

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



О.Г.Локтионова

2017 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания по выполнению лабораторных работ
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Курск 2017

УДК 621.313

Составитель А.С. Чернышев, В.В. Шаповалов

Рецензент:

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение»
О.М. Ларин

Электрические машины: методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.С. Чернышев, В.В. Шаповалов. Курск, 2014. 60 с.: ил. 23, табл. 27. Библиогр.: с. 60.

Содержат сведения по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электрические машины». Предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *28.08.14*. Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л. 2,8. Уч.-изд.л. 2,5 Тираж 100 экз. Заказ ~~№~~ Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

2

**РАБОТА №1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО
ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА И
КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

2

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – освоить методику испытания трехфазной трансформаторной группы в режимах холостого хода и короткого замыкания.

1.1. Общие положения

Трёхфазные трансформаторы бывают трёхстержневыми и групповыми. Основными частями трехстержневого трансформатора являются трехстержневой магнитопровод, набранный из листов трансформаторной стали, и шесть обмоток: три высшего и три низшего напряжения. На каждом стержне расположены по две обмотки: высшего ВН и низшего НН напряжения. Групповые трансформаторы состоят из трёх однофазных. Обмотки трансформатора могут быть соединены в звезду, треугольник или зигзаг (рис.1.1). Соединение в зигзаг используется редко, поэтому его схема не приводится.

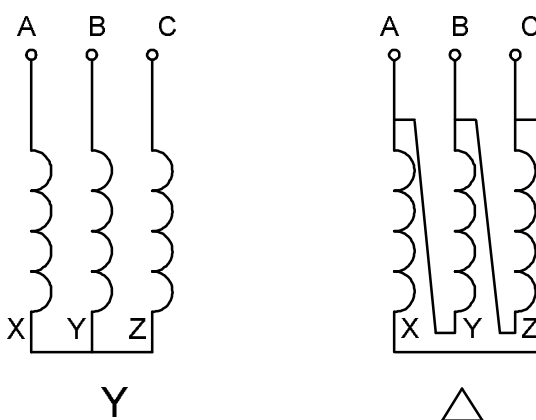


Рисунок 1.1. Схемы соединения обмоток трехфазного трансформатора

В схемах начала обмоток высшего напряжения обозначаются прописными буквами А, В, С, концы - буквами X, Y, Z.

В паспорте трансформатора указываются: обозначение - ОСЗ (однофазный, защищенного исполнения, с естественным воздушным охлаждением); номинальная полная мощность S (кВА), которую он может отдавать потребителю не перегреваясь при длительной работе; номинальные фазные высшее $U_{ВН}$ и низшее $U_{НН}$ напряжения.

Величина номинального линейного тока определяется из (1.1)

$$I = \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{3S_{\phi}}{\sqrt{3}U_{л}} \quad (1.1)$$

где I – линейный номинальный ток трёхфазной трансформаторной группы, A, U_{ϕ} – фазное номинальное напряжение однофазного трансформатора, В; S_{ϕ} – полная мощность однофазного трансформатора, ВА; $U_{л}$ – линейное номинальное напряжение трехфазной трансформаторной группы, В.

Из формулы (1.1) следует, что при расчете тока полные мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора считаются одинаковыми и равными полной мощности трансформатора. Величина фазного тока зависит

от способа соединения фазных обмоток. При выполнении работы обмотки будут соединяться звездой, поэтому фазные и линейные токи равны.

Величины напряжений трансформатора зависят от количества витков первичной и вторичной обмоток w_1 и w_2 . Если $w_1 > w_2$, то $U_1 > U_2$ и трансформатор называют понижающим, если $w_1 < w_2$, то $U_1 < U_2$ и трансформатор называют повышающим. Отношение ЭДС первичной обмотки E_1 к ЭДС вторичной обмотки E_2 называется коэффициентом трансформации трансформатора. Поскольку ЭДС первичной обмотки измерить невозможно, то коэффициент трансформации определяют как отношение числа витков первичной обмотки w_1 к числу витков вторичной обмотки w_2 . Если число витков неизвестно, то приблизительно коэффициент трансформации можно найти, как отношение напряжений трансформатора в режиме холостого хода.

$$k_u = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{\phi 10}}{U_{\phi 20}}, \quad (1.2)$$

где $U_{\phi 10}$, $U_{\phi 20}$ – фазные напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе трансформатора, В.

При выполнении лабораторной работы необходимо выполнить следующее:

1. измерить сопротивление обмоток постоянному току;
2. составить таблицу напряжений для различных схем включения обмоток трансформатора;
3. испытать трансформатор в режиме холостого хода;
4. испытать трансформатор в режиме короткого замыкания.

1.2. Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Стенд содержит две трехфазные трансформаторные группы ТТГ1 (типа 347.1) и ТТГ2 (типа 347.2). Концы обмоток ВН и НН трансформаторов подсоединены к гнездам, которые закреплены на лицевой панели трансформаторной группы. На лабораторном стенде можно выполнить соединение обмоток звездой и треугольником с помощью проводов, прилагаемых стенду. Первичная обмотка группы ТТГ1 постоянно соединена звездой, ТТГ2 – треугольником.

Паспортные данные однофазного трансформатора трансформаторной группы ТТГ1:

1. Номинальная мощность 80 ВА
2. Номинальное первичное напряжение 230 В
3. Вторичные напряжения, В 127/133/220/226/230/235/242
4. Сема соединения первичных обмоток в группе Y

Паспортные данные однофазного трансформатора трансформаторной группы ТТГ2:

1. Номинальная мощность 80 ВА

2. Номинальное первичное напряжение 230 В
3. Вторичные напряжения, В 127/133/220/226/230/235/242
4. Сема соединения первичных обмоток в группе Δ

Для измерения фазных токов, напряжений и активных мощностей в фазах используется измерительный комплект К540, который включается по четырехпроводной схеме и цифровые мультиметры.

1.3. Порядок выполнения работы

1.3.1. Ознакомьтесь с устройством трехфазного трансформатора, записать его паспортные данные в отчет и используя выражение (1.1) найти номинальные токи для первичной и вторичной обмоток.

1.3.2. Измерить сопротивление обмоток трансформатора постоянному току по методу амперметра и вольтметра, а затем с помощью омметра. Во избежание погрешностей измерений из-за нагрева обмоток ток во время опыта не должен превышать $0,2 I_n$. Схема опыта представлена на рис. 1.2.

Измерения производятся для каждой из фаз при значениях токов, приведенных в таблице 1.1.

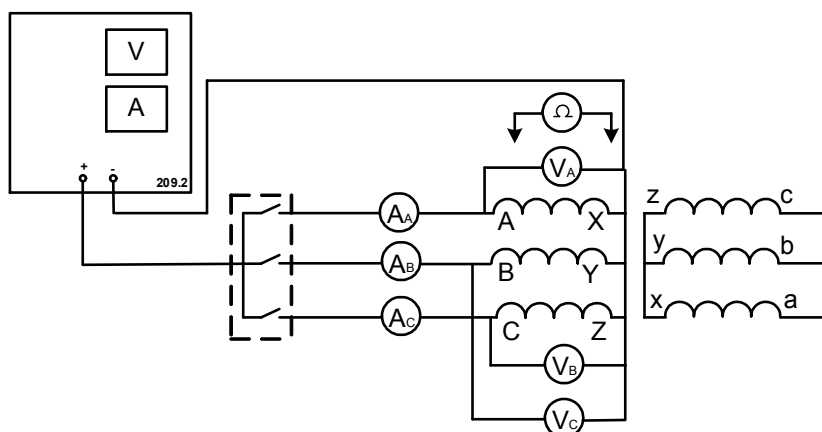


Рисунок 1.2. Схема для измерения омического сопротивления обмоток трансформатора

В таблице $R_{расч}$ – сопротивление одной фазы первичной обмотки трансформатора, рассчитанное по показаниям амперметра и вольтметра; $R_{ср}$ – среднее сопротивление одной фазы первичной обмотки, полученное усреднением $R_{расч}$;

$R_{изм}$ – сопротивление одной фазы первичной обмотки, измеренное с помощью омметра, Ом;

Таблица 1.1. Результаты измерения и расчета сопротивлений обмоток

Опыт	I, А	U, В	$R_{расч}$, Ом	$R_{ср}$, Ом	$R_{изм}$, Ом	R_{75} , Ом
Фаза А	$0,05I_n$					

	0,1I _H						
	0,2I _H						
Фаза В	0,05I _H						
	0,1I _H						
	0,2I _H						
Фаза С	0,05I _H						
	0,1I _H						
	0,2I _H						

R_{75} – сопротивление , приведенное к расчетной температуре $T=75^{\circ}\text{C}$ по формуле:

$$R_{75} = R_{cp} \frac{235 + 75}{235 + t^{\circ}\text{C}}, \quad (1.3)$$

где 75°C – расчетная температура для изоляции классов нагревостойкости А, Е, В; 235 – коэффициент, учитывающий, что обмотка сделана из меди, для алюминиевого провода берется 245, $t^{\circ}\text{C}$ – температура окружающей среды;

Величина сопротивления для каждого значения тока определяется по закону Ома.

1.3.3. Соединить первичные и вторичные обмотки трансформаторов в соответствии с таблицей 1.2 и произвести измерение линейных напряжений трансформатора.

Таблица 1.2. Результаты измерений линейных напряжений трансформатора в соответствии со схемой соединений обмоток

Схема соединения обмоток	Y/Y	Y/ Δ	Δ / Δ	Δ /Y
Напряжения U_1/U_2				

Здесь Y - сопротивление обмотки звездой;

Δ - соединение обмотки треугольником;

U_1, U_2 – линейные напряжения первичной и вторичной обмоток, В.

1.3.3. Испытать трансформатор в режиме холостого хода.

Собрать схему для проведения опыта холостого хода согласно рис.1.3.

Опыт холостого хода проводится при подведенном к первичной обмотке номинальном напряжении и разомкнутой вторичной обмотке, при соединении обмоток по схеме Y/Y. Током вольтметра в цепи вторичной обмотки пренебрегают, в виду его малости. Измерения производятся для каждой из фаз трансформатора. Показания приборов для каждой фазы записываются в табл. 1.3.

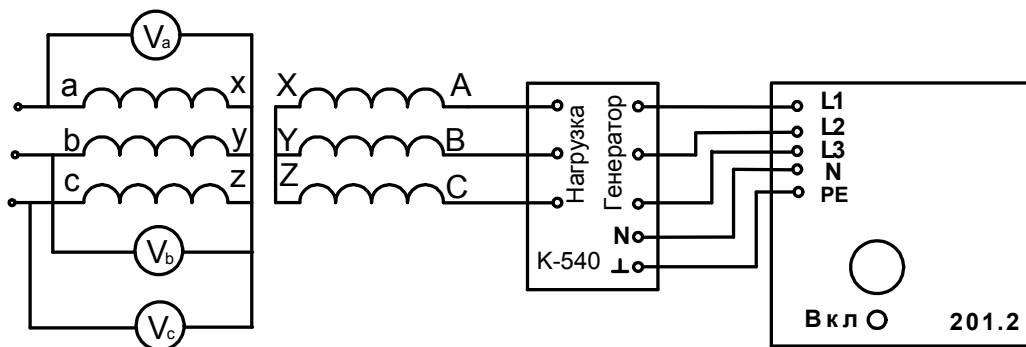


Рисунок 1.3 Схема для проведения опыта холостого хода трансформатора

Таблица 1.3. Результаты опыта холостого хода

Фаза	U_{10i} , В	U_{20i} , В	I_{0i} , А	P_{0i} , Вт	k_u
А					
В					
С					

В таблице 1.3:

U_{10i} , U_{20i} , I_{0i} , P_{0i} – напряжение первичной обмотки, напряжение вторичной обмотки, ток холостого хода и мощность каждой из фаз,

$$k_u = \frac{U_{10i}}{U_{20i}}, \quad (1.4)$$

коэффициент трансформации фазных напряжений исследуемой фазы. Индекс 0 в обозначении указывает на то, что величина измерена в режиме холостого хода, индекс 1 или 2 указывает в какой обмотке сделано измерение, индекс i соответствует букве, обозначающей фазу – А, В, С.

По данным таблицы 1.3 составляется таблица 1.4 для определения справочных и расчетных параметров трансформатора

Таблица 1.4. Справочные и расчетные параметры трансформатора, определяемые из опыта XX

U_{10} , В	U_{20} , В	I_0 , А	i_0 , %	P_0 , Вт	$\cos \varphi_0$	z_0 , Ом	r_0 , Ом	x_0 , Ом	k_u	S_0 , ВА

Величины, входящие в таблицу 1.4, рассчитываются по следующим формулам:

средние значения напряжений первичной и вторичной обмоток, В;

$$U_{10} = \frac{(U_{10A} + U_{10B} + U_{10C})}{3} \quad (1.5)$$

$$U_{20} = \frac{(U_{20a} + U_{20b} + U_{20c})}{3}; \quad (1.6)$$

среднее значение тока холостого хода, А;

$$I_0 = (I_{0A} + I_{0B} + I_{0C})/3, \quad (1.7)$$

процентное значение тока холостого хода

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} 100\%; \quad (1.8)$$

потери холостого хода, Вт

$$P_0 = P_{0A} + P_{0B} + P_{0C}; \quad (1.9)$$

коэффициент мощности трансформатора в режиме холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_{10}I_0}; \quad (1.10)$$

полная мощность, потребляемая трансформатором в режиме ХХ, ВА

$$S_0 = 3U_0I_0; \quad (1.11)$$

полное сопротивление контура намагничивания схемы замещения трансформатора, Ом

$$z_0 = \frac{U_{10}}{I_0}; \quad (1.12)$$

активное сопротивление контура намагничивания схемы замещения трансформатора

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad (1.13)$$

индуктивное сопротивление контура намагничивания схемы замещения трансформатора

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}; \quad (1.14)$$

средний коэффициент трансформации фазных напряжений при соединении обмоток звездой равен коэффициенту трансформации линейных напряжений

$$k_u = U_{10}/U_{20}. \quad (1.15)$$

Привести упрощенную схему замещения трансформатора (рис.1.5б) и указать на ней значения рассчитанных сопротивлений из таблицы 1.4.

Используя данные таблицы 1.4 построить векторную диаграмму для упрощенной схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода. Векторная диаграмма представлена на рис.1.6. Как строится векторная диаграмма описано в разделе 1.4 “Пояснения к выполнению лабораторной работы”.

1.3.4. Испытать трансформатор в режиме короткого замыкания.

Собрать схему рисунка 1.4.

Опыт короткого замыкания КЗ производится при замкнутой накоротко вторичной обмотке трансформатора. Допускается так же закорачивать вторичную обмотку через амперметр с бесконечно малым сопротивлением. Опыты проводятся для каждой из фаз. Показания приборов записываются в таблицу 1.5.

