитием полупроводниковой техники для получения постоянного тока часто используют выпрямительные установки, но, несмотря на это, генераторы продолжают находить широкое применение.

Классификация генераторов постоянного тока производится по способу их возбуждения. Они подразделяются на генераторы с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

Генератор постоянного тока независимого возбуждения выполняется с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением.

В генераторах с электромагнитным возбуждением обмотка возбуждения, располагаемая на главных полюсах, подключается к независимому источнику питания. Ток цепи возбуждения может изменяться в широких пределах. Мощность, потребляемая обмоткой возбуждения, невелика и в номинальном режиме составляет 1–5% номинальной мощности, снимаемой с якоря генератора. Обычно процентное значение мощности возбуждения уменьшается с возрастанием номинальной мощности машины.

Магнитоэлектрические генераторы возбуждаются постоянными магнитами, из которых изготавливаются полюсы машины. С таким видом возбуждения выполняются генераторы относительно небольшой мощности, которые применяются в специальных случаях. Недостатком генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением является трудность регулирования напряжения.

В настоящее время электромашиностроительные заводы изготавливают электрические машины постоянного тока, предназначенные для работы в самых различных отраслях промышленности, поэтому отдельные узлы этих машин могут иметь разную конструкцию, но общая конструктивная схема машин одинакова. Неподвижная часть машины постоянного тока называется статором, вращающаяся часть – якорем.

В машине постоянного тока (рис. 4.1) обмотка якоря расположена на роторе, а обмотка возбуждения – на статоре. Машина постоянного тока имеет на якоре коллектор, а на статоре помимо главных полюсов с обмоткой возбуждения – добавочные полюсы, которые служат для уменьшения искрения под щетками.

Статор состоит из станины и главных полюсов. Станина служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготавливают из стали – материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы для крепления машины к фундаментальной плите.

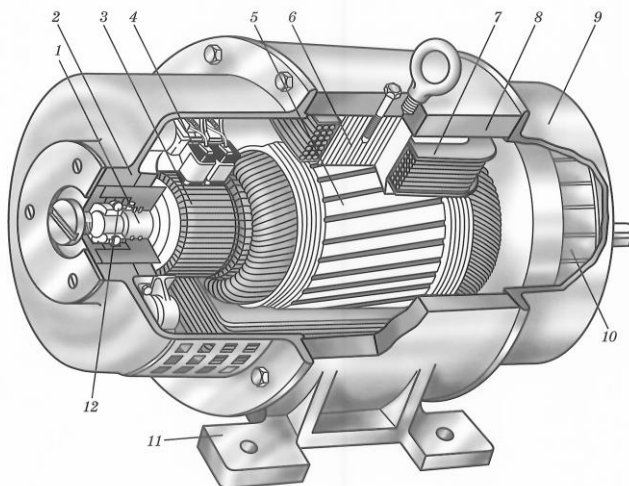


Рис. 4.1. Устройство машины постоянного тока:
 1 – вал; 2 – передний подшипниковый щит; 3 – коллектор; 4 – щеткодержатели со щетками; 5 – якорь; 6 – главный полюс; 7 – обмотка возбуждения; 8 – станина; 9 – задний подшипниковый щит; 10 – вентилятор; 11 – лапы; 12 – подшипник

На статоре расположены главные и добавочные полюсы с катушками обмотки возбуждения. Полюсы крепят болтами к стальному корпусу, который является частью магнитной цепи машины. Главные и добавочные полюсы выполняют из стальных штампованных листов.

Главные полюсы предназначены для создания в машине магнитного поля возбуждения. Главный полюс состоит из сердечника и полюсной катушки. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали. Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка окисла на их поверхности достаточна для значительного ослабления вихревых токов, наведенных в полюсных наконечниках пульсациями магнитного потока, вызванного зубчатостью сердечника якоря. Анизотропная сталь обладает

повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при штамповке пластин и их сборке в пакет. Пониженная магнитная проницаемость поперек проката способствует ослаблению реакции якоря и уменьшению потока рассеяния главных и добавочных полюсов.

Катушки главных и добавочных полюсов изготавливают из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения. Катушки добавочных полюсов – из полосовой меди. Расположенную на полюсе обмотку иногда разбивают на несколько катушек (секций) для лучшего ее охлаждения. При секционном выполнении катушек между отдельными секциями устанавливают дистанционные шайбы из изоляционного материала, посредством которых образуются вентиляционные каналы.

В машинах постоянного тока небольшой мощности полюсные катушки делают бескаркасными – намоткой медного обмоточного провода непосредственно на сердечник полюса, предварительно наложив на него изоляционную прокладку. В большинстве машин (мощностью 1 кВт и более) полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса.

Якорь машины постоянного тока состоит из вала, сердечника с обмоткой и коллектора. Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию и набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали. Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывают обмотку якоря.

Обмотку якоря изготавливают из провода круглого или прямоугольного сечения; обычно она состоит из отдельных, заранее намотанных, якорных катушек, которые дополнительно изолируют и укладывают в пазы сердечника якоря. Обмотку выполняют двухслойной, в каждом пазу укладывают две стороны различных якорных катушек – одну поверх другой. Каждая якорная катушка включает в себя несколько секций, концы которых припаивают к соответствующим коллекторным пластинам; секции могут быть одновитковыми и многовитковыми.

Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом.

Коллектор выполняют в виде цилиндра, собранного из клинообразных пластин твердотянутой меди. Между пластинами располагают изоляционные прокладки из миканита. Узкие края коллекторных пластин имеют форму «ласточкина хвоста». Верхняя часть коллекторных пластин, называемая «*петушком*», имеет узкий продольный паз, в который закладывают проводники обмотки якоря и тщательно припаивают.

В машинах малой и средней мощности широко применяют коллекторы, в которых медные пластины и миканитовые прокладки запрессованы в пластмассу. Поверхность собранного коллектора обтачивают на токарном станке и тщательно шлифуют. Чтобы миканитовые прокладки при срабатывании коллектора не выступали над пластинами и не вызывали вибрации щеток, их фрезеруют на 0,8–1,5 мм ниже поверхности коллектора.

Электрический контакт с коллектором осуществляется посредством щеток, располагаемых в щеткодержателях. Щетки представляют собой прямоугольные бруски из материала, составленного на основе графитового порошка. При вращении якоря щетки сохраняют неизменное положение по отношению к полюсам машины.

Щеткодержатель состоит из обоймы, в которую помещают щетку, курка, представляющего собой откидную деталь, передающую давление пружины на щетку. Щеткодержатель крепят на пальце зажимом. Щетка снабжается гибким тросиком для включения ее в электрическую цепь машины. Все щеткодержатели одной полярности соединены между собой сборными шинами, подключенными к выводам машины. Одно из основных условий бесперебойной работы машины – плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором. Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим может вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточный нажим – искрение на коллекторе.

Помимо указанных частей машина постоянного тока имеет два подшипниковых щита – передний (со стороны коллектора) и задний. В центральной части щита имеется расточка под подшипник.

На переднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки не разбирая машины. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов. Вентилятор служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

Таким образом, коллекторная машина сложнее бесколлекторной машины переменного тока и, следовательно, уступает ей (особенно асинхронной машине) в надежности и имеет более высокую стоимость.

4.3.2. Принцип действия генератора постоянного тока

На рис. 4.2 изображена упрощенная модель такого генератора: между полюсами N и S постоянного магнита находится вращающаяся часть генератора – якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) – источником механической энергии. В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка $abcd$, концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. Щетки A и B осуществляют скользящий контакт с коллектором и связывают генератор с внешней цепью (нагрузка сопротивлением R).

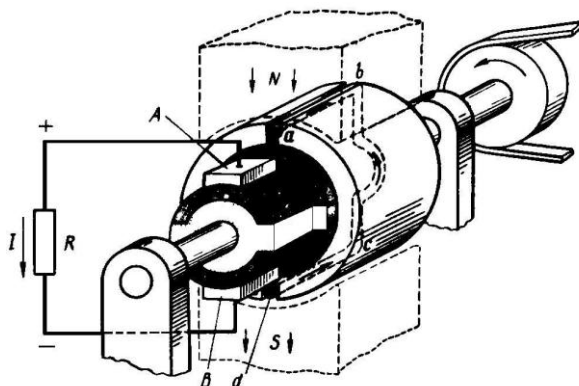


Рис. 4.2. Упрощенная модель коллекторной машины

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоре, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится эдс, мгновенное значение которой определяется формулой

$$e = B_x \cdot v_a \cdot l_a, \quad (4.1)$$

где B_x – индукция в рассматриваемой точке воздушного зазора;

v_a – окружная скорость якоря;

l_a – длина проводника в магнитном поле.

В процессе работы генератора якорь вращается и виток $abcd$ занимает разное пространственное положение, поэтому в *обмотке якоря наводится переменная эдс*. Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке R) был бы переменным, но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в пульсирующий ток во внешней цепи генератора, т. е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки A к щетке B ; следовательно, щетка A является положительной, а щетка B – отрицательной. После поворота якоря на 180° направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а следовательно, и направление тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными. Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой A всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом, а под щеткой B – пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от положения витка якоря. Что же касается пульсаций тока во внешней цепи, то они намного ослабляются при увеличении числа витков в обмотке якоря при их равномерном распределении по поверхности якоря и соответствующем увеличении числа пластин в коллекторе.

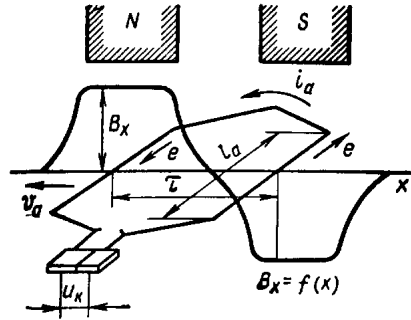
Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока – изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

Обозначим буквой N число активных проводников обмотки и рассчитаем эдс якоря E , в предположении, что шаг секции y_l равен

поллюсному делению τ и щетки установлены на геометрической нейтрали (рис. 4.3). Тогда эдс всех $N/2a$ проводников параллельной ветви, расположенных под одним полюсом, складываются арифметически:

$$E = \sum_1^{N/(2a)} e = v_a \cdot l_a \sum_1^{N/(2a)} B_x. \quad (4.2)$$

Рис. 4.3. Кривые распределения индукции вдоль окружности якоря и напряжение U_K по коллектору



При достаточно большом числе коллекторных пластин можно пренебречь пульсацией эдс и считать, что

$$\sum_1^{N/(2a)} B_x = \frac{N}{2 \cdot a} \cdot B_{cp}, \quad (4.3)$$

где B_{cp} – среднее значение индукции в пределах полюсного деления τ ,

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_a}{2p}. \quad (4.4)$$

Учитывая, что

$$B_{cp} \cdot \tau \cdot l_a = \Phi, \quad (4.5)$$

$$v_a = \frac{\pi \cdot D_a \cdot n}{60}, \quad (4.6)$$

получим

$$E = \frac{p \cdot N_a}{60 \cdot a} \cdot n \cdot \Phi = c_e \cdot n \cdot \Phi, \quad (4.7)$$

где c_e – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами машины и не зависящий от режима ее работы:

$$c_e = \frac{p \cdot N_a}{60 \cdot a}. \quad (4.8)$$

На якорь, по обмотке которого проходит ток I_a , действует электромагнитный момент:

$$M = \frac{F_{рез} \cdot D_a}{2}, \quad (4.9)$$

где $F_{рез}$ – результирующая электромагнитная сила, возникающая при взаимодействии тока с магнитным полем.

Сила $F_{рез}$ представляет собой сумму усилий f_x , приложенных ко всем активным проводникам обмотки якоря. При достаточно большом числе коллекторных пластин силу $F_{рез}$ можно считать постоянной:

$$F_{рез} = \sum_1^N f_x = \frac{N \cdot B_{cp} \cdot l_a \cdot I_a}{2 \cdot a}. \quad (4.10)$$

С учетом значений B_{cp} электромагнитный момент определяется по формуле

$$M = \frac{p \cdot N \cdot \Phi \cdot I_a}{2 \cdot \pi \cdot a} = c_m \cdot \Phi \cdot I_a, \quad (4.11)$$

где c_m – коэффициент, зависящий от конструктивных параметров машины;

$$c_m = \frac{p \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a}. \quad (4.12)$$

При работе машины в генераторном режиме электромагнитный момент является тормозным.