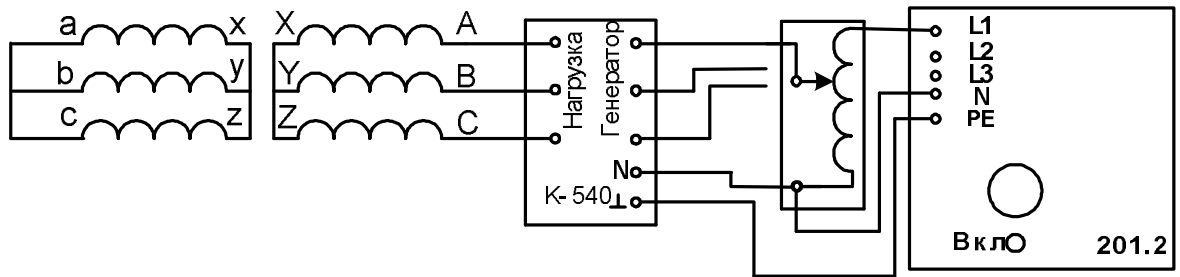


Рисунок. 1.4. Схема для проведения опыта короткого замыкания

Таблица 1.5. Результаты опыта КЗ

№ п/п	I_{ki}, A	U_{ki}, B	$P_i, Bт$
Фаза А			
$I=0,4I_H$			
$I=0,7I_H$			
$I=1I_H$			
Фаза В			
$I=0,4I_H$			
$I=0,7I_H$			
$I=1I_H$			
Фаза С			
$I=0,4I_H$			
$I=0,7I_H$			
$I=1I_H$			

В таблице 1.5 I_{ki} , U_{ki} , P_i – ток, напряжение и мощность каждой из фаз при выполнении опыта короткого замыкания.

Внимание! Прежде чем подать напряжение на схему внимательно прочитайте в разделе 1.4, как выполнять опыт короткого замыкания.

По данным таблицы 1.5 составляется таблица 1.6

Таблица 1.6. Справочные и расчетные параметры трансформатора, определяемые из опыта КЗ

U_k, B	$u_k \%$	$P_k, Bт$	S_k, BA	$\cos\varphi_k$	$Z_k, Ом$	$r_k, Ом$	$x_k, Ом$	$r_1, r_2, Ом$	$x_1, x_2, Ом$

Величины, входящие в таблицу 1.6, рассчитываются только для опыта, при котором $I_{ki}=I_H$ по следующим формулам:

среднее значение напряжения короткого замыкания;

$$U_k = (U_{kA} + U_{kB} + U_{kC}) / 3, \quad (1.15)$$

процентное значение напряжения короткого замыкания;

$$u_k \% = \frac{U_k}{U_{1H}} \cdot 100\%, \quad (1.16)$$

потери короткого замыкания, Вт;

$$P_k = P_A + P_B + P_C, \quad (1.17)$$

полная мощность, потребляемая трансформатором в режиме КЗ;

$$S_k = 3U_k I_k, \quad (1.18)$$

коэффициент мощности трансформатора в режиме КЗ;

$$\cos\varphi_k = \frac{P_k}{S_k}, \quad (1.19)$$

полное сопротивление цепи короткого замыкания;

$$z_k = U_k / I_k, \quad (1.20)$$

активное сопротивление цепи короткого замыкания;

$$r_k = \frac{P_k}{3I_k^2}, \quad (1.21)$$

индуктивное сопротивление цепи короткого замыкания;

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}, \quad (1.22)$$

активные сопротивления первичной и приведенной вторичной обмоток;

$$r_1 = r_2' = \frac{r_k}{2} \quad (1.23)$$

индуктивные сопротивления первичной приведенной вторичной обмоток.

$$x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2}, \quad (1.24)$$

По данным таблицы 1.6 построить характеристики I_k , P_k , $\cos\varphi_k = f(U_k)$, примерный вид которых показан на рис.1.9. Начертить упрощенную схему замещения фазы трансформатора в режиме КЗ и указать на ней обозначения и значения сопротивлений из табл. 1.6. Построить векторную диаграмму для случая, когда ток в первичной обмотке номинальный. Общий вид векторной диаграммы представлен на рис. 1.10.

1.6. Составить отчет о выполненной работе.

1.4. Пояснения к выполнению лабораторной работы и оформлению отчёта

Измерение омического сопротивления обмоток трансформатора постоянному току надо произвести так, чтобы исключить нагрев обмоток иначе их сопротивление не останется постоянным. Для этого опыт проводят как можно быстрее. Номинальный ток определяется по (1.1) из паспортных данных трансформатора, приведенных в начале методических указаний.

Опыт холостого хода проводится при номинальном первичном напряжении, поэтому трансформатор подсоединяют к трехфазному источнику питания с линейным напряжением 400 В. Измерительный комплект показывает величину фазного напряжения. Величина тока холостого хода лежит в пределах $< 0,1$ А. Перед проведением опыта следует с помощью переключателя подключить комплект к исследуемой фазе и установить требуемые пределы измерения амперметра и вольтметра путем нажатия соответствующих кнопок на лицевой панели измерительного

комплекта. Вольтметр V_2 подключают к одноименной фазе вторичной обмотки.

Схемы замещения фазы трансформатора для режима холостого хода составляют учитывая следующее. В режиме холостого хода ток по вторичной обмотке трансформатора не протекает, поэтому полная схема замещения трансформатора будет иметь вид рис.1.5а. Поскольку ток холостого хода мал, то потерями и потоками рассеяния в первичной обмотке можно пренебречь, в этом случае получаем упрощенную схему замещения (рис.1.5б).

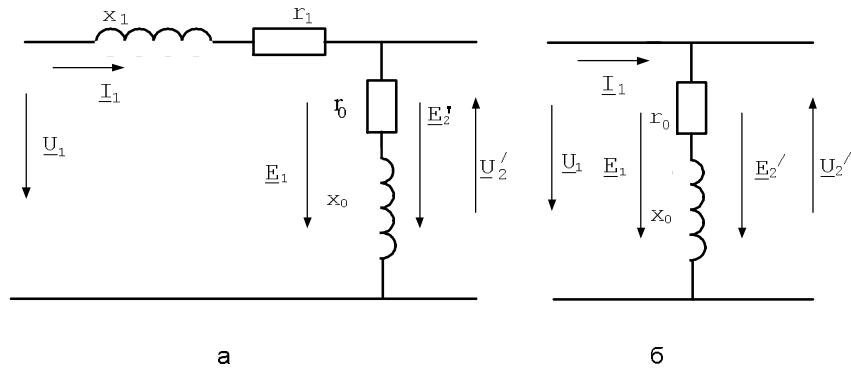


Рисунок 1.5. Полная (а) и упрощенная (б) схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода

Опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении питания. В опыте необходимо снять характеристику короткого замыкания $I_k = f(U_k)$. Для построения характеристики достаточно снять три точки при токах: 0,4; 0,7; и 1 от I_n . Если к первичной обмотке подвести номинальное напряжение, то токи в обмотках достигнут величин, превышающих номинальные в 20-30 раз. Поэтому трансформатор подключают к источнику с регулируемым напряжением - ЛАТру. Первичное напряжение плавно увеличивают с помощью ЛАТра от нуля до величины, при которой ток в первичной обмотке достигнет требуемого значения. Напряжение короткого замыкания составляет (4...15)% от номинального значения. Следовательно, амплитуда магнитного потока так же составит (4...15)% от потока в номинальном режиме работы. Маленький поток создаст незначительные вихревые токи в сердечнике, и потерями в сердечнике можно пренебречь. Поэтому в схему замещения фазы трансформатора в режиме короткого замыкания элементы r_0 и x_0 не вводят. Схемы замещения фазы трансформатора приведены на рис.1.6.

$$U_r = r_k I_{kn}; \quad U_x = x_k I_{kn}. \quad (1.25)$$

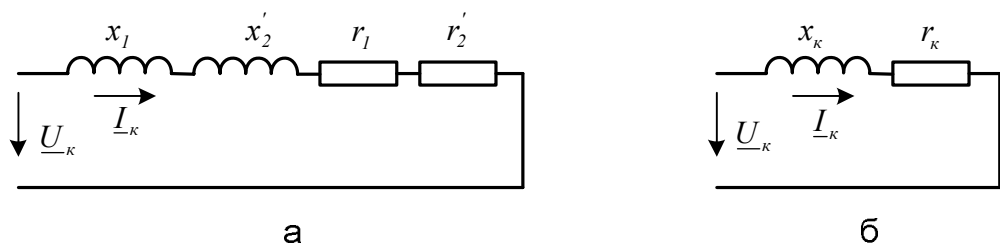


Рисунок 1.6. Полная (а) и упрощенная (б) схемы замещения трансформатора в режиме короткого замыкания

Для построения векторной диаграммы (рис.1.7) необходимо рассчитать падения напряжения при номинальном токе на элементах упрощенной схемы замещения для режима КЗ:

Провести вектор тока в произвольном масштабе, и используя известные фазные соотношения построить векторную диаграмму напряжений соответствующую формуле:

$$\underline{U}_k = \underline{I}_H (r_k + jx_k). \quad (1.26)$$

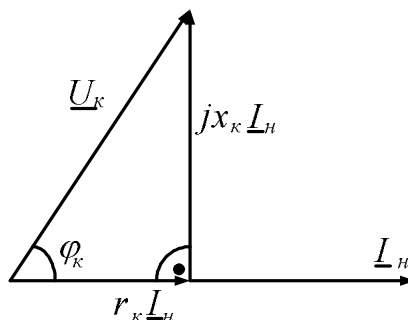


Рис 1.7. Векторная диаграмма трансформатора в режиме короткого замыкания.

1.5. Контрольные вопросы

- 1.5.1 Для чего нужен и как устроен силовой трансформатор?
- 1.5.2. Объяснить принцип действия трансформатора.
- 1.5.3. Какие данные трансформатора заносятся в каталог из опытов холостого хода и короткого замыкания?
- 1.5.4. Какие виды охлаждения используются в трансформаторах и какие буквенные обозначения они имеют?
- 1.5.5. Как проводится опыт холостого хода? На что расходуется мощность P_x и как это можно объяснить?
- 1.5.6. Как проводится опыт короткого замыкания? На что расходуется мощность P_k и как это можно объяснить?

1.6. Список используемой литературы

1. Беспалов В.Я. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец; М.: Издательский центр Академия, 2006. 320 с. Библиогр.: с. 309-313.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / А. И. Вольдек; Л.: Наука, 1974. 839 с. Библиогр.: с. 831-838.

РАБОТА №2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМЕ РАБОТЫ ПОД НАГРУЗКОЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ - Изучить влияние величины и характера нагрузки на изменения напряжения трансформатора, освоить методику определения КПД трансформатора, построить векторную диаграмму нагруженного трансформатора.

2.1. Общие положения

При подключении нагрузки к вторичной обмотке трансформатора в ней появляется ток, который вызывает пропорциональное увеличение потребляемого из сети тока, а напряжение на зажимах вторичной обмотки изменяется. Причиной изменения этого напряжения является падение напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях вторичной обмотки. Величина изменения вторичного напряжения силового трансформатора при нагрузке зависит от её характера. Нагрузка трансформатора может быть активной, индуктивной, емкостной и смешанной. Зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos\varphi_2 = \text{const}$ называется *внешней характеристикой*.

В данной лабораторной работе предстоит снять внешние характеристики при активной, активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках.

2.2. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на лабораторном комплекте, который состоит из функциональных блоков модульного типа. Перед началом работы собрать схему для исследования работы трансформатора с активной и активно-индуктивной нагрузками (рис.2.1).

Первая точка всех характеристик в этой работе снимается для режима холостого хода ($I_2 = 0$).

Первой снимается внешняя характеристика при активной нагрузке $\cos\varphi = 1$. При снятии этой характеристики рукоятки переключателей индуктивной нагрузки должны находиться в положении 0. Для снятия очередной точки характеристики, ток нагрузки увеличивают переводом рукояток изменения активной нагрузки в следующее (большее) положение. В процессе проведения опыта рукоятки переключателей в трёх фазах активной нагрузки должны находиться в одинаковом положении. Результаты измерений записывают в таблицу 2.1.

После снятия последней точки внешней характеристики для активной нагрузки рукоятки потенциометров перевести в положение 0.

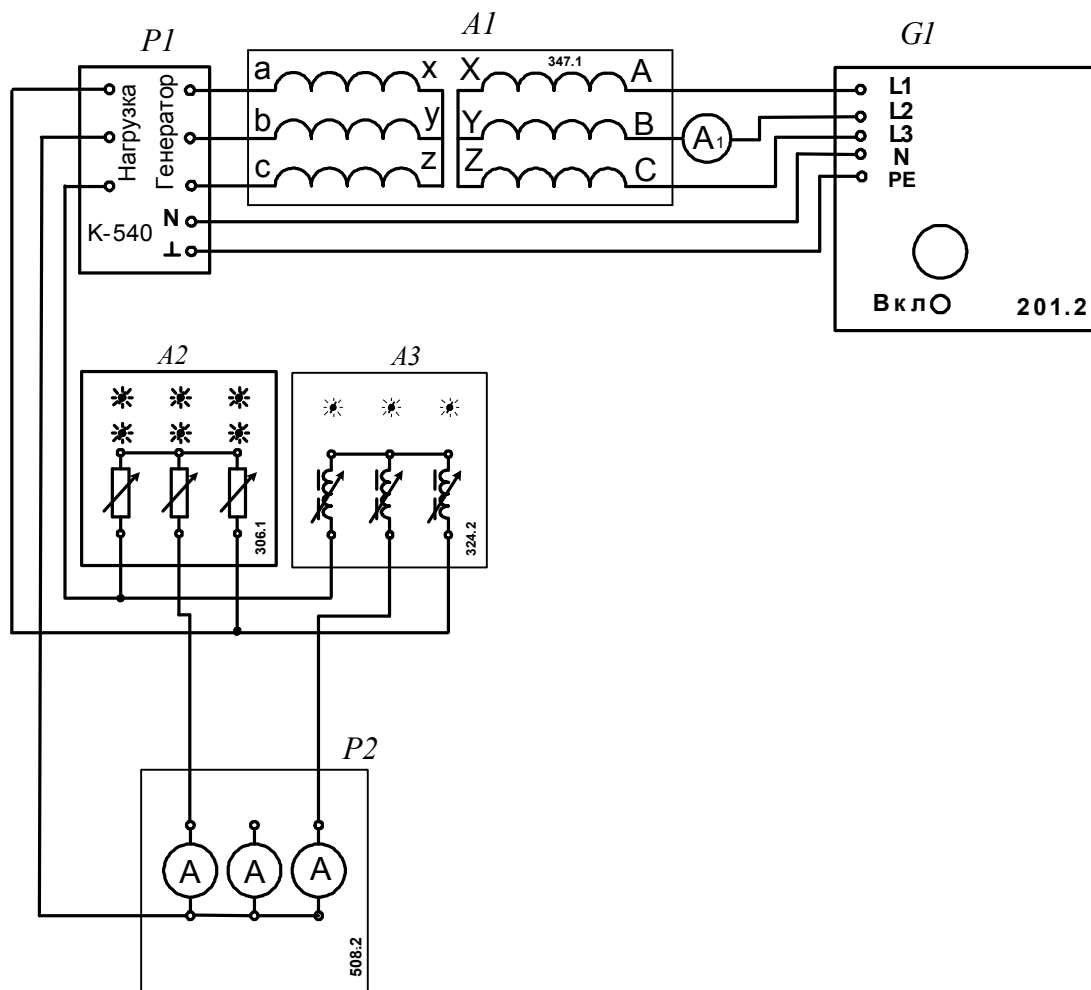


Рисунок 2.1. Схема для исследования трехфазного трансформатора при активной и активно-индуктивной нагрузках

Таблица 2.1 Внешняя характеристика при $\cos \varphi_2 = 1$

№ п/п	I_1, A	I_2, A	U_1, B	U_2, B	$P_2, Вт$	$S_2, ВА$	β	$\Delta u_2, \%$	$\cos \varphi$	η
1										
...										
6										

Второй снимается внешняя характеристика трансформатора при активно-индуктивной нагрузке. При снятии этой характеристики требуется поддерживать неизменным и равным 0,7 значение коэффициента мощности $\cos \varphi_2$. Снятие точек характеристики рекомендуется производить в следующей последовательности. Вначале включают первую ступень реостата и по амперметру определяют значение активного тока I_R . Затем меняя положение рукояток переключателей индуктивной нагрузки в трёх фазах симметрично добиваются равенства активного и индуктивного токов $I_L = I_R$. Результаты измерений записывают в таблицу 2.2. Следующие точки характеристики снимаются аналогично.

Таблица 2.2. Внешняя характеристика при $\cos \varphi_2 = 0,7$ (инд)

№ п/п	$I_R,$ А	$I_L,$ А	$I_2,$ А	$I_1,$ А	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$P_2,$ Вт	$S_2,$ ВА	β	$\Delta u_2,$ %	$\cos \varphi_2$	η
1												
...												
6												

Третьей снимаются характеристики при активно-ёмкостной нагрузке. Для этой характеристики собирается схема рисунка 2.2.

При исследовании работы трансформатора на активно-ёмкостную нагрузку так же требуется поддерживать неизменным и равным 0,7 значение коэффициента мощности $\cos \varphi_2$. Снятие точек характеристики рекомендуется производить в такой же последовательности, как и при исследовании работы трансформатора на активно-индуктивную нагрузку. Результаты измерений записываются в таблицу 2.3.

Таблица 2.3. Внешняя характеристика при $\cos \varphi_2 = 0,7$ (ёмк.)

№ п/п	$I_R,$ А	$I_C,$ А	$I_2,$ А	$I_1,$ А	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$P_2,$ Вт	$S_2,$ ВА	β	$\Delta u_2,$ %	$\cos \varphi_2$	η
1												
...												
6												

В таблицах 2.1, 2.2 и 2.3 приняты следующие обозначения

I_1, I_2 - первичные и вторичные токи трансформатора;

I_R, I_L, I_C - активная, индуктивная и ёмкостная составляющие токов нагрузки трансформатора (измеряются амперметрами A_R, A_C, A_L);

U_1, U_2 - первичное и вторичное напряжения;

P_2 - активная мощность нагрузки (сумма мощностей всех фаз или утроенное значение одной из фаз);

$S_2 = 3 U_2 I_2$ - полная мощность нагрузки трансформатора;

Δu - изменение вторичного напряжения, %;

η - коэффициент полезного действия,

$\beta = I_2 / I_{2H}$ - коэффициент нагрузки трансформатора;

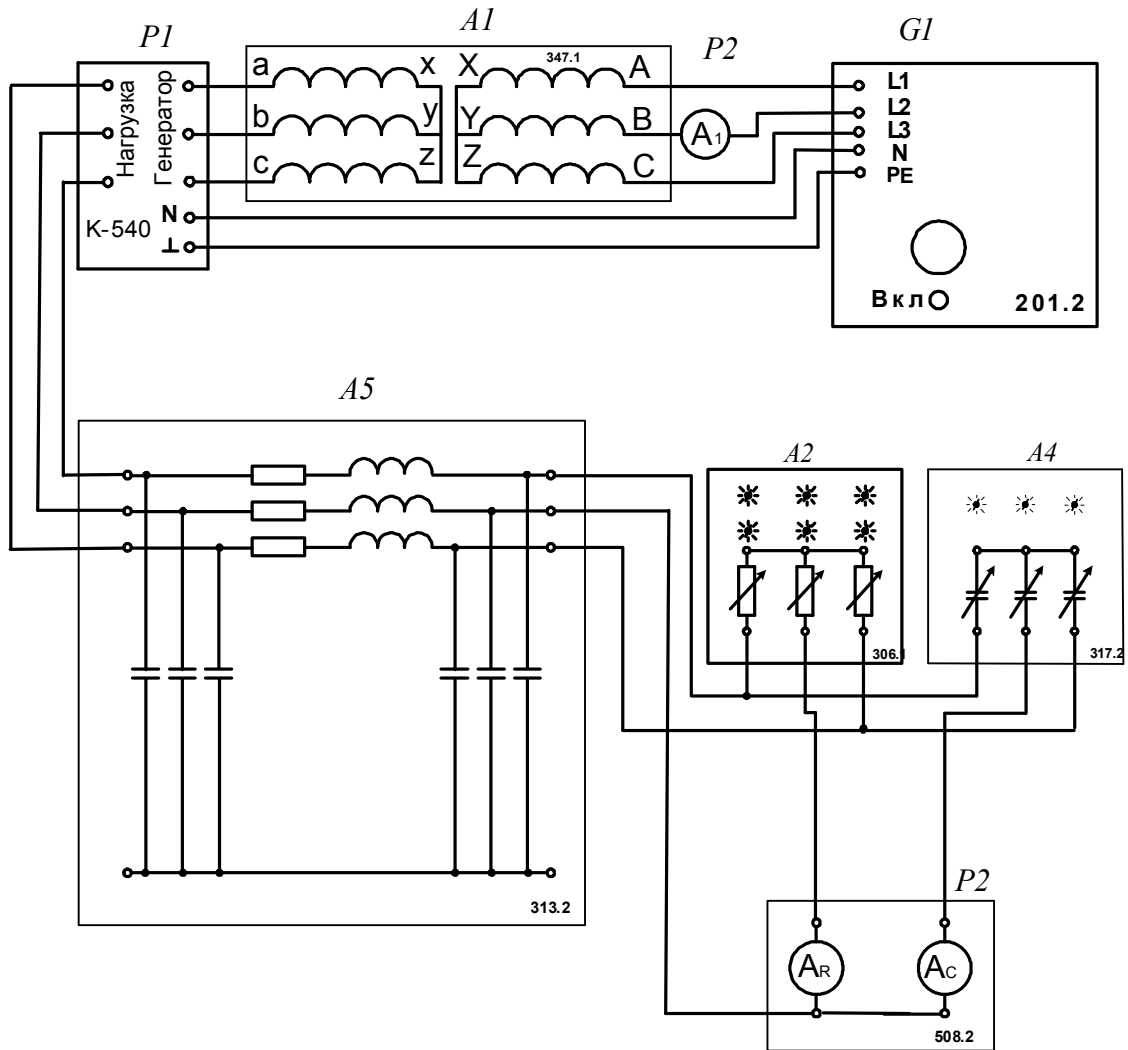


Рисунок 2.2. Схема для исследования трехфазного трансформатора при активно-ёмкостной нагрузке

2.3. Оформление отчёта

1. По данным опыта построить:

- Внешние характеристики трансформатора при активной, активно-индуктивной и активно-ёмкостной нагрузках (в одной системе координат).
- Зависимости $\eta = f(I_2)$ при $\cos\varphi_2 = \text{const}$ (в одной системе координат).
- Векторную диаграмму для режима нагрузки, заданного преподавателем.

2. Используя данные таблиц 1.4 и 1.6 лабораторной работы №1 начертить T-образную схему замещения трансформатора в режиме работы под нагрузкой и написать значения сопротивлений на ней.

При заполнении таблиц процентные значения изменения вторичного напряжения Δu_2 рассчитываются по формуле (2.1)

$$\Delta U_2 = \frac{U_{20} - U_{2i}}{U_{2i}} 100 \quad (2.1),$$

где: U_{20} – значение вторичного напряжения в режиме холостого хода, U_{2i} – значения напряжения при работе трансформатора под нагрузкой.

Значения КПД рассчитываются по формуле (2.2)

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_K} \quad (2.2),$$

где: P_0, P_K - потери ХХ и КЗ (их величины берутся из опытов холостого хода и короткого замыкания лабораторной работы №1).

Анализ работы трансформатора под нагрузкой производят, используя понятие приведенного трансформатора. В приведенном трансформаторе параметры вторичной обмотки приводят к параметрам первичной обмотки таким образом, чтобы напряжения на зажимах этих обмоток были одинаковыми. Это позволяет заменить магнитную связь между обмотками электрической, что упрощает расчет электрических цепей, содержащих трансформатор. Приведённые величины обозначаются со штрихами.

Схема замещения приведённого трансформатора приведена на рис. 2.3.

Величины активных и реактивных сопротивлений, входящих в схему, определяются из опытов холостого хода и короткого замыкания или из данных каталога на трансформаторы.

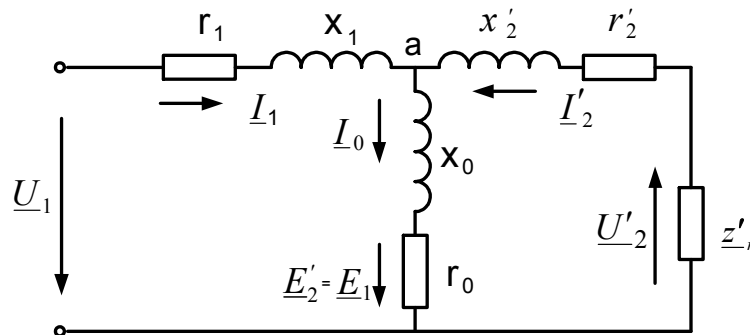


Рисунок 2.3. Т-образная схема замещения трансформатора

Для первичной и вторичной цепей схемы рис.2.3 могут быть составлены по второму закону Кирхгофа уравнения электрического состояния

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 r_1 + j \underline{I}_1 x_1, \quad (2.3)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 r'_2 - j \underline{I}'_2 x'_2, \quad (2.4)$$

где $\underline{U}_1, \underline{U}'_2$ - напряжение первичной и приведенное напряжение вторичной обмоток; $\underline{E}_1, \underline{E}'_2$ - ЭДС первичной и приведенная ЭДС вторичной обмоток, В; $\underline{I}_1, \underline{I}'_2$ - токи первичной и приведенной вторичной обмоток, А; x_1, x'_2 - индуктивные сопротивления рассеяния первичной и приведенной

вторичной обмоток, Ом; r_1, r_2' - активное сопротивление первичной и приведенной вторичной обмоток, Ом.

Для узла a схемы рис.2.3 по первому закону Кирхгофа можно составить уравнение

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2 \quad (2.5)$$

где \underline{I}_0 - комплекс тока холостого хода трансформатора.

На основании уравнений (2.3)...(2.5) производится *построение векторной диаграммы* напряжений и токов для одной фазы трехфазного равномерно загруженного трансформатора. На рисунке 2.4 приведена диаграмма трансформатора, работающего на активно-индуктивную нагрузку.

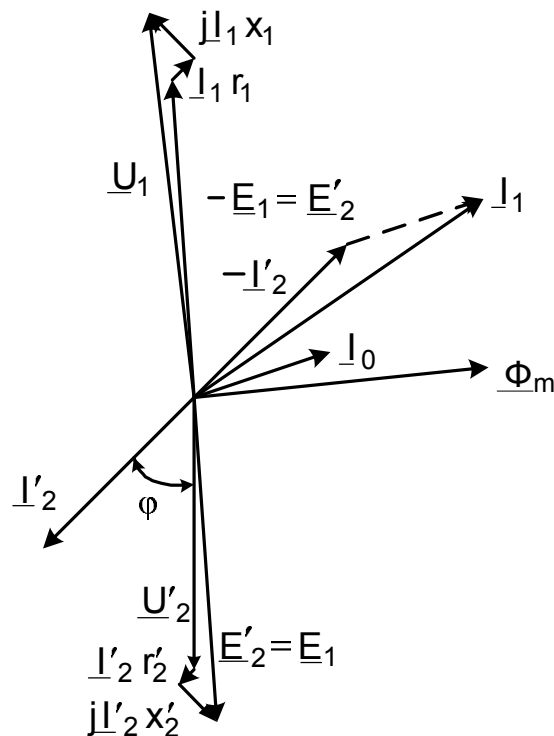


Рисунок 2.4. Векторная диаграмма трансформатора при индуктивно-активной нагрузке

Прежде, чем строить диаграмму требуется проделать следующее.

1. Берём из опыта, указанного преподавателем в таблицах 2.2...2.3, значения U_1, I_1, U_2, I_2 .
2. Рассчитываем приведенные действующие значения тока и напряжения вторичной обмотки

$$U'_2 = U_2 k_u, \quad (2.4)$$

$$I'_2 = I_2 / k_u. \quad (2.5)$$

3. Рассчитываем падения напряжений на элементах схемы замещения обмоток

$$U_{r1} = r_1 I_1, U_{x1} = x_1 I_1, U'_{r2} = r'_2 I'_2, U'_{x2} = x'_2 I'_2. \quad (2.6)$$

4. Задаёмся масштабом напряжений m_u , В/мм.

5. Рассчитываем длины векторов найденных выше напряжений

$$l_{U_i} = \frac{U_i}{m_u}. \quad (2.7)$$

6. Задаёмся масштабом тока m_I , А/мм.

7. Рассчитываем длины векторов токов I_1, I'_2, I_0

$$l_i = \frac{I_i}{m_i}. \quad (2.8)$$

8. Определяем угол φ_2 сдвига фаз между током и напряжением вторичной обмотки

$$\varphi = \arccos \frac{P_2}{S_2}. \quad (2.9)$$

9. Определяем угол α сдвига фаз между током I_0 и магнитным потоком Φ

$$\alpha = 90^\circ - \varphi_0, \quad (2.10)$$

где φ_0 – угол сдвига фаз между током и напряжением трансформатора в режиме холостого хода.

Значения $k_U, r_1, x_1, r'_2, x'_2, I_0, \varphi_0$ берутся из лабораторной работы №1.

Рассчитав длины векторов, приступаем к построению векторной диаграммы.