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

Напряжение на выводах генератора всегда будет меньше наводимой в обмотке якоря эдс E на значение падения напряжения:

$$U = E - I_a \cdot \sum r_a - \Delta U_{щ}. \quad (4.13)$$

Падение напряжения в цепи якоря состоит из двух составляющих: $I_a \cdot \sum r_a$ – падения напряжения в обмотках, $\Delta U_{щ}$ – падения напряжения в щеточном контакте. Сопротивление $\sum r_a$ включает в себя сопротивления обмотки якоря и всех последовательно соединенных с ней обмоток. В общем случае

$$\sum r_a = r_a + r_d + r_c + r_k, \quad (4.14)$$

где $r_a, r_\partial, r_c, r_k$ – сопротивления обмоток: якоря, дополнительных полюсов, последовательной (серийной) и компенсационной.

В зависимости от конкретной схемы генератора часть сопротивлений в $\sum r_a$ будет отсутствовать.

Для приближенных расчетов уравнение (4.13) можно упростить:

$$U = E - I_a \cdot R_a, \quad (4.15)$$

где

$$R_a = \sum r_a + r_{щ}. \quad (4.16)$$

Переходное сопротивление щеточного контакта $r_{щ}$ приближенно принимается постоянным и равным

$$r_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_{a \text{ ном}}}. \quad (4.17)$$

Ток якоря генератора I_a обусловлен эдс E и всегда имеет с ней одинаковое направление:

$$I_a = \frac{E - U}{R_a}. \quad (4.18)$$

Уравнение баланса мощности получим, если правую и левую часть (4.13) умножим на ток I_a :

$$U \cdot I_a = E \cdot I_a - I_a^2 \cdot \sum r_a - \Delta U_{щ} \cdot I_a. \quad (4.19)$$

Произведение $E \cdot I_a = P_{эм}$ называется электромагнитной мощностью и представляет собой полную электрическую мощность, которая получается в результате преобразования механической мощности. Часть этой мощности расходуется в цепи якоря на электрические потери в обмотках $I_a^2 \cdot \sum r_a = P_{эа}$ и в переходном сопротивлении щеточного контакта $\Delta U_{щ} \cdot I_a = P_{эщ}$. Остальная часть мощности, равная произведению $U \cdot I_a = P_2$, является отдаваемой мощностью генератора.

В генераторах параллельного и смешанного возбуждения полезная мощность P_2 , отдаваемая в сеть, будет меньше на значение мощности, затрачиваемой на возбуждение:

$$P_2 = U_a \cdot I_a - P_g = U \cdot I_n. \quad (4.20)$$

От двигателя, приводящего во вращение якорь генератора, подводится механическая мощность P_1 . Большая часть этой мощности

преобразуется в электрическую $P_{эм}$, а другая ее часть расходуется в генераторе на покрытие механических потерь $P_{мх}$ (трение в подшипниках, вентиляцию), магнитных потерь в якоре P_m и добавочных потерь $P_δ$:

$$P_1 = P_{эм} + P_{мх} + P_m + P_δ. \quad (4.21)$$

Рассмотренное преобразование мощности в генераторах постоянного тока параллельного возбуждения для наглядности можно представить в виде энергетической диаграммы (рис. 4.4).

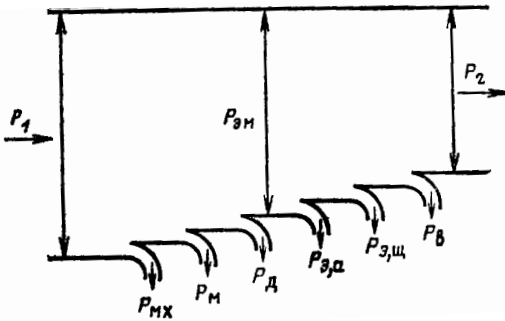


Рис. 4.4. Энергетическая диаграмма генератора параллельного возбуждения

Разделив правую и левую части уравнения (4.21) на угловую скорость якоря, получим уравнение момента:

$$\frac{P_1}{\omega} = \frac{P_{эм}}{\omega} + \frac{P_{мх} + P_m + P_δ}{\omega}, \quad (4.22)$$

или:

$$M_1 = M_{эм} + M_0. \quad (4.23)$$

Электромагнитный момент $M_{эм}$ в генераторе направлен против вращения якоря и равен:

$$M_{эм} = c_e \cdot I_a \cdot \Phi. \quad (4.24)$$

При увеличении тока I_a возрастает электромагнитный момент, а следовательно, момент и мощность, поступающие от двигателя.

4.4. Характеристики генератора постоянного тока независимого возбуждения

Рабочие свойства электрических машин определяются их характеристиками. Для генераторов постоянного тока основными характеристиками являются характеристики холостого хода, нагру-

зочная, внешняя, регулировочная. Указанные характеристики определяются при постоянной номинальной частоте вращения якоря ($n = n_{\text{ном}} = \text{const}$). Они могут быть получены как экспериментальным, так и расчетным путем.

4.4.1. Характеристика холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость эдс E на выводах генератора от тока возбуждения при разомкнутой цепи якоря.

В общем случае при изменении тока возбуждения сначала в одном направлении, а затем в другом эта зависимость, построенная в четырех квадрантах, имеет вид петли, показанной на рис. 4.5.

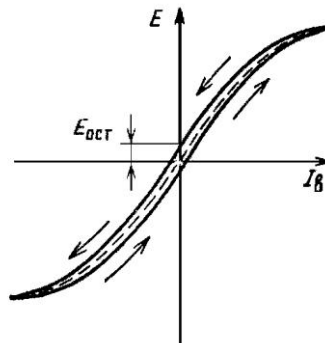


Рис. 4.5. Полная петля характеристики холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения

Несовпадение кривых, полученных при увеличении и уменьшении тока возбуждения, объясняется наличием гистерезиса в стали, из которой выполнена магнитная система машины. За расчетную характеристику принимается средняя кривая (на рис. 4.5 показана штриховой линией). При $I_e = 0$ в обмотке якоря наводится эдс $E_{ост}$, которая создается полем остаточного магнетизма статора и носит название эдс остаточного магнетизма. Она примерно равна 1–3% номинального напряжения машины.

Для практических целей обычно ограничиваются снятием части петли, которую получают, уменьшая ток I_e от максимального значения до нуля.

В начальной части характеристики холостого хода эдс изменяется пропорционально току возбуждения, а затем её рост за-

медляется, что объясняется насыщением стальных участков магнитной цепи.

Практическое значение характеристики холостого хода заключается в том, что по ней можно судить о степени насыщения магнитной цепи машины. Кроме того, эта характеристика необходима для построения других характеристик машины.

4.4.2. Характеристика короткого замыкания генератора постоянного тока независимого возбуждения

Характеристика короткого замыкания $I_a = f(I_e)$ при $U = 0$ и $n = \text{const}$ для генератора независимого возбуждения может быть снята только при питании обмотки возбуждения от постороннего источника.

Характеристика короткого замыкания снимается при замыкании выходных зажимов цепи якоря генератора накоротко. Так как $U = 0$, то

$$E_a = I_a \cdot R_a, \quad (4.25)$$

и так как R_a мало, то в условиях опыта эдс E_a также должна быть мала. Поэтому необходимо проявлять осторожность и начинать снятие характеристики короткого замыкания с минимальных значений I_e , чтобы ток якоря не превысил $(1,25-1,5) I_{\text{ном}}$.

Так как при снятии характеристики короткого замыкания электродвижущая сила мала и поэтому поток мал и машина не насыщена, то зависимость $I = f(I_e)$ практически прямолинейна (рис. 4.6). При $I_e = 0$ из-за наличия остаточного магнитного потока ток $I_a \neq 0$ и в крупных машинах близок к номинальному току или даже больше его.

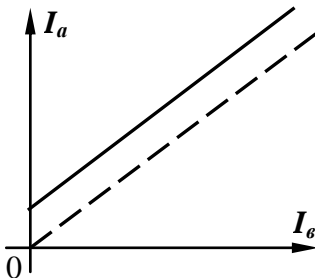


Рис. 4.6. Характеристика короткого замыкания генератора постоянного тока независимого возбуждения

В размагниченной машине характеристика короткого замыкания начинается с нуля (штриховая линия на рис. 4.6). Если характеристика короткого замыкания снята без предварительного размагничивания машины (сплошная линия на рис. 4.6), то ее также целесообразно перенести параллельно самой себе в начало координат.

4.4.3. Внешняя характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения

Эта характеристика является основной эксплуатационной характеристикой генератора. Она показывает, как изменяется напряжение U на выводах машины при возрастании тока нагрузки I_a , если при этом на цепь возбуждения не оказывается никакого воздействия. Для генератора независимого возбуждения внешнюю характеристику $U = f(I_a)$ получают при $I_g = \text{const}$, $R_g = \text{const}$ и $n = \text{const}$, т. е. без регулирования в цепи возбуждения, при естественных условиях работы. С помощью реостата R_g устанавливают ток возбуждения $I_g = I_{g \text{ ном}}$ таким, чтобы при номинальном токе нагрузки $I_{\text{ном}}$ напряжение на выводах машины было номинальным. Изменяя ток нагрузки, получают другие точки внешней характеристики (рис. 4.7).

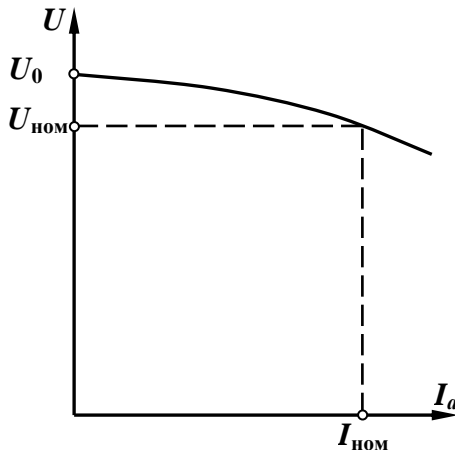


Рис. 4.7. Внешняя характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения (рабочая область)

Ток возбуждения, соответствующий $U = U_{\text{ном}}$, при $I = I_{\text{ном}}$ называется номинальным током возбуждения $I_{g \text{ ном}}$. В процессе эксперимента этот ток поддерживается постоянным.

По внешней характеристике определяют номинальное изменение напряжения ΔU . Обычно его выражают в процентах номинального напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% , \quad (4.26)$$

где $\Delta U = 10\text{--}15\%$ для генераторов независимого возбуждения.

4.4.4. Регулировочная характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения

Как следует из рассмотрения внешней характеристики генератора, при изменении нагрузки напряжение на его выводах не остается постоянным. Для того чтобы сохранить напряжение неизменным, необходимо регулировать ток возбуждения. Закон регулирования тока возбуждения для сохранения неизменным напряжения при изменении нагрузки дает регулировочная характеристика (рис. 4.8), представляющая собой зависимость $I_e = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

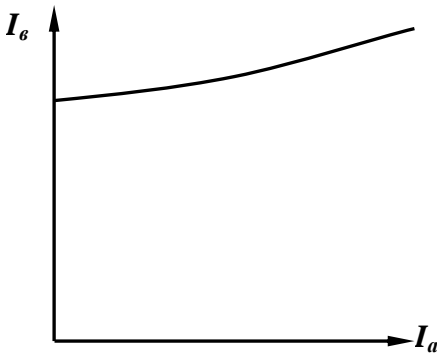


Рис. 4.8. Регулировочная характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения

Регулировочную характеристику начинают снимать с режима холостого хода, когда ток нагрузки $I_a = 0$. При увеличении тока нагрузки ток возбуждения I_e необходимо несколько увеличивать, чтобы компенсировать уменьшение напряжения из-за падения напряжения в цепи якоря и размагничивающего действия реакции якоря.

4.4.5. Нагрузочная характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения

Практическое значение нагрузочной характеристики состоит в том, что она позволяет количественно определить размагничивающее действие реакции якоря и исследовать зависимость ее от насыщения машины и тока якоря.

Эта характеристика представляет собой зависимость $U = f(I_a)$ при условии, $I_f = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

Ток возбуждения изменяют в сторону уменьшения, начиная от максимального его значения.

Для сопоставления и дальнейших построений нагрузочную характеристику 2 удобно построить на одном графике с нисходящей ветвью характеристики холостого хода 1 (рис. 4.9). Характеристику холостого хода можно рассматривать как частный случай нагрузочной характеристики при $I_a = 0$.

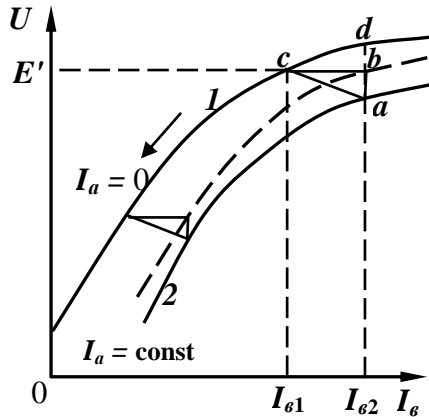


Рис. 4.9. Нагрузочная характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения

Нагрузочная характеристика располагается ниже характеристики холостого хода из-за падения напряжения в цепи якоря и размагничивающего действия реакции якоря, которые уменьшают поток и эдс машины.

Составляющую реакции якоря, оказывающую воздействие на поток и эдс машины, можно найти следующим образом. Добавив к напряжению нагрузочной характеристики падение напряжения в цепи якоря ($I_a R_a$), получим зависимость эдс, наводимой в обмотке

якоря при нагрузке от тока возбуждения (штриховая кривая на рис. 4.9) (ток I_a равен току, при котором снималась нагрузочная характеристика).

Для получения одной и той же эдс E' при холостом ходе требуется ток возбуждения I_{e1} , а при нагрузке – ток I_{e2} . Разность этих токов идет на компенсацию размагничивающего действия реакции якоря. Отрезок bd соответствует уменьшению потока и эдс, навводимой в обмотке якоря.

В общем случае разность $(I_{e2} - I_{e1})$ пропорциональна алгебраической сумме размагничивающей составляющей поперечной реакции якоря F_{qd} и продольной реакции якоря F_d . При щетках, установленных на геометрической нейтрали, можно считать, что разность $(I_{e2} - I_{e1}) = I_{qd}$. Соединяя между собой точки a , b и c , получаем треугольник, носящий название «характеристического». Горизонтальный катет bc этого треугольника равен I_{qd} , а вертикальный ab равен $I_a R_a$.

Характеристический треугольник используется для построения других характеристик машины, при этом приближенно принимается, что оба его катета изменяются пропорционально току I_a .

4.5. Характеристики генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Рабочие свойства электрических машин определяются их характеристиками. Для генераторов постоянного тока основными характеристиками являются характеристики холостого хода, нагрузочная, внешняя, регулировочная. Указанные характеристики определяются при постоянной номинальной частоте вращения якоря ($n = n_{\text{ном}} = \text{const}$). Они могут быть получены как экспериментальным, так и расчетным путем.

Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения происходит при соблюдении следующих условий:

- 1) наличия остаточного магнитного потока полюсов;
- 2) правильного подключения концов обмотки возбуждения или правильного направления вращения;
- 3) сопротивление цепи возбуждения R_e при данной скорости вращения n должно быть ниже некоторого критического значения или скорость вращения при данном R_e должна быть выше некоторой критической величины.

Для самовозбуждения достаточно, чтобы остаточный поток составлял 2–3% от номинального. Остаточный поток такой величины практически всегда имеется в уже работавшей машине. Вновь изготовленную машину или машину, которая по каким-либо причинам размагнитилась, необходимо намагнитить, пропуская через обмотку возбуждения ток от постороннего источника.

При соблюдении необходимых условий процесс самовозбуждения протекает следующим образом. Небольшая эдс, индуцируемая в якоре остаточным магнитным потоком, вызывает в обмотке возбуждения малый ток I_g . Этот ток вызывает увеличение потока полюсов, а следовательно, увеличение эдс, которая в свою очередь обуславливает дальнейшее увеличение тока возбуждения I_g , и т. д. Такой лавинообразный процесс самовозбуждения продолжается до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет установившегося значения.

Если подключение концов обмотки возбуждения или направление вращения неправильны, то возникает ток возбуждения I_g обратного направления, вызывающий ослабление остаточного потока и уменьшение эдс, вследствие чего самовозбуждение невозможно. Тогда необходимо переключить концы обмотки возбуждения или изменить направление вращения. В соблюдении этих условий можно убедиться, следя с помощью вольтметра с малым пределом измерения напряжения якоря при замыкании и размыкании цепи возбуждения.

На рис. 4.10 кривая 1 представляет собой характеристику холостого хода, а прямая 2 – так называемую характеристику цепи возбуждения, или зависимость

$$U_g = I_g \cdot R_g, \quad (4.27)$$

где $R_g = \text{const}$ – сопротивление цепи возбуждения, включая сопротивление регулировочного реостата.

В процессе самовозбуждения $I_g \neq \text{const}$ и напряжение на концах цепи возбуждения

$$U_g = I_g \cdot R_g + \frac{L_g dI_g}{dt}, \quad (4.28)$$

где L_g – индуктивность цепи возбуждения.

Напряжение якоря при холостом ходе изображается на рис. 4.10 кривой 1 и определяется по формуле

$$U_a = E_a - I_g \cdot R_a. \quad (4.29)$$

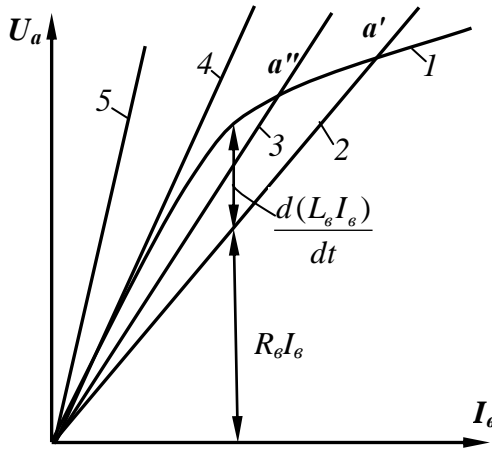


Рис. 4.10. Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения при различных сопротивлениях цепи возбуждения

Но в генераторе параллельного возбуждения $U_a = U_e$. Поэтому разность ординат кривой 1 и прямой 2 на рис. 4.10 составляет $\frac{L_e dI_e}{dt}$ и характеризует скорость и направление изменения I_e . Если прямая 2 проходит ниже кривой 1, то $\frac{L_e dI_e}{dt} > 0$, т.е. ток возбуждения I_e растет и машина самовозбуждается до напряжения, соответствующего на рис. 4.10 точке пересечения кривой 1 и прямой 2, в которой $\frac{L_e dI_e}{dt} = 0$ и рост I_e поэтому прекратится.

Так как I_e мало, то практически $U_a = E_a$.

Из этого следует, что нарастание I_e и, следовательно, U_a сначала происходит медленно, затем ускоряется и к концу процесса вновь замедляется. Начавшийся процесс самовозбуждения прекращается или ограничивается в точке a' вследствие криволинейности характеристики холостого хода.

Если R_e увеличить, то вместо прямой 2 получим прямую 3 (см. рис. 4.10). Процесс самовозбуждения при этом замедляется и напряжение машины, определяемое точкой a'' , будет меньше. При дальнейшем увеличении R_e получим прямую 4, касательную к кри-

вой I . При этом машина будет находиться на грани самовозбуждения. При небольших изменениях n или R_e (например, вследствие нагревания) машина может развивать небольшое напряжение или терять его. Значение R_e , соответствующее прямой 4, называется критическим ($R_{e\text{кр}}$). При $R_e > R_{e\text{кр}}$ (прямая 5) самовозбуждение невозможно и напряжение машины определяется остаточным потоком.

Из сказанного следует, что генератор параллельного возбуждения может работать только при наличии определенного насыщения магнитной цепи. Посредством изменения R_e можно регулировать U до значения $U = U_{\min}$, соответствующего началу колена кривой характеристики холостого хода.

Для разных значений частот вращения n значения эдс E_0 изображены на рис. 4.11 кривыми 1, 2 и 3. Из этого рисунка видно, что при некотором значении R_e в случае кривой 1 имеем устойчивое самовозбуждение, при кривой 2 машина находится на грани самовозбуждения и при кривой 3 самовозбуждение невозможно. Поэтому для каждого данного значения R_e существует такое значение частоты вращения $n = n_{\text{кр}}$ (кривая 2 на рис. 4.11), ниже которого самовозбуждение невозможно. Такое значение $n = n_{\text{кр}}$ называется критической частотой вращения.

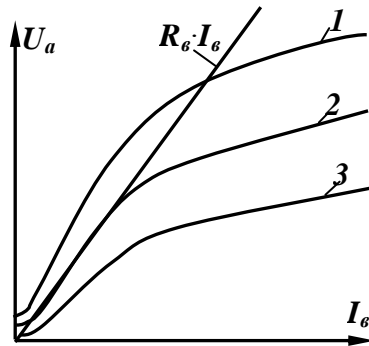


Рис. 4.11. Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения при различных скоростях вращения

4.5.1. Характеристика самовозбуждения

Характеристика самовозбуждения представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора в режиме холостого хода $U_0 = E_0$ от частоты вращения n при неизменном сопротивлении цепи возбуждения.

Установив номинальное напряжение генератора при номинальной частоте вращения, постепенно уменьшают частоту вращения и снижают значения напряжения и частоты вращения якоря генератора. По этим показаниям строят характеристику самовозбуждения (рис. 4.12).

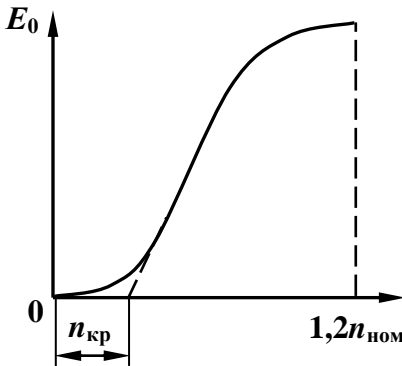


Рис. 4.12. Характеристики самовозбуждения генератора постоянного тока параллельного возбуждения

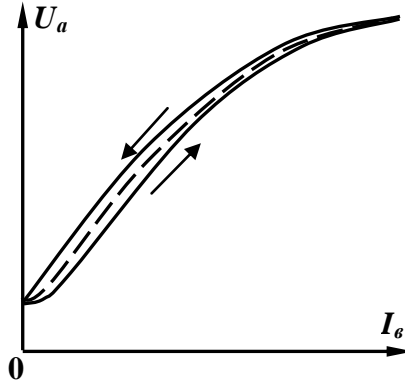
На некотором участке характеристики самовозбуждения, соответствующем небольшой частоте вращения, показания вольтметра не зависят от частоты вращения. Соответствующая этому явлению частота вращения называется критической $n_{кр}$. Самовозбуждение генератора возможно лишь при частоте вращения, превышающей критическую. Величина $n_{кр}$ зависит от сопротивления цепи возбуждения: с увеличением сопротивления величина $n_{кр}$ возрастает.

4.5.2. Характеристика холостого хода генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость эдс E на выводах генератора от тока возбуждения при разомкнутой цепи якоря.

Характеристика холостого хода $U = f(I_e)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ при параллельном возбуждении может быть снята только в одном квадранте (рис. 4.13) путем регулирования I_e с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения. Так как ток I_e мал, то $U_a = E_a$ и характер кривой характеристики холостого хода у генератора с параллельным возбуждением будет таким же, как и у генератора с независимым возбуждением.

Рис. 4.13. Характеристика холостого хода генератора постоянного тока параллельного возбуждения



Несовпадение кривых, полученных при увеличении и уменьшении тока возбуждения, объясняется наличием гистерезиса в стали, из которой выполнена магнитная система машины. За расчетную принимается средняя кривая (на рис. 4.13 показана штриховой линией). При $I_g = 0$ в обмотке якоря наводится эдс $E_{ост}$, которая создается полем остаточного магнетизма статора и носит название эдс остаточного магнетизма. Она примерно равна 1–3% номинального напряжения машины.

Для практических целей обычно ограничиваются снятием части петли, которую получают, уменьшая ток возбуждения I_g .

В начальной части характеристики холостого хода эдс изменяется пропорционально току возбуждения, а затем её рост замедляется, что объясняется насыщением стальных участков магнитной цепи.

Практическое значение характеристики холостого хода заключается в том, что по ней можно судить о степени насыщения магнитной цепи машины. Кроме того, эта характеристика необходима для построения других характеристик машины.

4.5.3. Характеристика короткого замыкания генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Характеристика короткого замыкания (рис. 4.14) $I_a = f(I_g)$ при $U = 0$ и $n = \text{const}$ для генератора параллельного возбуждения может быть снята только при питании обмотки возбуждения от постороннего источника, как и для генератора независимого возбуждения, так как при самовозбуждении при $U = 0$ также $I_g = 0$.

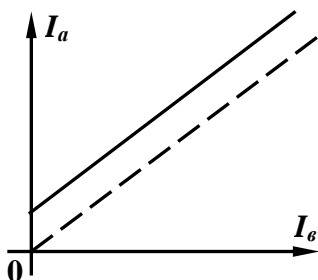


Рис. 4.14. Характеристика короткого замыкания генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Характеристика короткого замыкания снимается при замыкании выходных зажимов цепи якоря генератора накоротко. Так как $U = 0$, то

$$E_a = I_a \cdot R_a, \quad (4.30)$$

и так как R_a мало, то в условиях опыта эдс E_a также должна быть мала. Поэтому необходимо проявлять осторожность и начинать снятие характеристики короткого замыкания с минимальных значений I_e , чтобы ток якоря не превысил $I_{ак} = 1,25 - 1,5 \cdot I_{а ном}$.