Вначале строится диаграмма для схемы замещения вторичной обмотки. Откладываем вектор напряжения \underline{U}'_2 вниз от начала координат на мнимой оси j комплексной плоскости. К нему под углом φ_2 проводим вектор тока \underline{I}'_2 . Угол φ_2 определяется характером нагрузки. Так, при активно-индуктивной нагрузке ток отстаёт от напряжения, поэтому вектор тока откладываем влево от вектора напряжения под углом φ_2 . От конца вектора \underline{U}'_2 откладываем два падения напряжения. Первое $\underline{I}'_2 r'_2$ - совпадает с током \underline{I}'_2 , а второе $j \underline{I}'_2 x'_2$ - опережает на 90° . Согласно (2.4) получаем вектор ЭДС \underline{E}'_2 .

Векторную диаграмму для первичной обмотки начинают с построения диаграммы токов. Для этого в произвольном масштабе проводим вектор амплитуды магнитного потока Φ_m , который опережает вектор ЭДС \underline{E}'_2 на угол 90° . Далее откладываем ток \underline{I}_0 , который опережает вектор потока Φ_m на угол α .

Складывая \underline{I}_0 и $-\underline{I}'_2$ получаем комплекс тока \underline{I}_1 .

Векторная диаграмма напряжений для первичной обмотки строится на основании формулы (2.3). В соответствии с формулой проводим вектор $-\underline{E}_1$ равным и противоположно направленным вектору \underline{E}'_2 . Отложив от конца \underline{E}'_2 вектор падения напряжения на активном элементе \underline{U}_{r1} и падения напряжения на индуктивном элементе \underline{U}_{x1} , получаем вектор напряжения \underline{U}_1 .

2.4. Контрольные вопросы

1. Объяснить, чем вызвано изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора?
2. Как влияет характер нагрузки на изменение вторичного напряжения трансформатора?
3. Как строится векторная диаграмма трансформатора под нагрузкой?
4. Как влияет величина нагрузки на КПД трансформатора?

2.5. Список используемой литературы

1. Беспалов, В. Я. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котленец; М.: Издательский центр Академия, 2006. 320 с. Библиогр.: с. 309-313.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / А. И. Вольдек; Л.: Наука, 1974. 839 с. Библиогр.: с. 831-838.

РАБОТА №3. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – изучить устройство асинхронного двигателя, научиться снимать рабочие характеристики двигателя.

3.1. Общие положения

Принцип действия большинства машин переменного тока основан на использовании кругового вращающегося магнитного поля. *Асинхронным* называется двигатель переменного тока, у которого частота вращения ротора меньше, чем частота вращения магнитного поля, т. е. частоты вращения не синхронны. В греческом языке отрицание выражается с помощью приставки “а”, отсюда и название двигателя.

Асинхронные двигатели являются наиболее распространенными электродвигателями, особенно в нерегулируемых электроприводах малой и средней мощности. Они просты, дешевы, надежны в эксплуатации, экономичны и удобны в обслуживании.

3.1.1. Конструкция трёхфазных асинхронных двигателей

Трёхфазный асинхронный двигатель, как и любая электрическая машина, состоит из двух основных частей: неподвижной части - статора и вращающейся части - ротора. По конструкции ротора асинхронные двигатели подразделяются на два основных типа: двигатели с короткозамкнутым ротором (короткозамкнутые двигатели) и двигатели с фазным ротором, которые так же называют двигателями с контактными кольцами.

Статор двигателя состоит из магнитопровода (сердечника), обмотки, корпуса и подшипниковых щитов. Сердечник статора представляет собой полый цилиндр с пазами на внутренней поверхности. Сердечник набирается из отдельных пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга слоем маслоканифольного лака в машинах средней и большой мощности, или оксидной пленки в машинах малой мощности. Сердечник статора помещается в корпус, который выполняется из алюминия или чугуна. В пазы сердечника статора укладывается трехфазная обмотка. Обмотку статора выполняют в виде многовитковых катушек, обычно имеющих одинаковые размеры. Каждая фаза статорной обмотки состоит из нескольких последовательно включенных катушек. Фазы обмотки статора сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 120° . Начала и концы обмотки статора выводятся в клемную коробку, закрепленную на корпусе, где соединяются в звезду или треугольник.

Цилиндрический сердечник ротора так же состоит из отдельных изолированных друг от друга пластин электротехнической стали, которые напрессовываются на вал. На внешней кромке пластин сердечника ротора выштамповываются овальные отверстия, которые после сборки пластин образуют закрытые пазы. Обмотку ротора в двигателях малой и средней

мощности выполняют путем заливки расплавленного алюминиевого сплава в пазы, после остывания которого образуются стержни. Одновременно с обоих торцов сердечника ротора отливаются кольца, которые замыкают стержни, образуя короткозамкнутую конструкцию. Для улучшения охлаждения двигателя вместе с кольцами отливают, примыкающие к ним вентиляционные лопасти. В машинах большой мощности используется сварная короткозамкнутая обмотка – в пазы вставляют медные стержни, которые по торцам приваривают к медным замыкающим кольцам. Короткозамкнутая обмотка по виду напоминает колесо в беличьей клетке, поэтому ее называют беличьей клеткой.

Статор двигателя с фазным ротором по конструкции такой же, как и у короткозамкнутого двигателя. Конструкция ротора отличается тем, что в пазы сердечника закладывается обмотка, выполненная из провода. Обмотка ротора выполняется так, что бы число полюсов u , создаваемого ею, магнитного поля, было таким же, как и u создаваемого обмоткой статора. Фазы обмотки соединяют в звезду, нейтраль изолируется внутри конструкции, а три вывода подсоединяют к контактным кольцам, расположенным на валу двигателя. Кольца изолированы между собой и от вала слоем диэлектрика, к ним с помощью неподвижных щеток подсоединяют пусковые и регулировочные реостаты, которые используются для уменьшения пусковых токов или для регулировки частоты вращения ротора двигателя. При отсутствии реостатов выводы обмотки через щетки замыкаются накоротко. Вал ротора вращается в подшипниках, укрепленных в подшипниковых щитах, которые крепятся с торцов к корпусу статора.

3.1.2. Принцип действия асинхронного двигателя

Принцип действия рассмотрим на примере асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. При подключении обмотки статора к трехфазной сети в ней протекают трехфазные токи, которые возбуждают в магнитопроводе круговое вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется выражением

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (3.1)$$

где: n_1 – частота вращения магнитного поля, об/мин; f_1 , Гц – частота токов питающей сети; p – количество пар полюсов магнитного поля.

Силовые линии магнитного поля пересекают стержни обмотки ротора и возбуждают в них ЭДС. Поскольку обмотка короткозамкнутая в ней, за счет наведенной ЭДС, возникает ток. На стержни с током обмотки ротора, находящихся в магнитном поле, действуют силы, стремящиеся вытолкнуть стержни из магнитного поля. Совокупное действие сил, приложенных ко всем стержням ротора, создаёт электромагнитный момент $M_{эм}$, под действием которого ротор начинает вращаться в направлении вращения магнитного поля. По мере возрастания частоты вращения ротора n_2 , частота $n_1 - n_2$ относительно его движения в равномерно вращающемся магнитном

поле уменьшается. Силовые линии магнитного поля пересекают стержни с меньшей скоростью, в связи с этим уменьшаются величины ЭДС (т.к. $e = Blv$), тока и электромагнитного момента $M_{эм}$. При некоторой частоте вращения ротора ($n_2 < n_1$) наступит равновесие между электромагнитным вращающим моментом $M_{эм}$, моментом сопротивления, складывающимся из момента нагрузки $M_{наг}$ и момента M_0 (момента холостого хода), необходимого для преодоления сил трением в подшипниках и сил торможения в вентиляторе.

$$M_{эм} = M_{наг} + M_0. \quad (3.2)$$

Выражение (3.2) называется уравнением равновесия моментов. Скорость вращения ротора при равновесии моментов становится постоянной. Таким образом, принцип работы асинхронных двигателей основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами, которые наводятся этим полем в проводниках ротора. Ротор и магнитное поле вращаются в пространстве в одном направлении, но с разными скоростями. Скорость вращения ротора двигателя всегда меньше скорости вращения магнитного поля, что обусловлено принципом действия двигателя. Поскольку, если $n_2 = n_1$ ротор и поле статора будут неподвижны относительно друг друга, магнитный поток не будет пересекать проводники (стержни) обмотки ротора, а следовательно в проводниках не будут индуцироваться ЭДС, в обмотке ротора тока не будет, а значит электромагнитный момент не возникнет.

Частоту вращения магнитного поля статора относительно ротора называют скольжением. Скольжение выражают в долях от частоты вращения магнитного поля и обозначают буквой s

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (3.3)$$

В двигателях скольжение характеризует отставание скорости вращения ротора от скорости вращения магнитного поля.

3.2. Описание лабораторного стенда

Лабораторная работа выполняется на лабораторном комплекте, который состоит из электромашинного агрегата и функциональных блоков модульного типа.

Электромашинный агрегат предназначен для электромеханического преобразования энергии. Он включает спаренные между собой и установленные на едином основании:

- машину постоянного тока;
- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- преобразователь угловых перемещений.

Выводы обмоток машины постоянного и двигателя переменного тока выведены через гнезда на терминальные панели, прикрепленные к их корпусам. Начала фаз статорной обмотки асинхронного двигателя подсоединяются к гнездам U1, V1, W1, а концы – к гнездам U2, V2, W2. Обмотка якоря машины постоянного тока подсоединена к гнездам A1, A2, а

обмотка возбуждения – к E1, E2. Направление вращения электромашинного агрегата – любое.

Спаренными называются электрические машины, валы которых соединены механически с помощью муфты, вал машины переменного тока так же сочленен с преобразователем угловых перемещений. Машина постоянного тока работает в режиме генератора и используется в качестве механической нагрузки асинхронного двигателя. К якорю генератора постоянного тока (ГПТ) подключается реостат, сопротивление которого при выполнении лабораторной работы не изменяют. В процессе выполнения лабораторной работы электрическую нагрузку (ток) генератора постепенно увеличивают, что вызывает увеличение тормозного момента на его валу. Что бы преодолеть возрастающий тормозной момент генератора (механическую нагрузку) двигатель должен потреблять из сети большую электрическую мощность. Здесь наглядно проявляется соблюдение закона сохранения энергии: чем больше электрической энергии ГПТ отдает реостату, тем больше механической энергии он потребляет от асинхронного двигателя, который в свою очередь потребляет из сети больше электрической энергии. Увеличение тока генератора производят путём увеличения напряжения, подаваемого на обмотку возбуждения. В результате ток возбуждения возрастает, за счет этого увеличивается магнитный поток, который индуцирует большую ЭДС в обмотке якоря ГПТ и ток в цепи якоря возрастает. Следует обратить внимание на то, что цепь возбуждения ГПТ подключается к клеммам питания цепи якоря в источнике питания машины постоянного тока.

Для защиты пользователей от движущихся частей агрегата его соединительные муфты закрыты кожухами.

Паспортные данные устройств агрегата (технические характеристики) приведены ниже.

3.2.1. Паспортные данные электромашинного агрегата

Спаренные электрические машины:

Машина постоянного тока

Номинальная полезная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение якоря, В	220
Номинальный ток якоря, А	0,56
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	0,2
Возбуждение	независимое
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
КПД, %	57,5
Направление вращения	реверсивное
Режим работы	двигательный/генераторный

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Число фаз на статоре	3
Номинальная активная мощность, Вт	40

Номинальное напряжение, В	220
$\cos \varphi_n$	0,7
Номинальный ток статора, А	0,15
Направление вращения	любое
Номинальная частота вращения, об/мин.	360
Преобразователь угловых перемещений	
Тип	BE 178A5
Количество выходных каналов	6
Выходные сигналы	серия импульсов и опорный импульс
Число импульсов за оборот в серии	1000
Пределы изменения рабочих частот вращения вала, об/мин	0...6000

3.3. Порядок выполнения лабораторной работы

3.3.1. Записать паспортные данные испытуемого двигателя и нагрузочного генератора.

3.3.2. По схеме рисунка 3.1. определить методом амперметра и вольтметра сопротивление обмоток статора постоянному току. Результаты опыта занести в таблицу 3.1.

3.3.3. Провести испытание двигателя в режиме холостого хода по схеме рисунка 3.2. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 3.2.

3.3.4. Испытать двигатель в режиме работы под нагрузкой по схеме рисунка 3.3. Результаты измерений занести в таблицу 3.3.

3.4. Пояснения к выполнению лабораторной работы и заполнению таблиц

3.4.1. Определение омического сопротивления обмоток статора

Омическое сопротивление определяется методом амперметра и вольтметра по схеме рисунка 3.1. В качестве амперметров и вольтметров используются два блока цифровых мультиметров.

Для проведения измерений необходимо с помощью одного из трёх трёхполюсных выключателей А1 включить исследуемую фазу. Затем с помощью источника питания машины постоянного тока G2 установить ток $I = 0,3I_n$. Величина тока I_n асинхронного двигателя берётся из паспортных данных. Значения измеренных токов и напряжений заносятся в таблицу 3.1 и используются для расчета омического сопротивления по формулам (3.4, 3.5, 3.6).

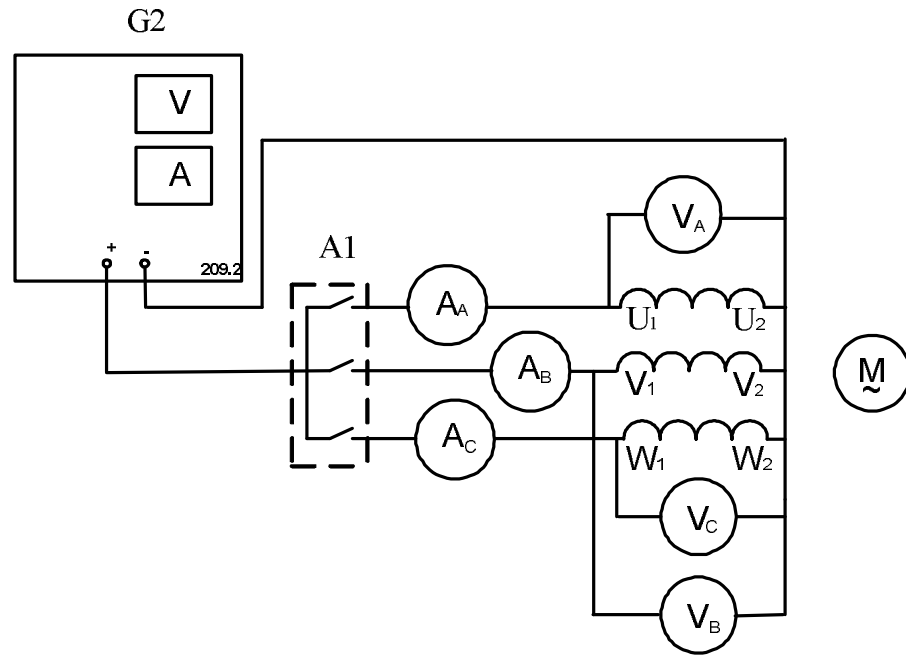


Рисунок 3.1. Схема для определения омического сопротивления обмоток статора асинхронного двигателя

Таблица 3.1. Определение омического сопротивления обмоток статора

Измеряемые фазы	I, А	U, В	R _{изм} , Ом	R _i , Ом	R _{ср} , Ом	R ₇₅ , Ом
Фаза А						
Фаза В						
Фаза С						

Омическое сопротивление фаз обмотки статора определяется по закону Ома

$$R_i = \frac{U}{I} \quad (3.4)$$

где: R_i – сопротивление цепи постоянному току для соединения в соответствии с таблицей 3.1.