Так как при снятии характеристики короткого замыкания электродвижущая сила мала и поэтому поток мал и машина не насыщена, то зависимость $I = f(I_e)$ практически прямолинейна (см. рис. 4.14). При $I_e = 0$ из-за наличия остаточного магнитного потока ток $I_a \neq 0$ и в крупных машинах близок к номинальному току или даже больше его.

В размагниченной машине характеристика короткого замыкания начинается с нуля (штриховая линия на рис. 4.14). Если характеристика короткого замыкания снята без предварительного размагничивания машины (сплошная линия на рис. 4.14), то ее также целесообразно перенести параллельно самой себе в начало координат.

4.5.4. Нагрузочная характеристика генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Эта характеристика представляет собой зависимость $U = f(I_e)$ при условии: $I_a = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Она идентична нагрузочной характеристике генератора постоянного тока независимого возбуждения (см. п. 4.4.5).

Можно снять ряд характеристик для различных значений тока якоря I_a путем изменения сопротивления в цепи якоря. Ток возбуждения изменяют в сторону уменьшения, начиная от максимального его значения.

4.5.5. Внешняя характеристика генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Внешняя характеристика $U = f(I)$ генератора параллельного возбуждения снимается при $R_e = \text{const}$ и $n = \text{const}$, т. е. без регулирования в цепи возбуждения, при естественных условиях работы.

С помощью реостата R_e устанавливают ток возбуждения $I_e = I_{e \text{ ном}}$ таким, чтобы при номинальном токе нагрузки $I_{\text{ном}}$ напряжение на выводах машины было номинальным. Изменяя ток нагрузки, получают другие точки внешней характеристики (рис. 4.15).

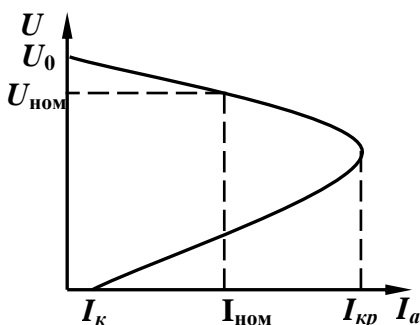


Рис. 4.15. Внешняя характеристика генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Характерной особенностью внешней характеристики генератора параллельного возбуждения является то, что при некотором максимальном значении тока $I = I_{кр}$ она делает петлю и приходит в точку I_k на оси абсцисс, которая соответствует установившемуся току короткого замыкания.

У генератора с параллельным возбуждением напряжение понижается не только из-за размагничивающего действия реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря, но и вследствие уменьшения тока возбуждения I_e .

Такой характер внешней характеристики объясняется тем, что генератор параллельного возбуждения сам себя размагничивает, так как уменьшается ток возбуждения. Вначале этот процесс протекает медленно, так как сталь машины насыщена и уменьшение

тока возбуждения не вызывает сильного снижения потока и ЭДС машины. Затем, когда ток возбуждения будет соответствовать линейной (ненасыщенной) части характеристики холостого хода, размагничивание будет происходить более интенсивно, так как уменьшение тока I_e будет вызывать большие изменения потока и ЭДС. При коротком замыкании машина практически будет размагничена и установившийся ток короткого замыкания I_k определяется только электродвижущей силой остаточного магнетизма. Вследствие малости этой ЭДС ток I_k в большинстве случаев невелик и не превышает номинального значения.

Однако, несмотря на это, в переходном режиме при внезапном коротком замыкании вследствие медленного спада потока и ЭДС мгновенный ток короткого замыкания достигает значений $I_{ak} = 5 - 15 \cdot I_{a \text{ ном}}$, что вызовет сильное искрение щеток, а в некоторых случаях и появление кругового огня. Поэтому эти генераторы, как и все другие генераторы, должны быть снабжены предохранителями или быстродействующими выключателями, отключающими короткозамкнутую цепь еще до того, как ток якоря достигнет больших значений.

Номинальное изменение напряжения генераторов параллельно возбуждения составляет 15–20%.

Построение внешней характеристики генератора параллельного возбуждения с помощью характеристики холостого хода и характеристического треугольника показано на рис. 4.16, где 1 – кривая характеристики холостого хода; 2 – характеристика цепи возбуждения $U_e = I_e \cdot R_e$ при заданном $R_e = \text{const}$ и 3 – построенная кривая внешней характеристики.

При $I_a = 0$ значение U определяется пересечением кривой 1 и прямой 2. Для получения значения U при $I_a = I_{a \text{ ном}}$ разместим характеристический треугольник для номинального тока так, чтобы его вершины a и b расположились на кривой 1 и прямой 2. Тогда точка b определит искомое значение U . Для других значений тока между 1 и 2 можно провести наклонные отрезки прямых, параллельные ab , которые представляют собой гипотенузы новых характеристических треугольников. Нижние точки этих отрезков b' , b'' и т. д. определяют U при токах:

$$I'_a = \frac{a'b'}{ab} \cdot I_{a \text{ ном}}. \quad (4.31)$$

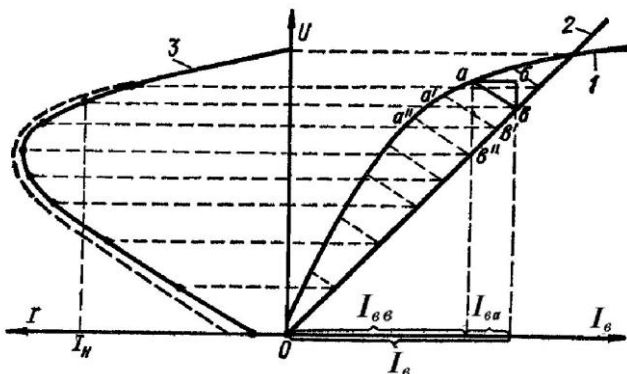


Рис. 4.16. Построение внешней характеристики генератора параллельного возбуждения с помощью характеристики холостого хода и характеристического треугольника

Перенеся все эти точки в левый квадрант рис. 4.16 и соединив их плавной кривой, получим искомую характеристику 3. С учетом нелинейной зависимости катета ab треугольника от тока опытная зависимость $U = f(I_e)$ имеет характер, показанный на рис. 4.16 слева штриховой линией.

4.5.6. Регулировочная характеристика генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Как следует из рассмотрения внешних характеристик генератора, при изменении нагрузки напряжение на его выводах не остается постоянным. Для того чтобы сохранить напряжение неизменным, необходимо регулировать ток возбуждения. Закон регулирования тока возбуждения для сохранения неизменным напряжения при изменении нагрузки дает регулировочная характеристика (рис. 4.17), представляющая собой зависимость $I_e = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

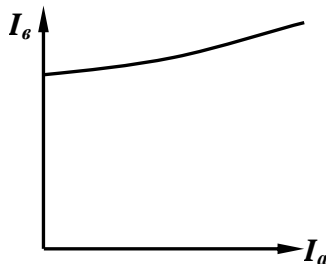


Рис. 4.17. Регулировочная характеристика генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Начинают снимать ее с холостого хода, когда ток нагрузки $I_a = 0$. При увеличении тока нагрузки ток возбуждения I_e необходимо несколько увеличивать, чтобы скомпенсировать уменьшение напряжения из-за падения напряжения и размагничивающего действия реакции якоря.

Задания на выполнение лабораторной работы

1. Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.

2. Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

3. Снять и построить характеристики холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения.

4. Снять и построить внешнюю характеристику генератора постоянного тока независимого возбуждения.

5. Снять и построить регулировочную характеристику генератора постоянного тока независимого возбуждения.

6. Снять и построить нагрузочную характеристику генератора постоянного тока независимого возбуждения.

7. Снять и построить характеристику самовозбуждения генератора постоянного тока параллельного возбуждения с различными сопротивлениями в цепи возбуждения. Определить критическую частоту вращения.

8. Снять и построить внешнюю характеристику генератора постоянного тока параллельного возбуждения. Определить номинальное изменение напряжения ΔU на якоре генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

9. Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

При анализе характеристики самовозбуждения необходимо указать полученное значение критической частоты вращения. Для внешней характеристики генератора нужно перечислить причины, вызывающие уменьшение напряжения на выходе генератора при росте нагрузки.

При анализе результатов необходимо сравнить параметры и данные генератора с паспортными данными.

Паспортные данные генератора 2ПН90Л 4ХЛ-4 6005: номинальная мощность $P = 0,55$ кВт; номинальная частота вращения $n = 1500$ об/мин; максимальная частота вращения $n_{\max} = 4300$ об/мин; номинальное напряжение цепи возбуждения и обмотки якоря

Опыт проводить в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1.

Включить обмотку статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по схеме «треугольник», для этого установить переключатель SA3 в положение «Включено».

Установить режим работы Инвертора:

- независимое управление – положение «Выключено»;
- $U/f = \text{const}$ – положение «Включено»;
- с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты 0 Гц.

Подключить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

При помощи регулятора «Задание частоты» плавно увеличить частоту вращения ротора асинхронного двигателя до номинального значения $\omega_1 = \omega_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору BR1):

- включить выключатель ШИП2 в положение «Включено»;
- с помощью регулятора «Задание тока» ШИП2 плавно увеличивать значение тока возбуждения машины М3 от нуля до значения, при котором эдс холостого хода $E_0 = 1,3 \cdot U_{\text{ном}}$, а затем постепенно уменьшать ток возбуждения машины М3 до нуля;
- измерить эдс генератора (машины М3) при разных значениях тока возбуждения (при намагничивании и размагничивании);
- данные занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Данные опыта холостого хода

№	Намагничивание				Размагничивание			
	I_{θ} , А	E_{θ} , В	I_{θ}^* , о.е.	E_{θ}^* , о.е.	I_{θ} , А	E_{θ} , В	I_{θ}^* , о.е.	E_{θ}^* , о.е.

Завершив эксперимент, необходимо:

- выключить выключатель SA1;
- выключить выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений и вычислений построить характеристику холостого хода $U = f(I_{\theta})$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ при намагничивании и размагничивании генератора.

Снятые показания приборов при увеличении тока возбуждения (при намагничивании) соответствуют восходящей ветви характеристики холостого хода, а при уменьшении тока возбуждения (при размагничивании) – нисходящей ветви.

Характеристику холостого хода принято строить в относительных единицах:

$$E_0^* = f(I_e^*), \quad (4.32)$$

где $E_0^* = E_0 / U_{\text{ном}}$, $I_e^* = I_e / I_{e \text{ ном}}$.

За характеристику холостого хода принимают среднюю линию, проведенную между восходящей и нисходящей ветвями характеристики.

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.

4.6.2. Исследование внешней характеристики

Опыт проводить по схеме (см. рис. 4.18) в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1.

Включить обмотку статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по схеме «треугольник», для этого установить переключатель SA3 в положение «Включено».

Установить режим работы Инвертора:

- независимое управление – положение «Выключено»;
- $U/f = \text{const}$ – положение «Включено»;
- установить выключатель PV1/PW1 в положение «PV1»;
- установить выключатель PV2/PW2 в положение «PW2»;
- установить выключатель PV3/φ в положение «PV3»;
- с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0$ Гц (контролировать по прибору HZ1).

Подключить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

При помощи регулятора «Задание частоты» плавно увеличить частоту вращения ротора асинхронного двигателя до номинального

значения частоты вращения генератора постоянного тока независимого возбуждения (машина М3) $\omega_1 = \omega_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору BR1). Отключить Инвертор;

– включить ШИП2 и установить номинальный ток возбуждения ($I_{\text{в ном}} = 0,45 \text{ A}$).

Включить режим работы ШИП1, «отключить замкнутую СУ», «включить задание скорости». Вывести рукоятку задания в крайнее левое положение. Включить ШИП1. Регулятором «Задание» ШИП1 разогнать М3 до номинальной скорости. Включить Инвертор. Подобрать задание ШИП1 и задание частоты Инвертора так, чтобы при $\omega_{\text{ном}}$ ток якоря был равным нулю;

– уменьшая задание ШИП1, снять внешнюю характеристику генератора (измерить ток якоря и напряжение генератора (машины М3) при разных значениях тока нагрузки), при этом скорость нужно поддерживать постоянной, увеличивая частоту Инвертора;

– данные занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Данные опыта внешней характеристики

№	1	2	3	4	5	6
I_a, A						
U_a, B						

Завершив эксперимент, необходимо:

– отключить ШИП1 – тумблер в положение «Выкл», вывести регулятор «Задание» ШИП1 в крайнее против часовой стрелки положение;

– вывести регулятор «задание тока» ШИП2 в крайнее против часовой стрелки положение, отключить ШИП2 – тумблер в положение «Выкл»;

– с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0 \text{ Гц}$ (контролировать по прибору HZ1);

– отключить асинхронный двигатель, нажав кнопку SB2;

Выключить выключатель SA1.

Выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений построить внешнюю характеристику генератора.

4.6.3. Исследование регулировочной характеристики

Опыт проводить по схеме (см. рис. 4.18) в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1.

Включить обмотку статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по схеме «треугольник», для этого установить переключатель SA3 в положение «Включено».

Установить режим работы Инвертора:

- независимое управление – положение «Выключено»;
- $U/f = \text{const}$ – положение «Включено»;
- установить выключатель PV1/PW1 в положение «PV1»;
- установить выключатель PV2/PW2 в положение «PW2»;
- установить выключатель PV3/φ в положение «PV3»;
- с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0$ Гц (контролировать по прибору HZ1);

Подключить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

При помощи регулятора «Задание частоты» плавно увеличить частоту вращения ротора асинхронного двигателя до номинального значения частоты вращения генератора постоянного тока независимого возбуждения (машина M3) $\omega_1 = \omega_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору BR1). Отключить Инвертор;

- включить ШИП2 и установить номинальный ток возбуждения ($I_{\text{б ном}} = 0,45$ А).

Включить режим работы ШИП1, «отключить замкнутую СУ», «включить задание скорости». Вывести рукоятку задания в крайнее левое положение. Включить ШИП1. Регулятором «Задание» ШИП1 разогнать M3 до номинальной скорости. Включить Инвертор. Подобрать задание ШИП1 и задание частоты Инвертора так, чтобы при $\omega_{\text{ном}}$ ток якоря был равным нулю;

- уменьшая задание ШИП1, снять регулировочную характеристику генератора (измерить ток якоря и ток возбуждения генератора (машины M3) при разных значениях тока нагрузки), поддерживая напряжение генератора постоянным путем увеличения тока возбуждения, при этом скорость нужно поддерживать постоянной, увеличивая частоту Инвертора;

- данные занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Данные опыта внешней характеристики

№	1	2	3	4	5	6
I_{d2} , А						
I_{e2} , А						

Завершив эксперимент, необходимо:

– отключить ШИП1 – тумблер в положение «Выкл», вывести регулятор «Задание» ШИП1 в крайнее против часовой стрелки положение;

– вывести регулятор «задание тока» ШИП2 в крайнее против часовой стрелки положение, отключить ШИП2 – тумблер в положение «Выкл»;

– с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0$ Гц (контролировать по прибору HZ1);

– отключить асинхронный двигатель, нажав кнопку SB2.

Выключить выключатель SA1.

Выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений построить внешнюю характеристику генератора.

4.6.4. Исследование нагрузочной характеристики

Опыт проводить по схеме (см. рис. 4.18) в следующей последовательности:

– включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;

– включить выключатель SA1.

Включить обмотку статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по схеме «треугольник», для этого установить переключатель SA3 в положение «Включено».

Установить режим работы Инвертора:

– независимое управление – положение «Выключено»;

– $U/f = \text{const}$ – положение «Включено»;

– установить выключатель PV1/PW1 в положение «PV1»;

– установить выключатель PV2/PW2 в положение «PW2»;

– установить выключатель PV3/ф в положение «PV3»;

– с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0$ Гц (контролировать по прибору HZ1).

Подключить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

При помощи регулятора «Задание частоты» плавно увеличить частоту вращения ротора асинхронного двигателя до номинального значения частоты вращения генератора постоянного тока независимого возбуждения (машина МЗ) $\omega_1 = \omega_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору BR1). Отключить Инвертор;

– включить ШИП2 и установить номинальный ток возбуждения ($I_{\text{в, ном}} = 0,45 \text{ A}$).

Включить режим работы ШИП1, «отключить замкнутую СУ», «включить задание скорости». Вывести рукоятку задания в крайнее левое положение. Включить ШИП1. Регулятором «Задание» ШИП1 разогнать МЗ до номинальной скорости. Включить Инвертор. Подобрать задание ШИП1 и задание частоты Инвертора так, чтобы при $\omega_{\text{ном}}$ ток якоря был равным нулю;

– уменьшая задание ШИП1 установить ток якоря $I_a = 1,5 \text{ A}$, при номинальной частоте вращения, достигается одновременным увеличением частоты Инвертора;

– снять нагрузочную характеристику генератора (измерить ток возбуждения и напряжение генератора (машины МЗ), при разных значениях тока возбуждения), ток нагрузки поддерживается постоянным регулировкой задания ШИП1;

– скорость поддерживать постоянной, регулируя частоту Инвертора;

– данные занести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Данные опыта внешней характеристики

№	1	2	3	4	5	6
$I_{\text{в}}, \text{A}$						
U_a, B						

Завершив эксперимент, необходимо:

– отключить ШИП1 – тумблер в положение «Выкл», вывести регулятор «Задание» ШИП1 в крайнее против часовой стрелки положение;

– вывести регулятор «задание тока» ШИП2 в крайнее против часовой стрелки положение, отключить ШИП2 – тумблер в положение «Выкл»;

– с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0 \text{ Гц}$ (контролировать по прибору HZ1);

– отключить асинхронный двигатель, нажав кнопку SB2.

Опыт проводить в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1.

Включить обмотку статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по схеме «треугольник», для этого установить переключатель SA3 в положение «Включено».

Установить режим работы Инвертора:

- независимое управление – положение «Выключено»;
- $U/f = \text{const}$ – положение «Включено»;
- установить выключатель PV1/PW1 в положение «PV1»;
- установить выключатель PV2/PW2 в положение «PW2»;
- установить выключатель PV3/φ в положение «PV3»;
- с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0$ Гц (контролировать по прибору HZ1).

Подключить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

При помощи регулятора «Задание частоты» плавно увеличивать частоту вращения ротора асинхронного двигателя до номинального значения частоты вращения генератора постоянного тока параллельного возбуждения (машина M3) $\omega_1 = \omega_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору BR1):

- измерить эдс генератора (машины M3) при разных значениях частоты вращения якоря;
- данные занести в табл. 4.5;

Таблица 4.5

Данные опыта самовозбуждения

№	1	2	3	4	5	6
n , об/мин						
U , В						

– аналогичным образом снять показания для различных сопротивлений (R10, R11) в цепи возбуждения;

- данные занести в таблицы подобные табл. 4.5.

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0$ Гц (контролировать по прибору HZ1);
- отключить асинхронный двигатель, нажав кнопку SB2.

Выключить выключатель SA1.

Выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений построить характеристику самовозбуждения генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

Определить критическую частоту вращения.

4.6.6. Исследование внешней характеристики

Опыт проводить по схеме (см. рис. 4.19) в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1.

Включить обмотку статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором по схеме «треугольник», для этого установить переключатель SA3 в положение «Включено».

Установить режим работы Инвертора:

- независимое управление – положение «Выключено»;
- $U/f = \text{const}$ – положение «Включено»;
- установить выключатель PV1/PW1 в положение «PV1»;
- установить выключатель PV2/PW2 в положение «PW2»;
- установить выключатель PV3/φ в положение «PV3»;
- с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0$ Гц (контролировать по прибору HZ1).

Подключить асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

При помощи регулятора «Задание частоты» плавно увеличить частоту вращения ротора асинхронного двигателя до номинального значения частоты вращения генератора постоянного тока независимого возбуждения (машина M3) $\omega_1 = \omega_{\text{ном}}$ (контролировать по прибору BR1). Отключить Инвертор.

Включить режим работы ШИП1 «отключить замкнутую СУ», «включить задание скорости». Вывести рукоятку задания в крайнее левое положение. Включить ШИП1. Регулятором «Задание» ШИП1 разогнать M3 до номинальной скорости. Включить Инвертор. **Подобрать задание ШИП1 и задание частоты Инвертора так, чтобы при $\omega_{\text{ном}}$ ток якоря был равным нулю;**

– уменьшая задание ШИП1, снять внешнюю характеристику генератора (измерить ток якоря и напряжение генератора (машины M3) при разных значениях тока нагрузки), при этом скорость нужно поддерживать постоянной, увеличивая частоту Инвертора;

- данные занести в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Данные опыта внешней характеристики

№	1	2	3	4	5	6
I_a, A						
U_a, B						

Завершив эксперимент, необходимо:

– **отключить ШИП1** – тумблер в положение «Выкл», вывести регулятор «Задание» ШИП1 в крайнее против часовой стрелки положение;

– с помощью регулятора «Задание частоты» установить значение частоты $f = 0 \text{ Гц}$ (контролировать по прибору HZ1);

– отключить асинхронный двигатель, нажав кнопку SB2.

Выключить выключатель SA1.

Выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По результатам измерений построить внешнюю характеристику генератора.

По формуле (4.33) определить номинальное изменение напряжения ΔU генератора.

По внешней характеристике определяют номинальное изменение напряжения ΔU . Обычно его выражают в процентах номинального напряжения:

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% . \quad (4.33)$$

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните устройство генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

2. Какие виды потерь имеют место в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения?

3. Можно ли регулировать напряжение генератора постоянного тока параллельного возбуждения изменением скорости вращения якоря?

4. Почему характеристики холостого хода генератора постоянного тока параллельного возбуждения при намагничивании и размагничивании не совпадают?

5. Основные элементы конструкции, их назначение. Материалы, применяемые в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения.

6. Что представляет собой характеристика самовозбуждения? Что такое критическая частота вращения?

7. Реакция якоря и методы ее устранения в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения.

8. Коммутация в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения. Способы улучшения коммутации.

9. Круговой огонь на коллекторе и методы его устранения.

10. Показать построение характеристики холостого хода генератора постоянного тока параллельного возбуждения. Определить насыщение магнитной цепи по характеристике холостого хода.

11. Почему с увеличением нагрузки уменьшается напряжение на выходе генератора постоянного тока параллельного возбуждения? Записать уравнение равновесия для якорной цепи генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

12. Показать построение по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику внешней характеристики генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

13. Показать построение по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику регулировочной характеристики генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

14. Почему характеристика короткого замыкания генератора постоянного тока параллельного возбуждения прямолинейна?

15. Как определить размагничивающее действие реакции якоря?

16. Сравните внешние характеристики генератора при независимом и параллельном возбуждении. Чем объяснить различия между ними?

17. Чем объясняется падающий характер и нелинейность внешней характеристики генератора постоянного тока параллельного возбуждения?

18. Устройство генератора постоянного тока независимого возбуждения. Основные элементы конструкции, их назначение. Материалы, применяемые в генераторе постоянного тока независимого возбуждения.

19. Зачем сердечник якоря набирают из тонких листов технической стали?

20. Реакция якоря и методы ее устранения в генераторе постоянного тока независимого возбуждения.

21. Коммутация в генераторе постоянного тока независимого возбуждения. Способы улучшения коммутации.

22. Показать построение характеристики холостого хода генератора постоянного тока независимого возбуждения. Определить насыщение магнитной цепи по характеристике холостого хода.

23. Почему с увеличением нагрузки уменьшается напряжение на выходе генератора постоянного тока независимого возбуждения?

24. Записать уравнение равновесия для якорной цепи генератора постоянного тока независимого возбуждения.

25. Показать построение по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику внешней характеристики генератора постоянного тока независимого возбуждения.

26. Показать построение по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику регулировочной характеристики генератора постоянного тока независимого возбуждения.

27. Почему характеристика короткого замыкания генератора постоянного тока независимого возбуждения прямолинейна?

28. Закон электромагнитной индукции. Как определяют направление эдс в проводнике?

29. Чем объясняется падающий характер и нелинейность внешней характеристики генератора постоянного тока независимого возбуждения?

Лабораторная работа № 5

Исследование двигателя постоянного тока параллельного и независимого возбуждения

5.1. Цель работы:

- изучить устройство и принцип действия двигателя постоянного тока параллельного и независимого возбуждения;
- приобрести практические навыки в сборке схем и снятии характеристик;
- приобрести практические навыки по определению КПД двигателя постоянного тока методом холостого хода;
- изучить виды потерь в машине постоянного тока и их зависимости от нагрузки машины;
- изучить зависимость КПД машины от нагрузки.

5.2. Основные теоретические сведения

5.2.1. Общие положения

Двигатели постоянного тока преобразуют электрическую энергию постоянного тока в механическую.

Несмотря на успехи в создании статических полупроводниковых преобразователей и внедрение регулируемых электроприводов переменного тока, производство двигателей постоянного тока в процентном отношении к двигателям переменного тока не сокращается, и они находят новые области применения.