Среднее значение сопротивления одной фазы обмотки рассчитывается по формуле

$$R_{ср} = \frac{R_A + R_B + R_C}{3} \quad (3.5)$$

Сопротивление, приведенное к температуре 75⁰С, определяется по формуле

$$R_{75} = R_{ср} \frac{235+75}{235+t} \quad (3.6)$$

где: t – температура в помещении, С⁰.

3.4.2. Испытание двигателя в режиме холостого хода

Для испытания двигателя, в этом режиме необходимо собрать схему рисунка 3.2. Установить переключатель напряжений вторичной обмотки трансформатора A2 на значение 127 В. Включив трёхфазный источник питания G1, подать напряжение на двигатель. После того как стрелка амперметра остановится, занести результаты опыта в первый пункт таблицы 3.3. Не выключая двигатель сделать опыт холостого хода для напряжений $U_2=133; 220; 226$ В. Напряжения изменяются переводом переключателя трансформатора A2 в соответствующее положение. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

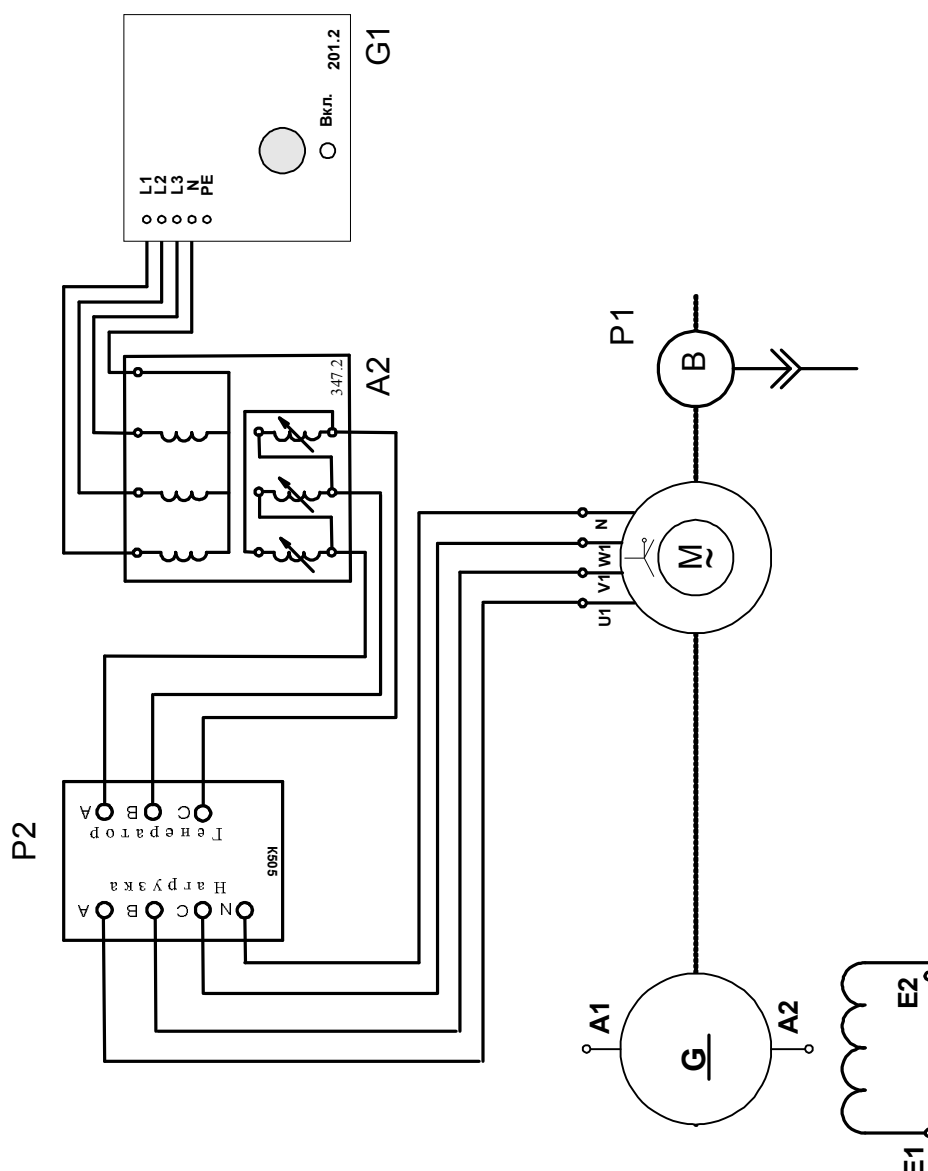


Рисунок 3.2. Схема для испытания асинхронного двигателя в режиме холостого хода

Потери в стали двигателя определяются по выражению

$$P'_0 = 3P_0 - 3R_{75}I_0^2. \quad (3.7)$$

Коэффициент мощности определяется следующим образом

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_0I_0}, \quad (3.8)$$

где U_0 I_0 – фазные значения напряжения и тока.

Таблица 3.2. Результаты испытания асинхронного двигателя в режиме холостого хода

№ п/п	U_0 , В	I_0 , А	P_0 , Вт	P'_0 , Вт	$\cos\varphi_0$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

По данным таблицы 3.2 построить в одной системе координат зависимости I_0 , P_0 и $\cos\varphi_0$ от U_0 .

3.4.3. Исследование работы асинхронного двигателя под нагрузкой.

В режиме работы под нагрузкой снимаются рабочие характеристики двигателя, под которыми понимаются зависимости: частоты вращения ротора n_2 ; тока I_1 ; мощности, потребляемой двигателем P_1 ; электромагнитного момента, развиваемого двигателем M ; коэффициента мощности $\cos\varphi$ и КПД от отдаваемой двигателем мощности P_2 . Для снятия рабочих характеристик собирается схема (Рис. 3.3)

Механическая нагрузка на валу асинхронного двигателя создается тормозным моментом генератора постоянного тока ГПТ. Снятие характеристик следует начинать с режима холостого хода асинхронного двигателя. Для этого на статор двигателя подается номинальное напряжение, а на обмотку возбуждения ГПТ напряжение не подаётся. Величину, подаваемого на статор асинхронного двигателя напряжения следует определять по показаниям вольтметра измерительного комплекта, а не по цифрам на переключателе напряжений трансформатора. Затем снимаются 5 точек рабочих характеристик асинхронного двигателя. Для этого подаются напряжения на обмотку возбуждения ГПТ от источника G2, которое постепенно увеличивают таким образом, что бы ток якоря ГПТ изменялся в пределах (0,1...0,7)А. Ток статора асинхронного двигателя при этом должен изменяться в пределах $I_0 < I_i \leq I_H$.

Результаты измерений заносятся в таблицу 3.3.

Таблица 3.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя при $U_{1\phi} =$

№ п/п	I_1, A	$P_{1\phi}, Вт$	$n_2, об/мин$	$U_r, В$	I_r, A	s	$M, Нм$	$\cos\varphi$	$P_2, Вт$	η
1										
2										
3										
4										
5										
6										

В таблице 3.3 I_1 и $P_{1\phi}$ – ток и активная мощность фазы асинхронного двигателя измеряются измерительным комплектом К505; n_2 – частота вращения ротора асинхронного двигателя измеряется указателем угловых перемещений; U_r и I_r – напряжение и ток генератора измеряются цифровыми мультиметрами A_r и V_r (рис. 3. 3). Остальные величины рассчитываются по формулам (3.9 – 3.15).

Расчет скольжения s производится по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad (3.9)$$

где: n_1 – частота вращения магнитного поля; n_2 – частота вращения ротора.

Значения частоты вращения ротора n_2 берутся из таблицы 3.3, а значение n_1 рассчитывается следующим образом. Вначале по формуле (4.10) определяется приблизительное количество пар полюсов вращающегося магнитного поля

$$p \approx \frac{60f}{n_2}, \quad (3.10)$$

где: f – частота питающей сети, p – количество пар полюсов.

Поскольку количество пар полюсов дробным быть не может, полученное из (3.10), число округляем до ближайшего целого значения. Затем по (3.11) определяем частоту вращения кругового вращающегося магнитного поля статора

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \quad (3.11)$$

Значения момента рассчитываются по выражению

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2}, \quad (3.12)$$

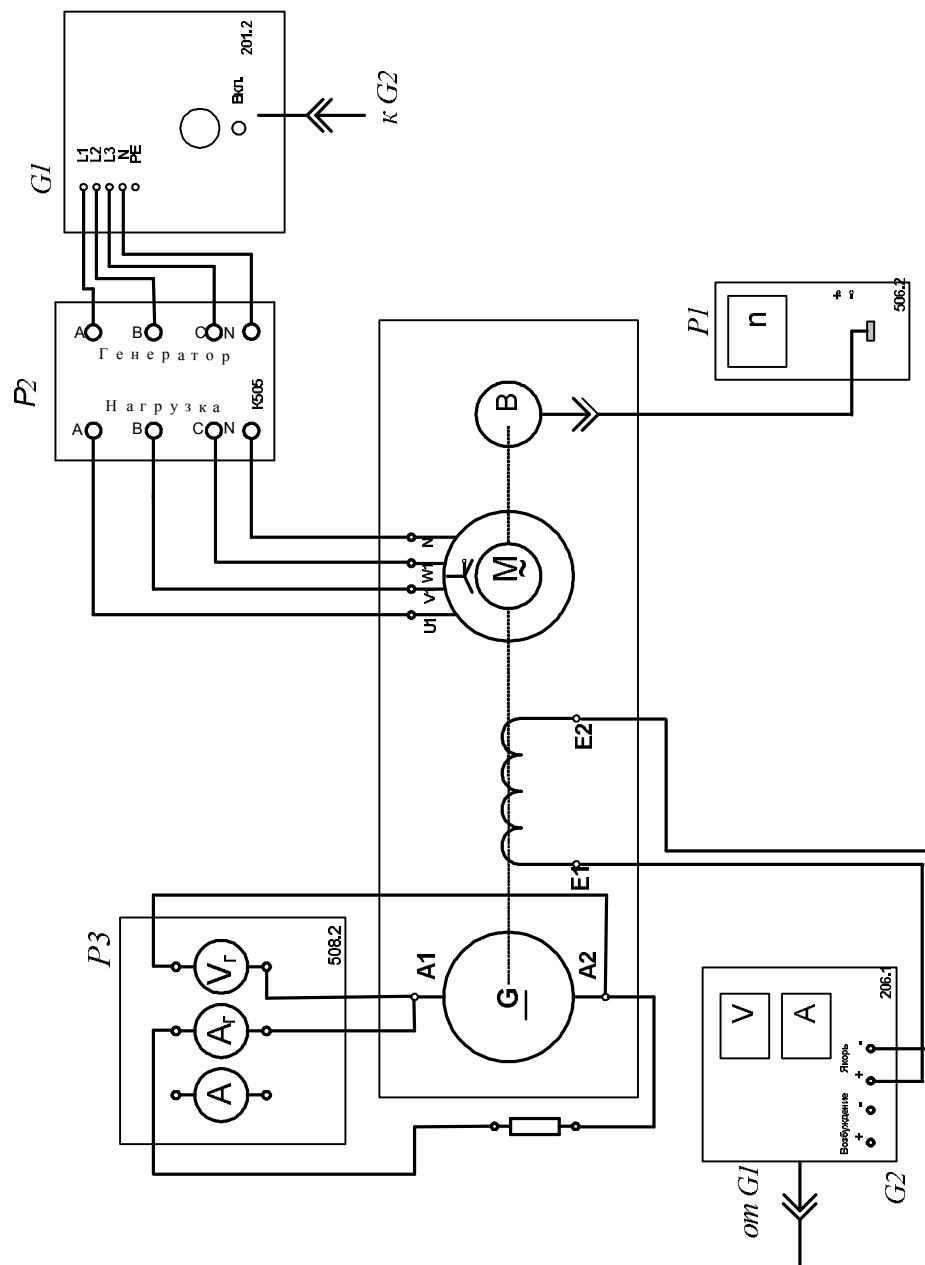


Рисунок 3.3. Схема для снятия рабочих характеристик асинхронного двигателя.

где: P_2 – мощность отдаваемая двигателем (механическая мощность на валу).

$$P_2 = I_2 U_2 + I_2^2 R_{275}, \quad (3.13)$$

где: U_2 – напряжение генератора; I_2 – ток генератора; R_{275} – сопротивление цепи якоря генератора, приведенное к температуре 75°C .

Для расчетов принять $R_{275} = 57,8 \text{ Ом}$.

Коэффициента мощности определяется по выражению

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{3U_1 I_1} \quad (3.14)$$

где: P_1 – активная мощность потребляемая двигателем

$P_1 = 3P_{1\phi}$, U_1 – фазное напряжение.

Расчет КПД производится по выражению

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (3.15)$$

По данным таблицы 3.3 построить в одной системе координат рабочие характеристики двигателя – n_2 , I_1 , P_1 , M , $\cos\phi$, η от P_2 .

3.5. Контрольные вопросы

3.5.1. Как устроен двигатель с короткозамкнутым ротором?

3.5.2. Как устроен двигатель с фазным ротором? В каких случаях его используют?

3.5.3. Объяснить принцип действия асинхронного двигателя (на примере двигателя с короткозамкнутым ротором).

3.5.4. Почему при холостом ходе асинхронные двигатели имеют небольшой коэффициент мощности?

3.5.5. Почему в режиме холостого хода нельзя пренебрегать потерями в обмотках двигателя, как в трансформаторе?

3.5.4. Объяснить каким образом создается изменяющаяся механическая нагрузка двигателя?

3.5.5. Почему при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором ток имеет большое значение?

3.5.6. Что называется скольжением и каковы пределы его изменения для асинхронного двигателя?

3.5.7. Объяснить вид графиков рабочих характеристик асинхронного двигателя.

3.6. Список используемой литературы

1. Беспалов, В. Я. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котленец; М.: Издательский центр Академия, 2006. 320 с. Библиогр.: с. 309-313.

2. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / А. И. Вольдек; Л.: Наука, 1974. 839 с. Библиогр.: с. 831-838.

РАБОТА №4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО АВТОНОМНО

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – научиться запускать генератор в работу и снимать его основные характеристики.

4.1. Общие положения

Синхронным генератором называется генератор переменного тока, у которого частоты вращения ротора и вращающегося магнитного поля статора одинаковые, то есть синхронные.