Двигатели постоянного тока допускают плавное и экономичное регулирование скорости вращения. Это преимущество перед двигателями переменного тока обеспечивает применение двигателей постоянного тока в электроприводах с широким диапазоном изменения скорости вращения. Двигатели постоянного тока находят применение в приводах прокатных станов, станков, на транспорте и в других системах автоматизированного электропривода.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока, так же как и генераторы, делятся на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Двигатели независимого возбуждения могут быть разделены на двигатели с электромагнитным возбуждением, когда обмотка возбуждения подключена к постороннему источнику постоянного тока или на зажимы двигателя, и на двигатели с магнитоэлектрическим возбуждением, когда вместо обмотки возбуждения используются постоянные магниты.

Двигатель постоянного тока потребляет электрическую мощность P_1 из сети. Часть этой мощности расходуется на электрические потери в обмотке возбуждения P_v , электрические потери в обмотке якоря $P_{\text{я}}$ и электрические потери в контакте щеток $P_{\text{щ}}$, а остальная ее часть передается магнитным полем к якорю. Эта мощность называется электромагнитной.

$$P_{\text{эм}} = P_1 - P_v - P_{\text{щ}} - P_{\text{я}}. \quad (5.1)$$

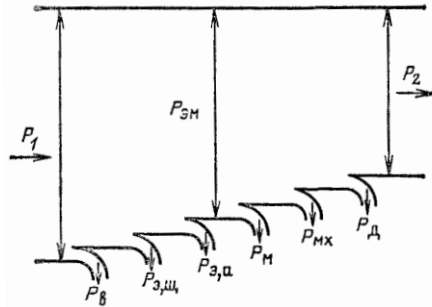
Электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ расходуется на покрытие потерь в стали магнитопровода якоря $P_{\text{м}}$, механических $P_{\text{мх}}$ и добавочных $P_{\text{д}}$ потерь (рис. 5.1). Оставшаяся ее часть P_2 является полезной механической мощностью на валу двигателя:

$$P_2 = P_{эм} - \sum P, \quad (5.2)$$

где

$$\sum P = P_m + P_{мх} + P_\delta. \quad (5.3)$$

Рис. 5.1. Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока



Различают два вида потерь – основные и добавочные. Основные потери разделяются на магнитные, механические и электрические.

Магнитные потери P_m происходят только в сердечнике якоря, так как только этот элемент магнитопровода машины постоянного тока подвергается перемагничиванию. Величина магнитных потерь состоит из потерь от гистерезиса и потерь от вихревых токов и зависит от частоты перемагничивания $f = \frac{p \cdot n}{60}$, значений магнитной

индукции в зубцах и спинке якоря, толщины листов электротехнической стали, ее магнитных свойств и качества изоляции этих листов в пакете якоря.

Механические потери обусловлены потерями на вентиляцию, трением вращающихся частей машины – трением в подшипниках, трением щеток о коллектор. Величина механических потерь зависит от скорости вращения якоря.

Магнитные и механические потери называют постоянными потерями, так как мощность этих потерь не зависит от нагрузки машины.

Аналитический расчет магнитных и механических потерь – сложная задача и не дает достаточной точности. Для определения этих потерь иногда пользуются экспериментальным методом.

5.2.2. Опыт холостого хода

Данный опыт даёт возможность изучить свойства магнитной цепи машины, определить возникающие при холостом ходе потери и механические свойства двигателя при питании от источника регулируемого напряжения.

Включают машину на холостом ходу в двигательный режим. При этом измеряют ток якоря I_{a0} в режиме холостого хода и подведенное напряжение U_0 и определяют мощность холостого хода P_0 в цепи якоря (Вт), которая представляет собой сумму магнитных и механических потерь:

$$P_0 = U_0 \cdot I_{a0} = P_{\text{мх}} + P_{\text{см}}. \quad (5.4)$$

Потери в цепи возбуждения определяются потерями в обмотке возбуждения и в реостате, включенном в цепь возбуждения:

$$P_g = U_g \cdot I_g, \quad (5.5)$$

здесь U_g – напряжение цепи возбуждения.

5.2.3. Опыт короткого замыкания

Данный опыт даёт возможность определить электрические потери, возникающие в обмотках цепи якоря и в щеточном контакте машины постоянного тока при питании от источника регулируемого напряжения.

Электрические потери в обмотках цепи якоря и в щеточном контакте машины постоянного тока называют *переменными*, так как их величина зависит от нагрузки машины и обусловлена нагревом обмоток и щеточного контакта.

Потери в цепи якоря определяются по формуле

$$P_{\text{за}} = I_a^2 \cdot \sum r, \quad (5.6)$$

где $\sum r$ – сопротивление цепи якоря, приведенное к расчетной рабочей температуре.

$$r = r' \cdot (1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)), \quad (5.7)$$

где r' – активное сопротивление при температуре T_1 ;

T_2 – рабочая температура двигателя;

$\alpha = 0,004$ – температурный коэффициент меди.

Электрические потери в контакте щеток:

$$P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_a, \quad (5.8)$$

где $\Delta U_{\text{щ}}$ – переходное падение напряжения на щетках, принимаемое в соответствии с маркой щеток.

5.2.4. Коэффициент полезного действия

В машинах постоянного тока имеется ряд трудно учитываемых потерь – *добавочных*. Поэтому, согласно ГОСТ, для двигателей без компенсационной обмотки значение добавочных потерь P_d принимают равным 1% от подводимой мощности. В машинах с компенсационной обмоткой значение добавочных потерь принимают равным 0,5%.

Мощность (Вт) для двигателя постоянного тока (электрическая мощность или подводимая мощность):

$$P_1 = U \cdot I_a. \quad (5.9)$$

Коэффициент полезного действия электрической машины представляет собой отношение мощностей отдаваемой (полезной) к подводимой (потребляемой):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (5.10)$$

Обычно КПД машин постоянного тока составляет 0,75–0,9 для машин мощностью от 1 до 100 кВт и 0,9–0,97 для машин мощностью свыше 100 кВт. У машин постоянного тока малой мощности КПД намного меньше (рис. 5.2).

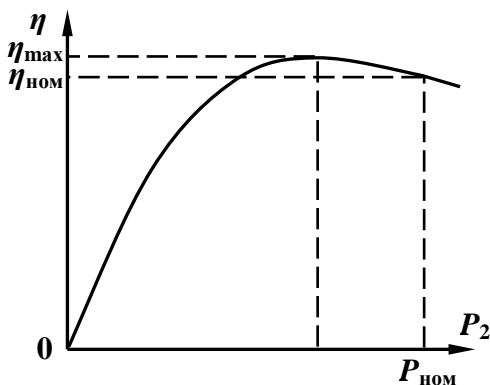


Рис. 5.2. Зависимость $\eta = f(P_2)$

Коэффициент полезного действия электрической машины можно определять:

а) методом непосредственной нагрузки по результатам измерений подведенной P_1 и отдаваемой P_2 мощностей;

б) косвенным методом по результатам измерений потерь.

Метод непосредственной нагрузки применим только для машин малой мощности, для остальных случаев применяется косвенный метод, как более точный и удобный.

Существует несколько косвенных способов определения КПД. Наиболее прост способ холостого хода двигателя, когда потребляемая машиной постоянного тока мощность затрачивается только на потери холостого хода. Что же касается электрических потерь, то их определяют расчетным путем после предварительного измерения электрических сопротивлений обмоток и приведения их к рабочей температуре.

5.2.5. Принцип действия двигателя постоянного тока

Электрические машины обладают свойством обратимости, т. е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Поэтому если машину постоянного тока подключить к источнику энергии постоянного тока, то в обмотке возбуждения и в обмотке якоря машины появятся токи. Взаимодействие тока якоря с полем возбуждения создает на якоре вращающий электромагнитный момент $M_{эм}$.

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega}, \quad (5.11)$$

где ω – угловая частота вращения якоря, рад/с.

Под действием электромагнитного момента якорь машины начнет вращаться, т. е. машина будет работать в режиме двигателя.

В процессе работы двигателя его якорь вращается в магнитном поле. В обмотке якоря индуцируется эдс E_a , направление которой определяют по правилу «правой руки». В двигателе эдс направлена против тока I_a , и поэтому ее называют противоэдс якоря.

Для двигателя, работающего с постоянной частотой вращения, подведенное к двигателю напряжение уравнивается противоэдс обмотки якоря и падением напряжения в цепи якоря:

$$U = E_a + I_a \cdot \sum r_a. \quad (5.12)$$

На основании (5.12) ток якоря определяется по формуле

$$I_a = \frac{E_a - U}{\sum r_a}. \quad (5.13)$$

Умножив обе части уравнения (5.12) на ток якоря I_a , получим уравнение мощности для цепи якоря:

$$U \cdot I_a = E_a \cdot I_a + I_a^2 \cdot \sum r_a, \quad (5.14)$$

где $U \cdot I_a = P_1$ – электрическая мощность, подводимая к якорю;

$I_a^2 \cdot \sum r_a = P_{\text{эа}}$ – мощность электрических потерь в цепи якоря;

$E_a \cdot I_a = P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность, представляющая собой полную электрическую мощность, которая преобразуется в полезную механическую мощность и расходуется на покрытие магнитных (потери в стали якоря), механических и добавочных потерь.

5.2.6. Пуск двигателя

Ток якоря двигателя определяется формулой (5.13). Если принять U и $\sum r_a$ неизменными, то ток I_a зависит от противоэдс E_a .

В начальный момент пуска якорь двигателя неподвижен ($n = 0$) и в его обмотке не индуцируется эдс ($E_a = 0$). Поэтому при непосредственном подключении двигателя к сети в обмотке его якоря возникает пусковой ток:

$$I_{\text{п}} = \frac{U}{\sum r_a}. \quad (5.15)$$

Обычно сопротивление r_a невелико, поэтому значение пускового тока достигает недопустимо больших значений, в 10–20 раз превышающих номинальный ток двигателя.

Такой большой пусковой ток весьма опасен для двигателя. Во-первых, он может вызвать в машине круговой огонь, а во-вторых, при таком токе в двигателе развивается чрезмерно большой пусковой момент, который оказывает ударное действие на вращающиеся части двигателя и может механически их разрушить. Этот ток вызывает резкое падение напряжения в сети, что неблагоприятно отражается на работе других потребителей, включенных в эту сеть.

Поэтому пуск двигателя непосредственным подключением в сеть обычно применяют для двигателей мощностью не более 1,0 кВт. В этих двигателях благодаря повышенному сопротивлению обмотки якоря и небольшим вращающимся массам значение пускового тока лишь в 3–5 раз превышает номинальный, что не представляет опасности для двигателя. Что же касается двигателей большей мощности, то при их пуске для ограничения пускового тока используют *пусковые реостаты*, включаемые последовательно в цепь якоря (реостатный пуск).

По мере разгона якоря двигателя ступени пускового реостата R плавно выводятся, и пуск двигателя заканчивается. Сопротивление пускового реостата R выбирают обычно таким, чтобы пусковой ток не превышал номинальный более чем в 2–3 раза.

Для пуска двигателей большей мощности применять пусковые реостаты нецелесообразно, так как это вызывает значительные потери энергии. Кроме того, пусковые реостаты обладают большими массогабаритными показателями. Поэтому в двигателях большой мощности применяют пуск двигателя путем понижения напряжения.

5.2.7. Характеристики двигателей постоянного тока параллельного и независимого возбуждения

Основными характеристиками, по которым оцениваются рабочие свойства двигателя, являются:

1) скоростная характеристика (электромеханическая) $n = f(I_a)$ – зависимость скорости вращения якоря от тока якоря;

2) моментная характеристика $M_{эм} = f(I_a)$ – зависимость электромагнитного момента от тока якоря;

3) механическая характеристика $n = f(M_{эм})$ – зависимость скорости вращения якоря от электромагнитного момента.

При снятии характеристик нагрузочный момент изменяют от нуля до $1,1–1,2M_{ном}$.

Номинальный момент $M_{ном}$, Н·м, определяют по формуле

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}}, \quad (5.16)$$

где $\omega_{ном}$ – номинальная угловая частота вращения якоря, рад/с, определяется по формуле

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{ном}}}{60}. \quad (5.17)$$

Электродвижущая сила двигателя определяется по формуле

$$E_a = c_e \cdot n \cdot \Phi. \quad (5.18)$$

Тогда скорость вращения якоря двигателя (об/мин)

$$n = \frac{E_a}{c_e \cdot \Phi}. \quad (5.19)$$

Подставив значение E_a из (5.12), получим выражение скоростной характеристики:

$$n = \frac{U - I_a \cdot \sum r_a}{c_e \cdot \Phi} = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{I_a \cdot \sum r_a}{c_e \cdot \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (5.20)$$

т. е. *скорость вращения якоря двигателя прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку возбуждения.*

Если к валу машины не будет приложен нагрузочный момент ($M_2 = 0$), то двигатель будет работать на холостом ходу, при этом ток в якоре $I_a = I_0$, а скорость $n = n_0$. Ток I_0 (ток холостого хода) создает электромагнитный момент M_0 , необходимый для преодоления существующего в самом двигателе тормозного момента, обусловленного силами трения и магнитными потерями. Этот ток относительно мал и составляет 2–5% от номинального.

Работа двигателя при $M = 0$ и $I_a = 0$ называется идеальным холостым ходом. Согласно (5.20) скорость при идеальном холостом ходе, об/мин, равна:

$$n_0 = \frac{U}{c_e \cdot \Phi}. \quad (5.21)$$

Изменение *скорости* вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах, называют *номинальным изменением скорости вращения якоря*:

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (5.22)$$

В двигателях параллельного и независимого возбуждения изменение скорости при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке мало и составляет 2–5%. Такие слабо падающие скоростные и механические характеристики называются жесткими.

Скоростную характеристику двигателя $n = f(I_a)$ снимают при $I_e = I_{e \text{ ном}} = \text{const}$ и $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$. Номинальный ток возбуждения $I_{e \text{ ном}}$ устанавливают так, чтобы обеспечить номинальную скорость $n_{\text{ном}}$ при $I_a = I_{a \text{ ном}}$ и номинальном подведенном напряжении $U_{\text{ном}}$.

Скоростные характеристики показаны на рис. 5.3. Их анализ проведем, исходя из уравнения (5.20).

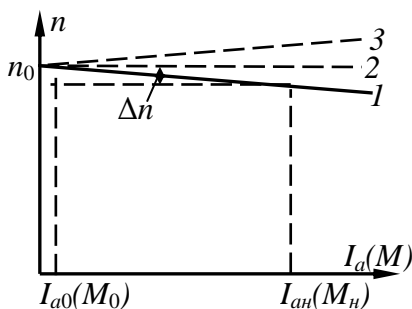


Рис. 5.3. Скоростные характеристики двигателя постоянного тока параллельного и независимого возбуждения

При $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ на скорость якоря будут оказывать влияние два фактора: падение напряжения в цепи якоря и размагничивающее действие реакции якоря, уменьшающее поток. Поток двигателя при нагрузке

$$\Phi = \Phi_0 - \Delta\Phi, \quad (5.23)$$

где Φ_0 — поток, созданный током возбуждения;

$\Delta\Phi$ — уменьшение потока из-за размагничивающего действия поперечной реакции якоря.

Тогда при возрастании тока якоря падение напряжения $I_a \cdot \sum r_a$ будет стремиться уменьшить скорость, а $\Delta\Phi$ — увеличить.

Вид скоростной характеристики зависит от того, какой из этих факторов будет действовать сильнее. При более сильном влиянии падения напряжения характеристика имеет падающий характер (сплошная линия на рис. 5.3), а если будет преобладать действие реакции якоря, то она может иметь возрастающий характер (штриховые линии).

Нормальная работа двигателя возможна только при падающей характеристике.

Моментную характеристику двигателя $M_{эм} = f(I_a)$ снимают при $I_e = \text{const}$.

Зависимость электромагнитного момента от тока якоря описывается уравнением:

$$M_{эм} = c_m \cdot \Phi \cdot I_a = c_m \cdot (\Phi_0 - \Delta\Phi) \cdot I_a. \quad (5.24)$$

Если бы при $I_a = \text{const}$ поток Φ оставался постоянным, то момент был бы пропорционален току якоря I_a и моментная характеристика представляла бы прямую линию, выходящую из начала координат (штриховая прямая на рис. 5.4).

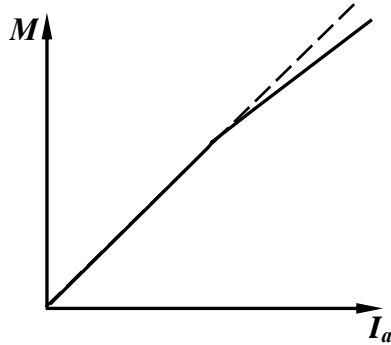


Рис. 5.4. Моментная характеристика двигателя постоянного тока независимого возбуждения

Действительная характеристика из-за уменьшения потока вследствие размагничивающего действия реакции якоря пойдет ниже и будет отклоняться от линейной зависимости (сплошная линия на рис. 5.4). Однако расхождение между этими характеристиками невелико и во многих практических расчетах может не учитываться.

Механическую характеристику двигателя $n = f(M_{эм})$ снимают при $I_a = \text{const}$ и $U = U_{ном} = \text{const}$.

Выразим ток I_a из выражения (5.24):

$$I_a = \frac{M_{эм}}{c_m \cdot \Phi}. \quad (5.25)$$

Подставив (5.25) в (5.20), получим аналитическое выражение механической характеристики:

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{M_{эм} \cdot \sum r_a}{c_m \cdot c_e \cdot \Phi^2}. \quad (5.26)$$

Вид механической характеристики двигателя параллельного и независимого возбуждения такой же, как и у скоростной характеристики (рис. 5.5). Если принять пропорциональную зависимость между моментом и током якоря, то при одних и тех же значениях U

и I_e скоростная характеристика в другом масштабе будет являться и механической характеристикой.

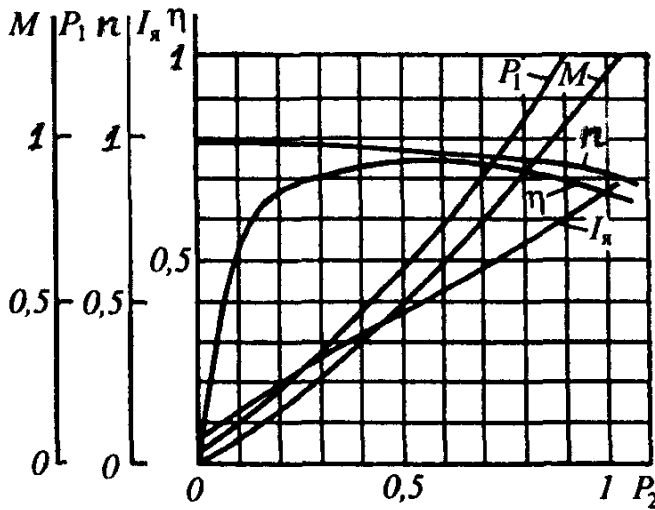


Рис. 5.5. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока параллельного и независимого возбуждения

Рабочие характеристики двигателя $M, P_1, I_a, n, \eta = f(P_2)$ снимают при $I_e = \text{const}$ и $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$.

С увеличением нагрузки на валу двигателя P_2 растет момент двигателя M , а скорость вращения n немного падает. Увеличение нагрузки приводит к росту мощности P_1 , забираемой из сети, и росту тока якоря I_a . При холостом ходе ($P_2 = 0$) КПД = 0, затем с увеличением P_2 сначала КПД быстро растет, но в связи с большим ростом потерь в цепи якоря при больших нагрузках снова начинает уменьшаться.

Направление вращения якоря зависит от направлений магнитного потока возбуждения Φ и тока в обмотке якоря. Поэтому, изменив направление какой-либо из указанных величин, можно изменить направление вращения якоря.

5.2.8. Устойчивость двигателя

Важно, чтобы работа двигателя вместе с производственным механизмом протекала устойчиво. Под устойчивой работой двигателя

понимается его способность вернуться в исходную точку равновесия после кратковременного действия возмущающих сил, нарушивших это равновесие. Оценку устойчивости производят из совместного рассмотрения механических характеристик двигателя и производственного механизма.

Работа двигателя может быть устойчивой и неустойчивой. Неустойчивая работа будет наблюдаться при возрастающих механических характеристиках двигателя. На рис. 5.6 показана такая характеристика двигателя (прямая 1). Там же дана механическая характеристика для механизма, приводимого во вращение двигателем (прямая 2). Для него принята зависимость $M_c = M_2 = \text{const}$, являющаяся типичной для целого ряда механизмов (подъемные краны, механизмы подачи для металлорежущих станков и т. д.). Пересечение этих прямых является точкой равновесия моментов $M = M_c$ (точка *a*) и соответствует установившемуся режиму работы.

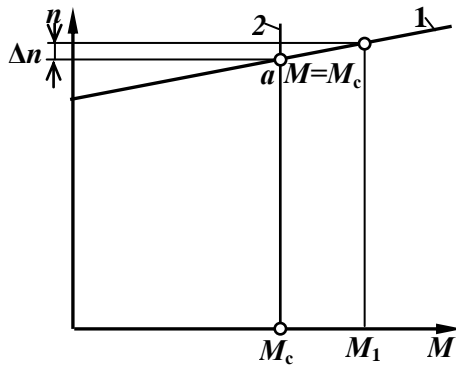


Рис. 5.6. Определение устойчивости работы двигателя совместно с механизмом

Предположим, что в результате действия каких-либо возмущающих сил скорость увеличится на Δn . Тогда момент двигателя увеличится до M_1 и возникнет положительный динамический момент, так как $M_1 - M_c > 0$. Под действием избыточного момента двигателя скорость n начнет нарастать, разность $M - M_c$ еще больше увеличится, что приведет к дальнейшему возрастанию скорости, и т. д. Если в результате возмущения скорость уменьшится, то $M - M_c < 0$ и скорость будет непрерывно уменьшаться. Отсюда следует, что точка *a* является точкой неустойчивого равновесия и, следовательно, нормальная работа двигателя с возрастающей механической характеристикой невозможна.

Аналогичным путем можно показать, что при падающей механической характеристике работа будет проходить устойчиво, так как всякое отклонение скорости на $\pm \Delta n$ вызывает появление избыточного момента, направленного на восстановление равновесия. В общем виде критерием устойчивой работы является неравенство

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_c}{dn}. \quad (5.27)$$

Иногда при проектировании двигателей в целях уменьшения его размеров и массы принимают повышенные значения линейной нагрузки A и индукции в воздушном зазоре B_Δ . В таких двигателях сильно проявляется размагничивающее действие реакции якоря, и получить у них падающую механическую характеристику не удастся. Тогда предусматривают специальную обмотку возбуждения (стабилизирующую обмотку), располагаемую на полюсах и включаемую последовательно с якорем. Она имеет всего несколько витков и предназначена для компенсации размагничивающего действия реакции якоря. При наличии такой обмотки ток машины практически не будет изменяться с ростом тока якоря – он будет стабилизирован. Механическая характеристика такой машины будет падающей.

5.3. Задание на выполнение лабораторной работы

1. Ввиду идентичности характеристик двигателей параллельного и независимого возбуждения исследования проводятся только для случая независимого возбуждения.

Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов. Ознакомиться с конструкцией двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

2. Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

3. Снять характеристики холостого хода.

4. Построить характеристики короткого замыкания при заторможенном якоря.

5. Снять данные и построить рабочие характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при номинальном напряжении. Рассчитать потери двигателя постоянного тока независимого возбуждения при различных значениях тока нагрузки и построить график зависимости КПД от тока нагрузки. Определить

полезную мощность и полезный момент на валу двигателя. Определить КПД двигателя при номинальной нагрузке. Определить номинальное изменение скорости вращения якоря.

6. Построить скоростную, механическую и моментную характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при номинальном напряжении.

7. Сделать обработку полученных данных. Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

При анализе результатов лабораторной работы следует сравнить полученную в лабораторной работе величину КПД машины при номинальной нагрузке со значением КПД, указанным в паспорте машины. Затем необходимо проанализировать график $\eta = f(P_2)$, сделав заключение о соответствии полученного в работе графика типовому графику, приведенному в учебнике. Определив по графику максимальное значение η_{\max} , следует указать, какому значению нагрузки оно соответствует. Для этого значения нагрузки следует рассчитать сумму переменных потерь и сравнить ее с суммой постоянных потерь, определив, при каком соотношении этих потерь КПД машины имеет максимальное значение.

Паспортные данные исследуемого двигателя 2ПН90Л 4ХЛ-4 6005: номинальная мощность $P = 0,55$ кВт; номинальная частота вращения $n = 1500$ об/мин; максимальная частота вращения $n_{\max} = 4300$ об/мин; номинальное напряжение цепи возбуждения и обмотки якоря $U_a = 220$ В; ток якоря $I_a = 3,32$ А; ток возбуждения $I_e = 0,5$ А; КПД = 67,5%; сопротивление щеток $R_{щ} = 0,1$ Ом; сопротивление обмотки якоря $R_{я} = 7$ Ом; сопротивление цепи возбуждения $R_e = 430$ Ом.

5.4. Порядок работы с лабораторной установкой

5.4.1. Опыт холостого хода

Изучить принципиальную схему стенда.

Для исследования двигателя постоянного тока независимого возбуждения (машина МЗ) собрать схему, представленную на рис. 5.7.