4.1.1. Конструкция трёхфазного синхронного генератора

Трёхфазный синхронный генератор (СГ) состоит из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора. В электрических машинах используются ещё два термина: якорь (часть машины, в обмотке которой индуцируется ЭДС) и индуктор (часть машины, обмотка которой создает основное магнитное поле). В СГ якорем является статор, а индуктором – ротор.

Статор генератора принципиально не отличается от статора асинхронного двигателя. В его чугунный или стальной корпус запрессован цилиндрический сердечник, собранный из листов электротехнической стали, изолированных друг от друга. В пазы сердечника (с внутренней стороны) укладываются три фазные обмотки, оси которых сдвинуты относительно друг друга в пространстве на 120° . Обычно фазные обмотки статора соединяются звездой.

Ротор СГ состоит из сердечника, на котором располагается обмотка, называемая обмоткой возбуждения. Концы обмотки ротора выводятся к двум контактными кольцам, жёстко закрепленным на валу ротора и изолированным от него и друг от друга. К контактными кольцам прижимаются неподвижные щетки, к которым подсоединяется источник постоянного тока. Роторы синхронных генераторов бывают явнополюсными (с выступающими полюсами) и неявнополюсными (цилиндрической формы). В СГ большой и средней мощности явнополюсные роторы применяются в тихоходных машинах с $n = 50 \dots 1000$ об/мин, неявнополюсные - в быстроходных с $n = 1500 \dots 3000$ об/мин. Сердечник явнополюсного ротора обычно выполняется набранным из отдельных пластин электротехнической стали. Неявнополюсный ротор не шихтованный, а изготавливается из сплошной поковки из стали, обеспечивающей хорошие магнитные свойства. На наружной поверхности магнитопровода ротора фрезеруются пазы, в которые укладывается распределенная обмотка возбуждения. Обмотка возбуждения занимает примерно $2/3$ поверхности ротора, оставшаяся часть зубцовой зоны образует большие зубцы магнитопровода. Такая конструкция обеспечивает высокую механическую прочность ротора, которая необходима при больших скоростях вращения.

4.1.2. Принцип действия СГ

При подключении напряжения к обмотке возбуждения по ней протекает постоянный ток, который создает основной постоянный магнитный поток машины Φ_0 . Что бы магнитный поток изменялся относительно витков обмотки статора, ротор приводят во вращение с помощью внешнего вращающего момента, например, моментом паровой или гидравлической турбины, или двигателем внутреннего сгорания. При вращении ротора силовые линии его магнитного потока пересекают витки обмотки статора и индуцируют в них ЭДС. В воздушном зазоре между статором и ротором СМ магнитная индукция распределяется синусоидально, поэтому и ЭДС изменяется по синусоидальному закону. А поскольку фазные обмотки смещены в пространстве относительно друг друга на 120° , то фазные ЭДС будут сдвинуты во времени на $2\pi/3$ периода, то есть на 120° электрических градусов. В результате мгновенные значения ЭДС определяются по (4.1)

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Чтобы ЭДС при вращении ротора изменялась по закону синуса, необходимо чтобы индукция вдоль зазора так же изменялась по закону синуса $B = B_m \sin \omega t$. Для этого в генераторах с явнополюсной конструкцией ротора полюсные наконечники выполняются такой формы, чтобы зазор под краями полюса был в 1,6 раза больше зазора под серединой полюса. Ширина полюсного наконечника берется равной 0,65-0,75 полюсного деления (рис. 4.1.).

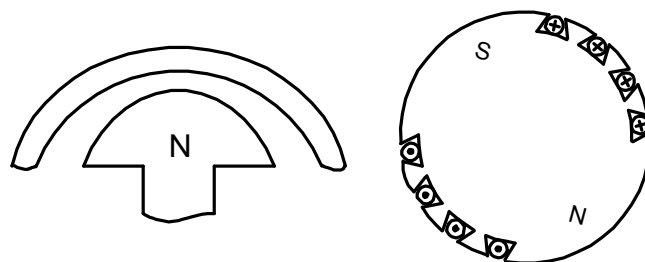


Рисунок 4.1. Конструкции ротора для получения синусоидального закона распределения индукции в зазоре.

В неявнополюсных машинах воздушный зазор равномерный, а синусоидальное распределение поля обмотки возбуждения достигается за счет синусоидального распределения магнитодвижущей силы МДС. Для этого отношение обмотанной части ротора к его полюсному делению берут равным примерно 0,75.

Действующее значение и частота синусоидальной ЭДС, индуцируемой в одной фазе обмотки якоря вращающимся магнитным полем прямо пропорциональны скорости вращения ротора и числу пар полюсов.

$$f_1 = \frac{pn}{60} \quad (4.2)$$

$$E_0 = 4,44k_{об} w_1 f_1 \Phi_{п} = 4,44k_{об} w_1 \frac{pn}{60} \Phi_{п} \quad (4.3)$$

где: $k_{об}$ – обмоточный коэффициент; w_1 – число витков фазной обмотки; f_1 – частота ЭДС; n – частота вращения ротора; $\Phi_{п}$ – основной магнитный поток полюса ротора.

Из формулы (4.2) следует, что для получения стандартной частоты $f=50$ Гц, частота вращения ротора должна быть строго постоянной.

При подключении к СГ симметричной трехфазной нагрузки по обмоткам статора протекают три синусоидальных тока одинаковой величины. Эти токи, так же как и ЭДС, сдвинуты по фазе относительно друг друга на треть периода. Возбуждаемые этими токами переменные магнитные потоки трех фаз суммируются и образуют, как и в асинхронной машине, вращающееся магнитное поле. Поле якоря перемещается с той же частотой вращения и в ту же сторону, что и поле возбуждения. Следовательно, по отношению друг к другу эти поля будут неподвижны, и образовывать результирующее магнитное поле, создаваемое совместным действием МДС обмотки возбуждения и МДС обмотки якоря. При изменении нагрузки изменяются токи обмотки якоря, а, следовательно и намагничивающая сила якоря F_a , поэтому результирующий магнитный поток машины при изменении нагрузки не остается постоянным.

Воздействие магнитного поля якоря на основное магнитное поле (поле возбуждения) и в целом на работу машины называют реакцией якоря. Под действием реакции якоря изменяется результирующий поток в машине, а следовательно и величина ЭДС. Влияние реакции якоря в синхронных машинах весьма значительно и зависит от вида нагрузки и от конструкции ротора.

Кроме реакции якоря у СГ, работающего под нагрузкой, в результате воздействия магнитного поля якоря на проводники с током ротора возникает электромагнитный момент, который направлен встречно вращающему моменту турбины и потому называется тормозным. Тормозной момент пропорционален активной составляющей тока якоря, то есть тока нагрузки СГ.

$$M_T = C_M \Phi_{п} I_a \cos\varphi \quad (4.4)$$

Следовательно, с увеличением нагрузки механизму, вращающему ротор СГ, приходится преодолевать больший тормозной момент. Для чего, например, увеличивают давление пара в приводной турбине турбогенератора, либо увеличивают напор воды в гидрогенераторах.

Основными характеристиками СГ, работающего в автономном режиме (т. е. не параллельно с другими генераторами), являются:

- характеристика холостого хода $E_a = f(I_B)$ – зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения;

- внешняя характеристика $U_a = f(I_a)$ – зависимость напряжения генератора от тока нагрузки;
- регулировочная характеристика $I_b = f(I_a)$ – зависимость тока возбуждения от тока якоря;
- характеристика короткого замыкания $I_k = f(I_b)$ – зависимость тока короткого замыкания от тока возбуждения.

Перечисленные характеристики и предстоит снять в процессе выполнения лабораторной работы.

4.2. Описание лабораторного стенда

Лабораторная работа выполняется на лабораторном комплекте, который состоит из электромашинного агрегата и функциональных блоков модульного типа.

Электромашинный агрегат типа ЭМAM4 (электромашинный агрегат с маховиком 4-й модели), в дальнейшем агрегат, конструктивно представляет спаренные между собой и установленные на едином основании машину постоянного тока, машину переменного тока и маховик. Спаренными называются электрические машины, валы которых соединены механически с помощью муфт, вал машины переменного тока так же сочленен с преобразователем угловых перемещений. В данной лабораторной работе машина постоянного тока используется в качестве двигателя постоянного тока, а универсальная машина переменного тока в качестве трёхфазного синхронного генератора. Таким образом, двигатель постоянного тока приводит во вращение синхронный генератор, который преобразует механическую энергию двигателя в электрическую. Для защиты пользователей от движущихся частей агрегата его соединительные муфты закрыты кожухами.

Паспортные данные устройств агрегата (технические характеристики) приведены ниже.

4.2.1. Паспортные данные электромашинного агрегата

Спаренные электрические машины:

Машина постоянного тока (M1 на схемах)

Номинальная полезная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение якоря, В	220
Номинальный ток якоря, А	0,56
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	220
Номинальный ток обмотки возбуждения, А	0,2
Возбуждение	независимое
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
КПД, %	57.5
Направление вращения	реверсивное
Режим работы	двигательный/генераторный

Универсальная машина переменного тока

Номинальная частота тока, Гц	50
Число фаз на статоре	3
Схема соединения обмоток статора	Y _o / Δ
Число фаз на роторе	3
Схема соединения обмоток ротора	Y
Направление вращения	реверсивное
Режим синхронной машины (G4 на схемах)	
Номинальная активная мощность, Вт	100
Номинальное напряжение, В	220
Коэффициент мощности, cosφ	1
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Номинальный ток статорной обмотки, А	0,24
Ток возбуждения холостого хода, А	1,4
Номинальное напряжение возбуждения, В	21
Номинальный ток возбуждения, А	1,75
Направление вращения	реверсивное
Режим работы	двигательный/генераторный
Маховик	
Момент инерции, Н-м-с ²	0,009
Преобразователь угловых перемещений (G5 на схемах)	
Модель	BE178A
Количество выходных каналов	6
Выходные сигналы	серия импульсов и опорный импульс
Число импульсов за оборот в серии	1000
Диапазон изменения рабочих частот вращения вала, об/мин	0...6000
Класс защиты от поражения электрическим током	01
Габаритные размеры, мм, не более	
длина	900
ширина	160
высота	270
Масса, кг, не более	22,5

4.3. Порядок выполнения лабораторной работы

4.3.1. Записать паспортные данные агрегата. Ознакомиться с оборудованием лабораторного комплекта. По формуле 4.5 рассчитать номинальный ток трёхфазного синхронного генератора

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi} \quad (4.5)$$

4.3.2. По схеме рисунка 4.2 провести испытание генератора в режиме холостого хода.

4.3.3. По схемам рисунков 4.3 и 4.4 снять внешние характеристики генератора $U_a = f(I_a)$ при активной нагрузке ($\cos \varphi = 1$) и активно-индуктивной нагрузке ($\cos \varphi = 0,7$) и активно-ёмкостной нагрузках ($\cos \varphi = 0,7$).

4.3.4. По схемам рисунков 4.3 и 4.4 снять регулировочные характеристики генератора $I_b = f(I_a)$ при активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$), активно-индуктивной нагрузке ($\cos\varphi = 0,7$) и активно-ёмкостной нагрузках ($\cos\varphi = 0,7$).

4.3.5. По схеме рисунка 4.5 снять характеристику короткого замыкания и определить отношение короткого замыкания ОКЗ при токе возбуждения холостого хода.

4.4. Пояснения к выполнению лабораторной работы

4.4.1 Испытание генератора в режиме холостого хода

Целью данного опыта является снятие характеристики холостого хода $E_0 = f(I_b)$. Снятие характеристики холостого хода следует производить в следующей последовательности:

- собрать схему рисунка 4.2 и дать её проверить преподавателю;
- включить источник питания двигателя постоянного тока ДПТ, затем, плавно вращая рукоятку регулировки напряжения якоря ДПТ, довести частоту вращения ротора двигателя до 1500 об/мин.
- включить возбудитель машины переменного тока, плавно вращая рукоятку установить ток в обмотке возбуждения СГ таким, что бы ЭДС в обмотке якоря стала равной $E_0 = 1,2U_n$ (при расчете учесть, что измерительный комплект измеряет фазное напряжение, а в паспорте указано линейное);
- плавно уменьшая ток возбуждения снять характеристику холостого хода, 5...7 точек, при этом обязательно точку, в которой $E_0 = U_n$, значения тока возбуждения для этой точки $I_b = I_{b0}$ (ток возбуждения холостого хода) будет использоваться в дальнейших опытах. При снятии характеристики холостого хода необходимо перед тем, как записать в таблицу 4.1 значения очередной точки убедиться в том, что частота вращения ротора ДПТ составляет 1500 об/мин.

Таблица 4.1. Характеристика холостого хода СГ

$E_0, В$						
$I_b, А$						

По данным таблицы 4.1 построить характеристику холостого хода $E_0 = f(I_b)$.

4.4.2. Снятие внешних характеристик генератора

Снятие внешних характеристик осуществляется при работе генератора под нагрузкой. Под внешней характеристикой понимается зависимость напряжения генератора от тока нагрузки (тока якоря) $U_a = f(I_a)$ при постоянных: частоте вращения $n = \text{const}$, токе возбуждения $I_b = \text{const}$, характере нагрузки $\cos\varphi = \text{const}$. Как уже говорилось, в лабораторной работе снимаются три внешние характеристики – при активной нагрузке, при активно-индуктивной нагрузке и при активно-ёмкостной нагрузке.