Опыт проводить в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить ШИП2 – тумблер в положение «Вкл»;

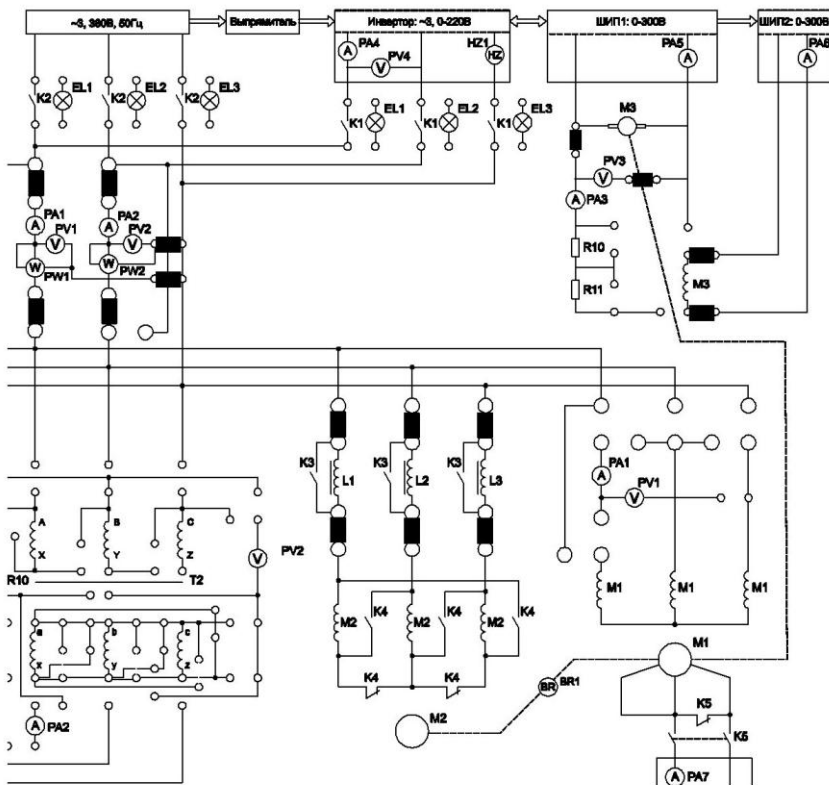


Рис. 5.7. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

- с помощью регулятора «Задание тока» установить номинальное значение тока возбуждения двигателя М3, измерить напряжение в цепи возбуждения двигателя М3;
- установить режим работы ШИП1: положение «Отключить замкнутую СУ», «Задание скорости», «Двигательный режим»;
- установить регулятор «Задание» в крайнее положение, соответствующее значению скорости равное нулю;
- включить ШИП1 – тумблер в положение «Вкл»;
- при помощи регулятора «Задание» плавно увеличить напряжение на якоре двигателя М3 до номинального значения $U = 220 \text{ В}$ (контролировать по вольтметру PV3);
- прогреть двигатель М3 в течение 15 минут;

- установить регулятор «Задание» в крайнее положение, соответствующее значению скорости равное нулю;
 - плавно увеличивая напряжение на якоре двигателя МЗ до значения $U = 250$ В снять 5 значений тока в цепи якоря двигателя МЗ.
- Данные занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Данные опыта холостого хода

№	Измерено			Вычислено					
	U_0 , В	I_a , А	ω , рад/с	n , об/мин	P_{10} , Вт	P_{ρ_0} , Вт	$P_{\rho_{\omega 0}}$, Вт	P_0 , Вт	P_B , Вт
1									
2									
3									
4									
5									

Завершив эксперимент, необходимо:

- установить регулятор «Задание» в крайнее положение, соответствующее значению скорости равное нулю;
 - выключить ШИП1 – тумблер «Выкл»;
 - выключить ШИП2 – тумблер в положение «Выкл»;
 - выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».
- Скорость вращения якоря, об/мин, определить по формуле

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi}. \quad (5.28)$$

Механические и магнитные потери, Вт, определить по формуле

$$P_0 = P_{mx} + P_{cm} = P_{10} - P_{\rho_0} - P_{\rho_{\omega 0}}. \quad (5.29)$$

Потери в цепи якоря на холостом ходу определить по формуле

$$P_{\rho_0} = I_{a0}^2 \cdot \sum r, \quad (5.30)$$

где $\sum r$ – сопротивление цепи якоря, приведенное к расчетной рабочей температуре.

Электрические потери на холостом ходу в контакте щеток определить по формуле

$$P_{\rho_{\omega 0}} = \Delta U_{\omega} \cdot I_{a0}, \quad (5.31)$$

где ΔU_{ω} – переходное падение напряжения на щетках, принимаемое в соответствии с маркой щеток.

Потери в цепи возбуждения определить по формуле (5.5).

По результатам измерений и вычислений построить характеристики холостого хода: $I_0, P_{10}, P_0 = f(U_0)$, на которых необходимо отметить значения величин $I_{0ном}, P_{10ном}, (P_{см} + P_{мх})_{ном}$, соответствующих номинальному напряжению $U_{ном}$.

5.4.2. Построение характеристики короткого замыкания

Измерить сопротивление цепи якоря при температуре окружающей среды r' .

Сопротивление якоря r_a , приведенное к рабочей температуре определить по формуле (5.7).

При опыте короткого замыкания обмотки двигателя быстро нагреваются до рабочей температуры, так как при неподвижном якоре двигатель не вентилируется.

Определить по формулам (5.32), (5.33) падение напряжения щеточного узла и обмотки якоря при различных значениях тока якоря, в том числе при номинальном токе якоря.

$$\Delta U_{щ} = \frac{r_{щ}}{I_a}; \quad (5.32)$$

$$U_K = \frac{r_a}{I_a}. \quad (5.33)$$

Подводимую мощность, Вт, двигателя постоянного тока (электрическая мощность) в режиме короткого замыкания определить по формуле

$$P_{1К} = U_K \cdot I_{аК}. \quad (5.34)$$

Результаты расчетов занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Полученные результаты

№	Вычислено			
	$U_K, В$	$I_{аК}, А$	$P_{1К}, Вт$	$\Delta U_{щ}, В$
1				
2				
3				
4				
5				

По результатам измерений и вычислений построить характеристики короткого замыкания: $I_{аК}$ и $P_{1К} = f(U_K)$.

5.4.3. Исследование рабочих характеристик

Опыт проводить по схеме (см. рис. 5.7) в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель «СЕТЬ»;
- включить выключатель SA1.

Для включения обмотки статора двигателя М2 по схеме «треугольник» установить переключатель SA3 в положение «Включено».

Установить режим работы Инвертора:

- независимое управление – положение «Включено»;
- $U/f = \text{const}$ – положение «Выключено»;
- с помощью регулятора «Задание напряжения» установить значение 0 В (контролировать по вольтметру PV4);
- включить выключатель ШИП2 в положение «Включено»;
- с помощью регулятора «Задание тока» установить номинальное значение тока возбуждения двигателя М3;
- установить режим работы ШИП1: положение «Отключить замкнутую СУ», «Задание скорости», «Двигательный режим»;
- установить регулятор «Задание» в крайнее положение, соответствующее значению скорости равное нулю;
- включить ШИП1 – тумблер в положение «Вкл»;
- плавно увеличить напряжение на якоре двигателя М3 до номинального значения $U = 220$ В и поддерживать его постоянным в течение всего опыта (контролировать по вольтметру PV4).

Чтобы создать механическую нагрузку на валу исследуемого двигателя М3, нужно подключить двигатель М2 к выходу Инвертора, который работает в генераторном режиме, нажав кнопку SB1.

При помощи регулятора «Задание напряжения», плавно увеличивая напряжение на статоре АД, увеличить механическую нагрузку на валу исследуемого двигателя М3 до значения тока $I_a = 1,2I_{\text{ном}}$. Затем плавно разгружают двигатель до значения тока $I_a = 0$, уменьшая напряжение на статоре АД, снять 5 значений тока и напряжения в цепи якоря двигателя М3. Данные опыта занести в табл. 5.3.

Завершив эксперимент, необходимо:

- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- отключить двигатель М2, нажав кнопку SB2;
- установить регулятор «Задание» в крайнее положение, соответствующее значению скорости равное нулю;

- выключить ШИП1 – тумблер в положение «Выкл»;
- выключить ШИП2 – тумблер в положение «Выкл»;
- выключить выключатель SA1;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

Таблица 5.3

Рабочие характеристики

№	Измерено			Вычислено										
	I_a , А	U , В	ω , рад/с	n , об/мин	$\Delta n_{\text{ном}}$, %	P_1 , Вт	$P_{\text{за}}$, Вт	$P_{\text{эц}}$, Вт	$P_{\text{эм}}$, Вт	P_0 , Вт	P_2 , Вт	η	$M_{\text{эм}}$, Н·м	M_2 , Н·м
1														
2														
3														
4														
5														

По опытным данным построить в одной системе координат рабочие характеристики: $I_a, P_1, n, M, \eta = f(P_2)$.

Величины n, M, P_2 и η определяют по формулам:

- номинальное изменение скорости вращения $\Delta n_{\text{ном}}\%$ – (5.22);
- мощность P_1 (электрическая мощность или подводимая мощность) – (5.9);
- электрические потери в цепи якоря – (5.6);
- электрические потери в контакте щеток определить по формуле – (5.8);
- электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ – (5.1).

Согласно государственному стандарту, для двигателей без компенсационной обмотки значение добавочных потерь P_d принимают равным 1% от подводимой мощности, Вт:

$$P_d = 0,01 \cdot P_1. \quad (5.35)$$

Полезная механическая мощность, Вт, на валу двигателя:

$$P_2 = P_{\text{эм}} - P_0 - P_d. \quad (5.36)$$

КПД, %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100. \quad (6.37)$$

Электромагнитный момент двигателя, Н·м:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega}. \quad (5.38)$$

Момент на валу, Н·м:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}. \quad (5.39)$$

По расчетным данным построить следующие характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

- 1) скоростную характеристику (электромеханическую) $n = f(I_a)$;
- 2) моментную характеристику $M_{эм} = f(I_a)$;
- 3) механическую характеристику $n = f(M_{эм})$.
- 4) рабочие характеристики $M, P_1, I_a, n, \eta = f(P_2)$.

Контрольные вопросы и задания

1. Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

2. Способы пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Какой способ пуска применяли в лабораторной работе?

3. Напишите уравнение напряжения на якоре двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

4. Из уравнения напряжения выведите уравнения тока якоря и скорости вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

5. Почему пусковой ток значительно превышает номинальный ток якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения?

6. Почему с увеличением нагрузки частота вращения двигателя постоянного тока независимого возбуждения уменьшается?

7. Напишите формулу электромагнитного момента двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Объясните величины, определяющие электромагнитный момент.

8. Напишите зависимость электромагнитного момента двигателя постоянного тока независимого возбуждения от его мощности и угловой скорости вращения якоря.

9. Перечислите потери мощности в двигателе постоянного тока независимого возбуждения. Какие из них относятся к постоянным, а какие – к переменным и почему?

10. Напишите уравнение КПД двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Нарисуйте график зависимости КПД от величины нагрузки.

11. При каком условии КПД двигателя постоянного тока независимого возбуждения достигает максимума?

12. Как изменить направление вращения якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения?

13. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения работает с номинальной нагрузкой. Что будет с ним, если произойдёт обрыв цепи возбуждения?

Библиографический список

1. **Копылов, И.П.** Электрические машины : учебник для вузов / И.П. Копылов. – М. : Высшая школа, 2004. – 607 с.

2. **Вольдек, А.И.** Электрические машины : учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб. : Питер, 2007. – 320 с.

3. **Беспалов, В.Я.** Электрические машины : учеб. пособие / В.Я. Беспалов. – М. : Академия, 2006. – 320 с.

Оглавление

<i>Лабораторная работа № 1. Исследование однофазного трансформатора</i>	3
<i>Лабораторная работа № 2. Опытное определение групп соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора</i>	19
<i>Лабораторная работа № 3. Исследование параллельной работы трёхфазных двухобмоточных трансформаторов</i>	34
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование генератора постоянного тока независимого и параллельного возбуждения ...</i>	39
<i>Лабораторная работа № 5. Исследование двигателя постоянного тока параллельного и независимого возбуждения</i>	79
<i>Библиографический список</i>	100

*Лисицкий Евгений Леонидович
Попов Сергей Васильевич
Малышев Юрий Сергеевич*

Исследование электрических машин на лабораторном стенде НТЦ-23

Часть 1

Методические указания

Редактор *Н.С. Алёшина*
Корректор *Д.В. Богданов*
Вёрстка *М.Е. Савиновой*

Подписано в печать 11.09.13.

Формат бумаги 60×84 ¹/₁₆. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,3.

Тираж 425 экз. Заказ 183.

Издательско-полиграфический комплекс ФБОУ ВПО «ВГАВТ»

603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5а