Внешняя характеристика при активной нагрузке снимается в следующей последовательности:

- собрать схему рисунка 4.3;
- переключатели изменения индуктивности установить в положение 0;
- включить ДПТ и установить его частоту вращения равной $n = 3000$ об/мин;

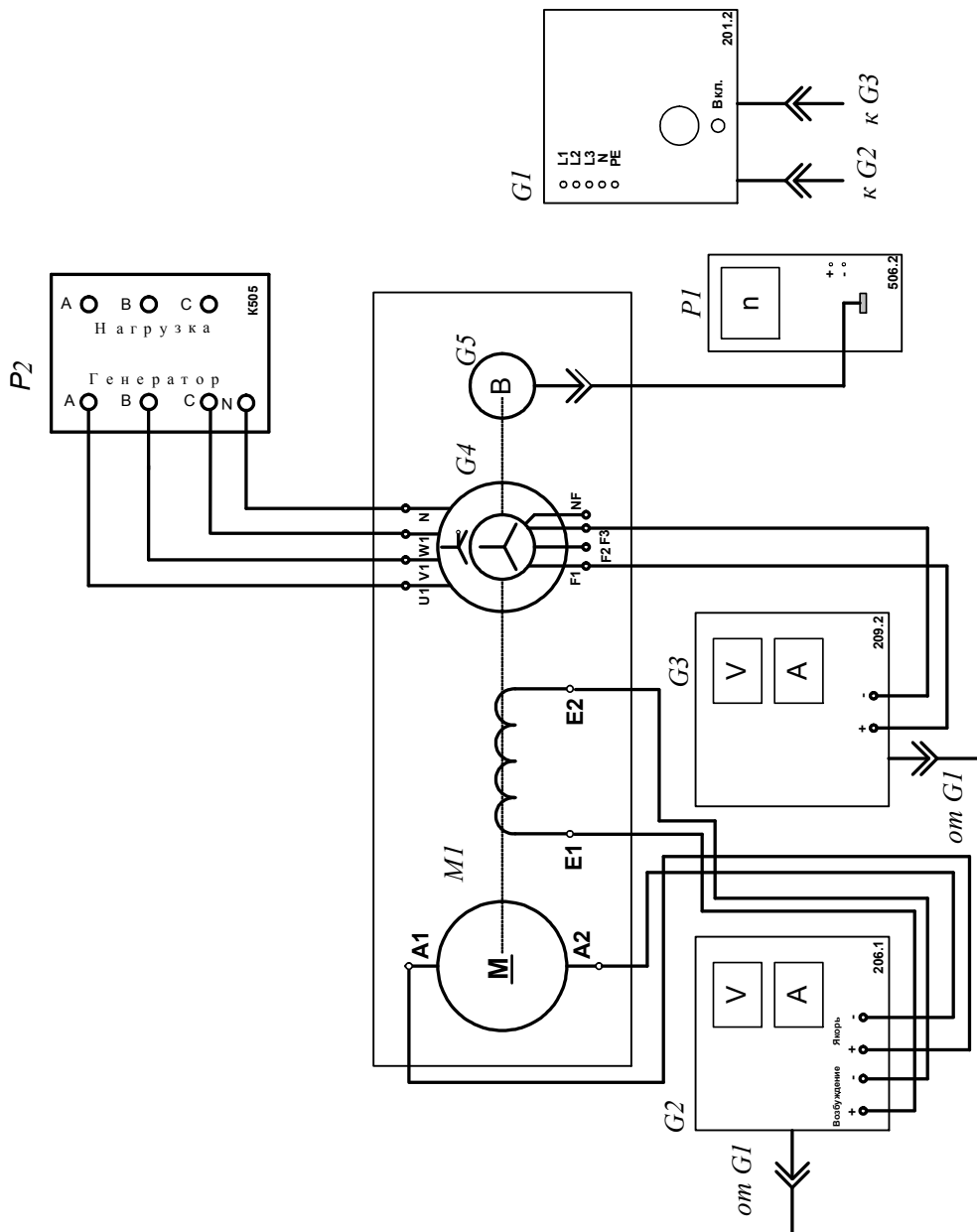


Рисунок 4.2. Схема для исследования СГ в режиме холостого хода

- в режиме холостого хода (т.е. не включая реостат), изменяя ток обмотки возбуждения СГ до значения $I_B = I_{B0}$, установить номинальное значение напряжения генератора;

- включая поочерёдно ступени реостата, изменяющего активное сопротивление, постепенно увеличивать нагрузку СГ до значения $I_a \leq 1.2I_{ан}$, снять внешнюю характеристику СГ (5...6 точек) Полученные значения записать в таблицу 4.2.

При снятии характеристики, после включения очередной ступени реостата, надо контролировать постоянство частоты вращения ротора СГ и постоянство тока возбуждения.

Таблица 4.2. Внешняя характеристика СГ при $\cos\varphi=1$, $I_b=$

U_a , В					
I_a , А					

Внешняя характеристика при активно-индуктивной нагрузке снимается в следующей последовательности:

- использовать схему рисунка 4.3;
- при переключателях, изменяющих активную и индуктивную нагрузки, установленных в положения 0, включить ДПТ и довести его частоту вращения до значения $n = 3000$ об/мин;
- установив значение тока возбуждения $I_b = I_{b0}$ снять первую точку характеристики, когда ток якоря СГ $I_a = 0$;
- включить первую ступень реостата, изменяющего индуктивную нагрузку;
- включая поочерёдно ступени реостата, изменяющего активное сопротивление, выставить одинаковыми активный и индуктивный токи якоря СГ;
- записать в таблицу 4.3 показания приборов, предварительно убедившись в том, что $n = 1500$ об/мин и $I_b = I_{b0}$;
- поочерёдно включая ступени реостата и выравнивая токи $I_L = I_R$, постепенно увеличивать нагрузку СГ до значения $I_a \leq 1.2I_{ан}$, снять внешнюю характеристику СГ. Полученные значения записать в таблицу 4.3.

Таблица 4.3. Внешняя характеристика СГ при активно-индуктивной нагрузке $\cos\varphi = 0,7$; $I_b=$

U_a , В				
I_a , А				
I_R , А				
I_L , А				

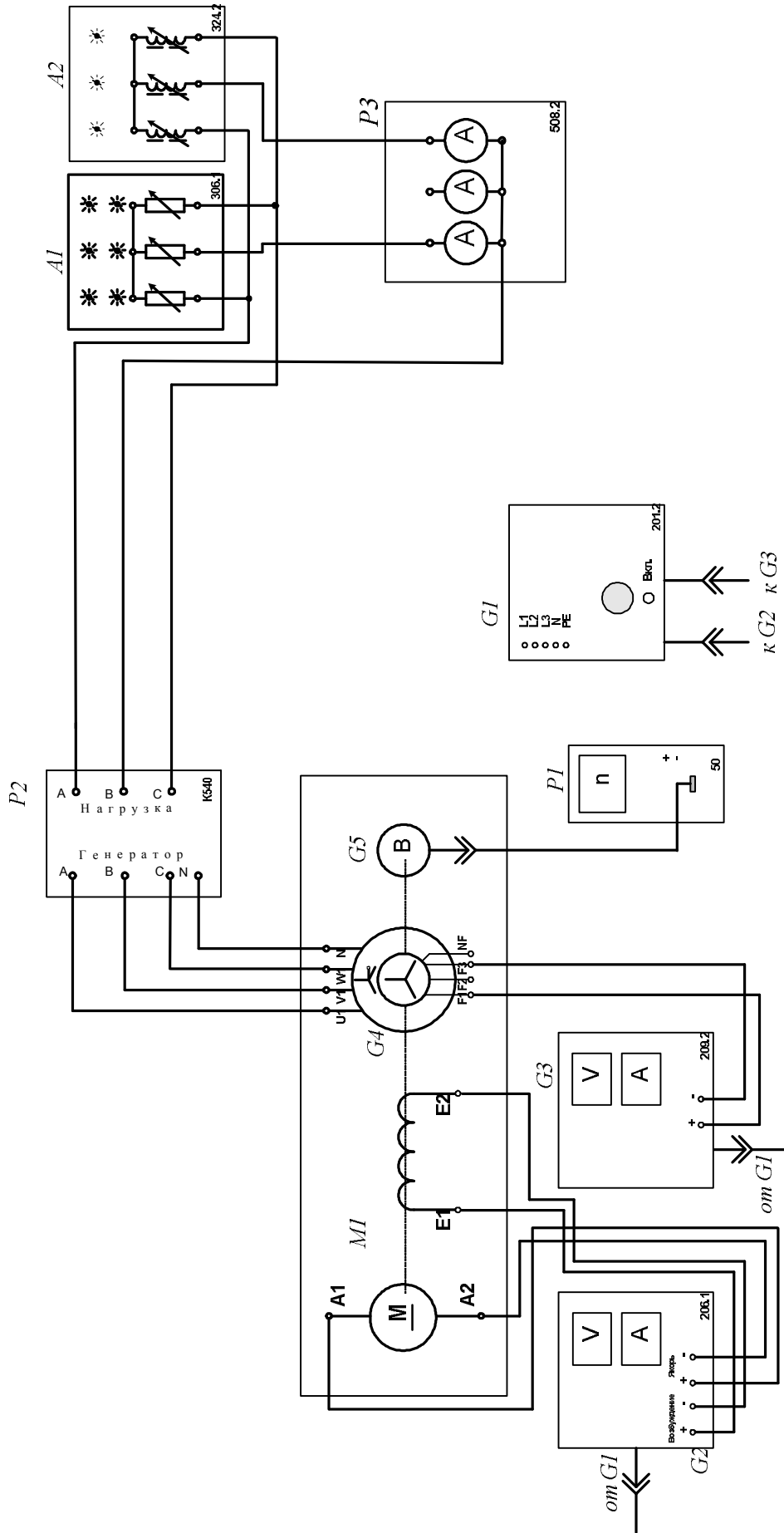


Рисунок 4.3. Схема для снятия характеристик ТСГ при активно-индуктивной нагрузке

Внешняя характеристика при активно-ёмкостной нагрузке снимается в следующей последовательности:

- собрать схему рисунка 4.4;
- при переключателях, изменяющих активную и ёмкостную нагрузки, установленных в положения 0, включить ДПТ и довести его частоту вращения до значения $n = 1500$ об/мин;
- установить значение тока возбуждения $I_B = I_{B0}$;
- включить первую ступень реостата, изменяющего ёмкостную нагрузку;
- включая поочерёдно ступени реостата, изменяющего активную. сопротивление, выставить одинаковыми активный и ёмкостной токи якоря СГ;
- записать в таблицу 4.4 показания приборов, предварительно убедившись в том, что $n = 1500$ об/мин и $I_B = I_{B0}$;
- поочерёдно включая ступени ёмкостного реостата и выравнивая токи $I_C = I_R$, постепенно увеличивать нагрузку СГ до значения $I_a \leq 1.2I_{ан}$, снять внешнюю характеристику СГ (4...5 точек).

Таблица 4.4. Внешняя характеристика СГ при активно-ёмкостной нагрузке $\cos\varphi = 0,7$ (ёмк); $I_B =$

$U_a,$ В				
$I_a,$ А				
$I_R,$ А				
$I_L,$ А				

По данным таблиц 4.2, 4.3 и 4.4 построить внешние характеристики СГ в одной плоскости координат.

4.4.3. Снятие регулировочных характеристик генератора

Под регулировочной характеристикой понимается зависимость тока возбуждения от тока якоря $I_B = f(I_a)$ при постоянных частоте вращения ротора, напряжении якоря генератора и характере нагрузки. При выполнении лабораторной работы снимаются три регулировочные характеристики – при активной нагрузке, активно-индуктивной нагрузке и активно-емкостной нагрузке.

Чтобы не переделывать схему, первой рекомендуется снять регулировочную характеристику при активно-ёмкостной нагрузке, а затем при активной и активно-индуктивной нагрузках.

Регулировочная характеристика при активно-ёмкостной нагрузке снимается с использованием схемы рисунка 4.4 в следующей последовательности:

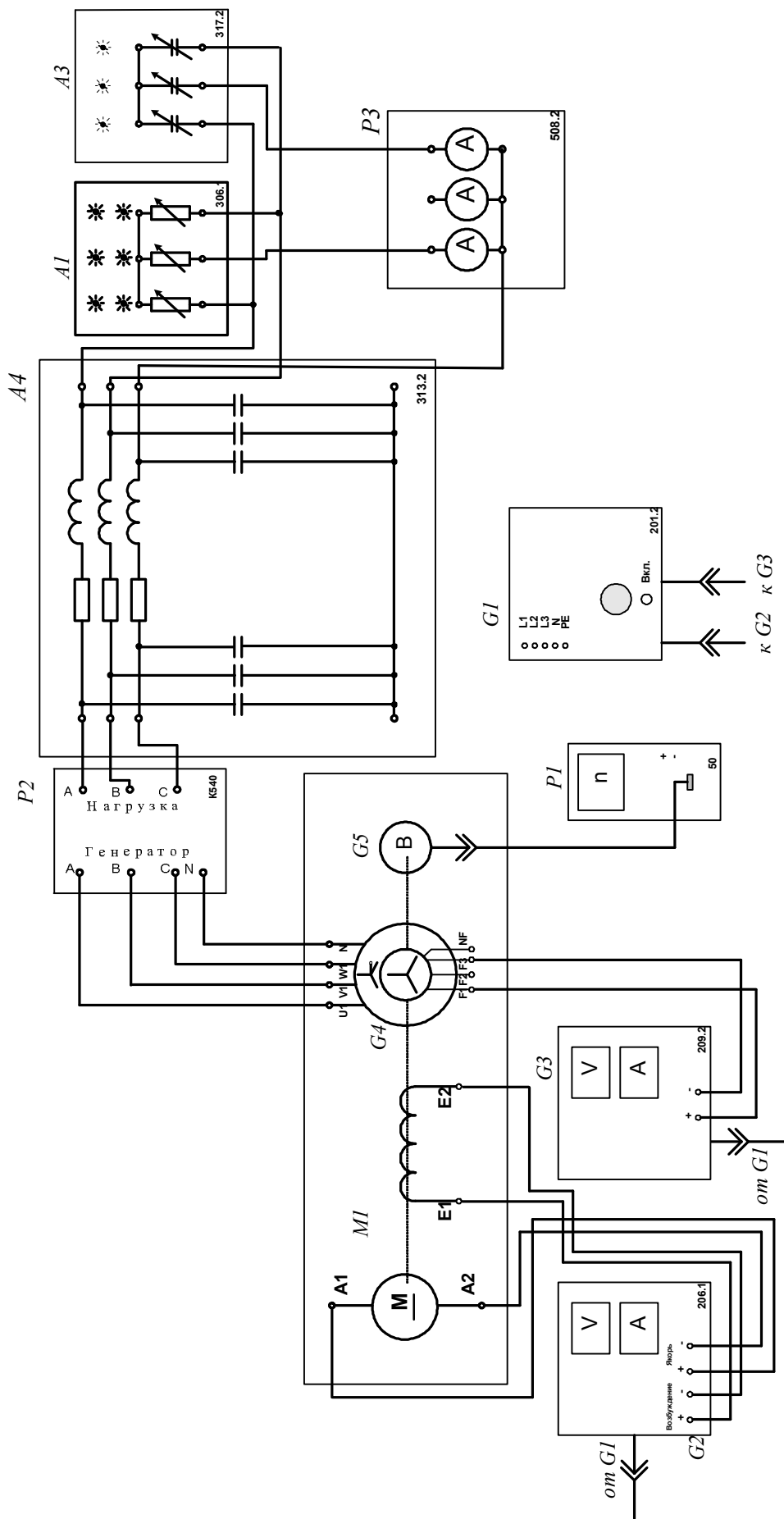


Рисунок 4.4. Схема для снятия характеристик ТГ при активно-ёмкостной нагрузке

- подать напряжение на двигатель постоянного тока и установить частоту вращения двигателя до $n = 1500$ об/мин;
- подать напряжение на обмотку возбуждения генератора, изменяя ток возбуждения установить, заданное преподавателем, напряжение СГ. Записать показания приборов в таблицу 4.5;
- поочерёдно включая ступени реостата, регулирующего ёмкостную нагрузку, и выравнивая токи $I_C = I_R$ с помощью реостата, регулирующего активную нагрузку, увеличивать нагрузку СГ до значения $I_a \leq 1,2I_{ан}$, снять регулировочную характеристику СГ. При снятии точек характеристики поддерживать неизменными частоту вращения двигателя и напряжение обмотки якоря СГ. Полученные значения записать в таблицу 4.5.

Таблица 4.5. Регулировочная характеристика СГ при $\cos\varphi = 0,7$ (ёмк.); $U_a =$

I_B, A				
I_a, A				
I_R, A				
I_L, A				

Регулировочная характеристика при активной нагрузке снимается в следующей последовательности:

- собрать схему рисунка 4.3
- запустить двигатель постоянного тока и разогнать его до частоты вращения $n = 1500$ об/мин:
- подать напряжение на обмотку возбуждения СГ. В режиме холостого хода выставить напряжение обмотке якоря таким же, как и в предыдущем опыте. Записать показания приборов в таблицу 4.6;
- поочерёдно включая ступени реостата, регулирующего активную нагрузку, постепенно увеличивать нагрузку СГ до значения $I_a \leq 1,2I_{ан}$, снять регулировочную характеристику СГ. При снятии точек характеристики поддерживать неизменными частоту вращения двигателя и напряжение обмотки якоря СГ.

Таблица 4.6. Регулировочная характеристика СГ при активной нагрузке $\cos\varphi = 1$; $U_a =$

I_B, A					
I_a, A					

Регулировочная характеристика при активно-индуктивной нагрузке снимается в следующей последовательности:

- использовать схему 4.3
- запустить двигатель постоянного тока и разогнать его до частоты вращения $n = 1500$ об/мин:
- подать напряжение на обмотку возбуждения СГ. В режиме холостого хода выставить напряжение обмотке якоря таким же, как и в предыдущем опыте. Записать показания приборов в таблицу 4.7;
- поочерёдно включая ступени реостата, регулирующего индуктивную нагрузку, и выравнивая токи $I_L = I_R$ с помощью реостата, регулирующего активную нагрузку, увеличивать нагрузку СГ до значения $I_a \leq 1.2I_{ан}$, снять регулировочную характеристику СГ. При снятии точек характеристики поддерживать неизменными частоту вращения двигателя и напряжение обмотки якоря СГ. Показания приборов записать в таблицу 4.7.

Таблица 4.7. Регулировочная характеристика СГ при активно-индуктивной нагрузке $\cos\varphi = 0,7$; $U_a =$

I_b, A				
I_a, A				
I_R, A				
I_L, A				

По данным таблиц 4.5, 4.6 и 4.7 построить регулировочные характеристики СГ в одной плоскости координат.

4.4.4. Испытание СГ в режиме короткого замыкания и определение ОКЗ

При выполнении этого опыта необходимо снять характеристику, под которой понимается зависимость тока короткого замыкания якоря от тока возбуждения $I_k = f(I_b)$ при замкнутой накоротко обмотке якоря. Для измерения тока I_k две фазы якоря СГ замыкают через амперметр.

Характеристика короткого замыкания снимается в следующей последовательности:

- собрать схему рисунка 4.5;
- запустить двигатель и разогнать его до частоты вращения $n = 1500$ об/мин;
- подать напряжение на обмотку возбуждения СГ;
- плавно увеличивая ток возбуждения генератора до значения $I_b = I_{b0}$ снять 5...6 точек характеристики. Значение I_{b0} берется из опыта холостого хода. Результаты опыта записать в таблицу 4.8.

По данным таблицы 4.8 построить характеристику короткого замыкания и определить ОКЗ.

Таблица 4.8. Характеристика короткого замыкания СГ

$I_B,$ А						
$I_K,$ А						

Отношением короткого замыкания (ОКЗ) называется отношение тока короткого замыкания I_K , возникающего при токе возбуждения $I_B = I_{B0}$ к номинальному току якоря.

$$OKЗ = I_K / I_{ан} = I_K^* \quad (5.4)$$

где: $I_{ан}$ – номинальный ток якоря СГ; I_K – значение тока короткого замыкания СГ при токе возбуждения холостого хода равном $I_B = I_{B0}$.

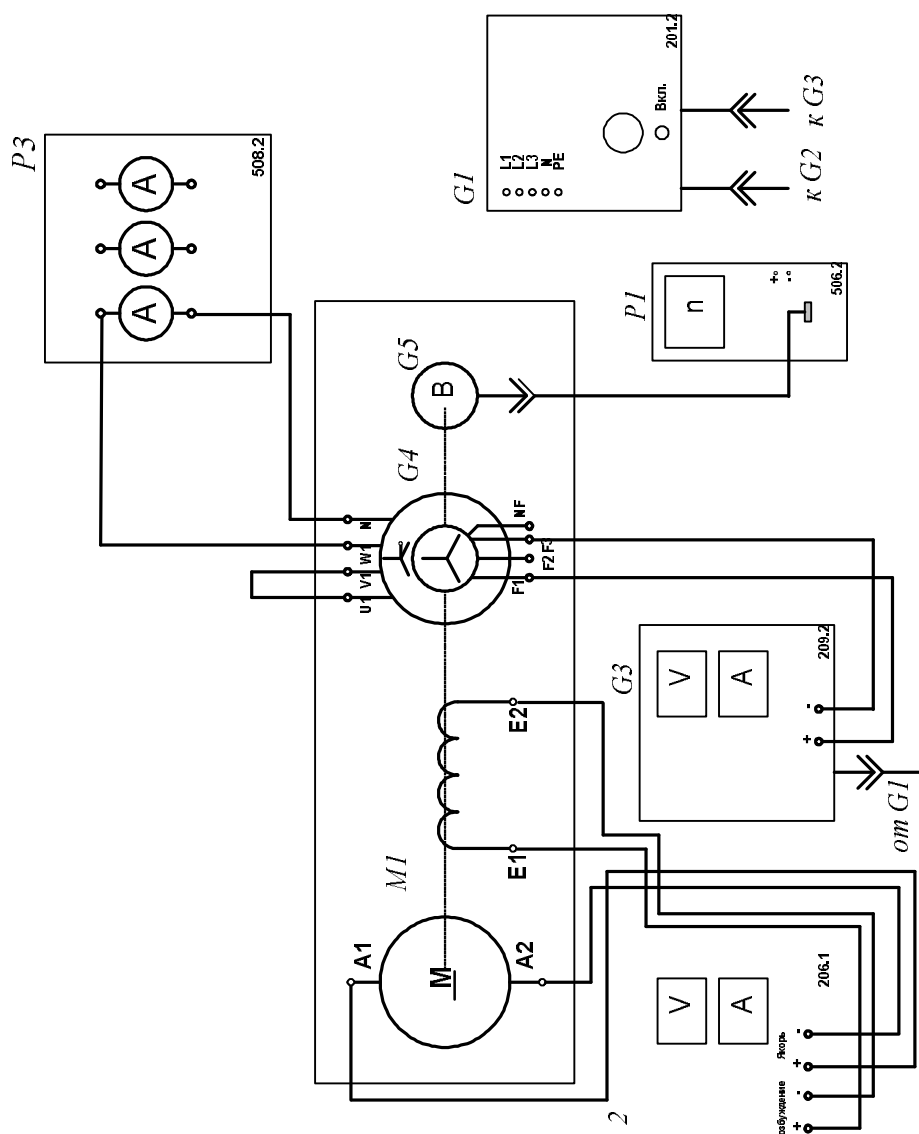


Рисунок 4.5. Схема для исследования СГ в режиме короткого замыкания

5.5. Контрольные вопросы

1. Объяснить устройство синхронного генератора.
2. Какая часть в синхронном генераторе является якорем, а какая индуктором?
3. Объясните принцип работы синхронного генератора.
4. От чего зависит частота ЕДС, индуктируемой в обмотках якоря?
5. Как осуществляется регулирование величины напряжения СГ?
6. Что называется характеристикой холостого хода?
7. Почему характеристика холостого хода нелинейная?
8. Что такое реакция якоря? Как она проявляется при различном характере нагрузки СГ?
9. Что называется внешней характеристикой? Как она снимается?
10. Объясните причины изменения напряжения на зажимах генератора при изменении тока нагрузки.
11. Как влияет характер нагрузки на внешнюю характеристику генератора?
13. Дайте определение регулировочной характеристики. Как она снимается и для чего используется?
14. Что показывает ОКЗ и как его определить?

Список используемой литературы

1. Беспалов, В. Я. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котленец; М.: Издательский центр Академия, 2006. 320 с. Библиогр.: с. 309-313.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / А. И. Вольдек; Л.: Наука, 1974. 839 с. Библиогр.: с. 831-838.

РАБОТА №5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО ПАРАЛЛЕЛЬНО С СЕТЬЮ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – научиться включать трехфазный синхронный генератор СГ на параллельную работу с сетью и снимать его основные характеристики.

5.1. Общие положения

На электрических станциях обычно устанавливается несколько синхронных генераторов, которые включаются параллельно, то есть работают на общую сеть. Процесс включения генератора на параллельную работу с сетью называется синхронизацией. Различают точную синхронизацию и самосинхронизацию (грубую синхронизацию). При включении генератора в сеть могут возникнуть большие броски токов, в результате чего возникают большие электромагнитные моменты, которые могут привести к повреждению машины. Что бы устранить броски токов при включении генератора в сеть используют точную синхронизацию. При использовании этого способа необходимо выполнить следующие условия:

- ЭДС генератора в момент подключения должна быть равна и противоположна по фазе напряжению сети;
- частота ЭДС генератора должна быть равна частоте напряжения сети;
- порядок чередования фаз генератора и сети должны быть одинаковыми.

5.2. Описание лабораторного стенда

Лабораторная работа выполняется на лабораторном комплекте, который состоит из электромашинного агрегата и функциональных блоков модульного типа.

Электромашинный агрегат типа ЭМAM4 (электромашинный агрегат с маховиком 4-й модели), в дальнейшем агрегат, конструктивно представляет спаренные между собой и установленные на едином основании машину постоянного тока, машину переменного тока и маховик. Спаренными называются электрические машины, валы которых соединены механически с помощью муфт, вал машины переменного тока так же сочленен с преобразователем угловых перемещений. В данной лабораторной работе машина постоянного тока используется в качестве двигателя постоянного тока, а универсальная машина переменного тока в качестве трёхфазного синхронного генератора. Таким образом, двигатель постоянного тока приводит во вращение синхронный генератор, который преобразует механическую энергию двигателя в электрическую. Для защиты пользователей от движущихся частей агрегата его соединительные муфты закрыты кожухами.

Паспортные данные устройств агрегата те же, что и работе №4.

5.3. Порядок выполнения лабораторной работы

5.3.1. Записать паспортные данные агрегата. Ознакомиться с оборудованием лабораторного комплекта.

5.3.2. Собрать электрическую схему (Рис.5.1) для исследования параллельной работы СГ с сетью.

5.3.3. Выполнив условия точной синхронизации включить СГ на параллельную работу с сетью.


5.3.4. Используя схему (Рис.5.1) снять U-образную характеристику $I_a = I_b$ СГ.

5.3.5. Используя схему (Рис.5.1) снять угловую характеристику $P=f(\theta)$ СГ.

5.4 Пояснения к выполнению лабораторной работы

5.4.1. Включение СГ на параллельную работу с сетью

Целью данного опыта является научиться включать СГ на работу параллельно с сетью способом точной синхронизации. Опыт производится в следующей последовательности:

- убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;
- соберите электрическую схему соединений тепловой защиты машины переменного тока;
- соедините гнезда защитного заземления " " устройств, используемых в эксперименте, с гнездом "РЕ" источника G1;
- соедините аппаратуру в соответствии с электрической схемой соединений (Рис. 5.1);
- переключатели режима работы источника питания ДПТ G2, возбудителя СГ G3 и блока синхронизации A2 переведите в положение "РУЧН.";
- регулировочные рукоятки источника питания ДПТ G2 и возбудителя G3 поверните против часовой стрелки до упора;
- переключатель напряжения трёхфазной трансформаторной группы A1 установить на 220 В;
- включите трёхфазный источник питания G1. О наличии напряжений фаз на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки;
- включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника питания ДПТ G2;
- включите выключатель "СЕТЬ" указателя P1;
- Включите выключатель "СЕТЬ", нажмите кнопку "ВКЛ." возбудителя ГПТ G3 и установите ток возбуждения $I_b \approx 0,5I_{b0}$;
- Включите выключатель "СЕТЬ" блока синхронизации A2.
- постепенно увеличивая частоту вращения вала ДПТ добиться, что бы частота ЭДС генератора стала равной частоте сети;

- плавно увеличивая ток возбуждения генератора, добиться что бы его ЭДС стала равной напряжению сети $E_r = U_c$;
- убедиться что лампы лампового синхроскопа зажигаются и гаснут одновременно, то есть условие чередования фаз выполняется.
- регулируя напряжение на якоре ДПТ, добиться чтобы лампы синхроскопа загорались примерно через каждые 3..4 секунды;
- пропуская несколько возможных случаев включения, и уловив ритм мигания, при потухании ламп быстрым движением включить выключатель блока синхронизации.
- Убедитесь, что генератор G4 вошел в режим синхронной работы с сетью, о чем должно свидетельствовать постоянство напряжения между фазами генератора G4.

5.4.2. Снятие U-образных характеристик СГ

U-образной характеристикой СГ, работающего параллельно с сетью, называется зависимость тока якоря от тока возбуждения $I_a = f(I_b)$ при мощности $P = \text{const}$. Эта характеристика показывает, как можно регулировать реактивную мощность, отдаваемую СГ в сеть, при постоянной активной мощности. При выполнении этого опыта предстоит снять пять U-образных характеристик для: $P_1 = 0$; $P_2 = 0,25P_n$; $P_3 = 0,5P_n$; $P_4 = 0,75P_n$ и $P_5 = P_n$. Рассчитывая значения активной мощности, следует учитывать то, что в паспортных данных СГ приведено суммарное значение активной мощности трёх фаз, а измерительный комплект К540 измеряет мощность одной фазы (до 33 Вт). Опыт производится в следующей последовательности:

- рассчитать значения активной мощности, для которых будут сниматься характеристики;
- подключить СГ на параллельную работу с сетью;
- для снятия первой характеристики, изменяя напряжение якоря ДПТ, добиться что бы активная мощность, отдаваемая СГ в сеть, равнялась нулю $P_2=0$, Это значение поддерживать постоянным при снятии всех точек характеристики;
- уменьшить ток возбуждения СГ до нуля, снять первую точку характеристики;
- увеличивая ток возбуждения СГ снять четыре точки на падающей ветви характеристики. Обязательно снять точку, при которой ток якоря достиг нулевого значения;
- продолжая увеличивать ток возбуждения СГ снять три точки на возрастающем участке характеристики. Последняя точка снимается при достижении номинального значения одного из токов $I_b = I_{bn}$ либо $I_a = I_{an}$;

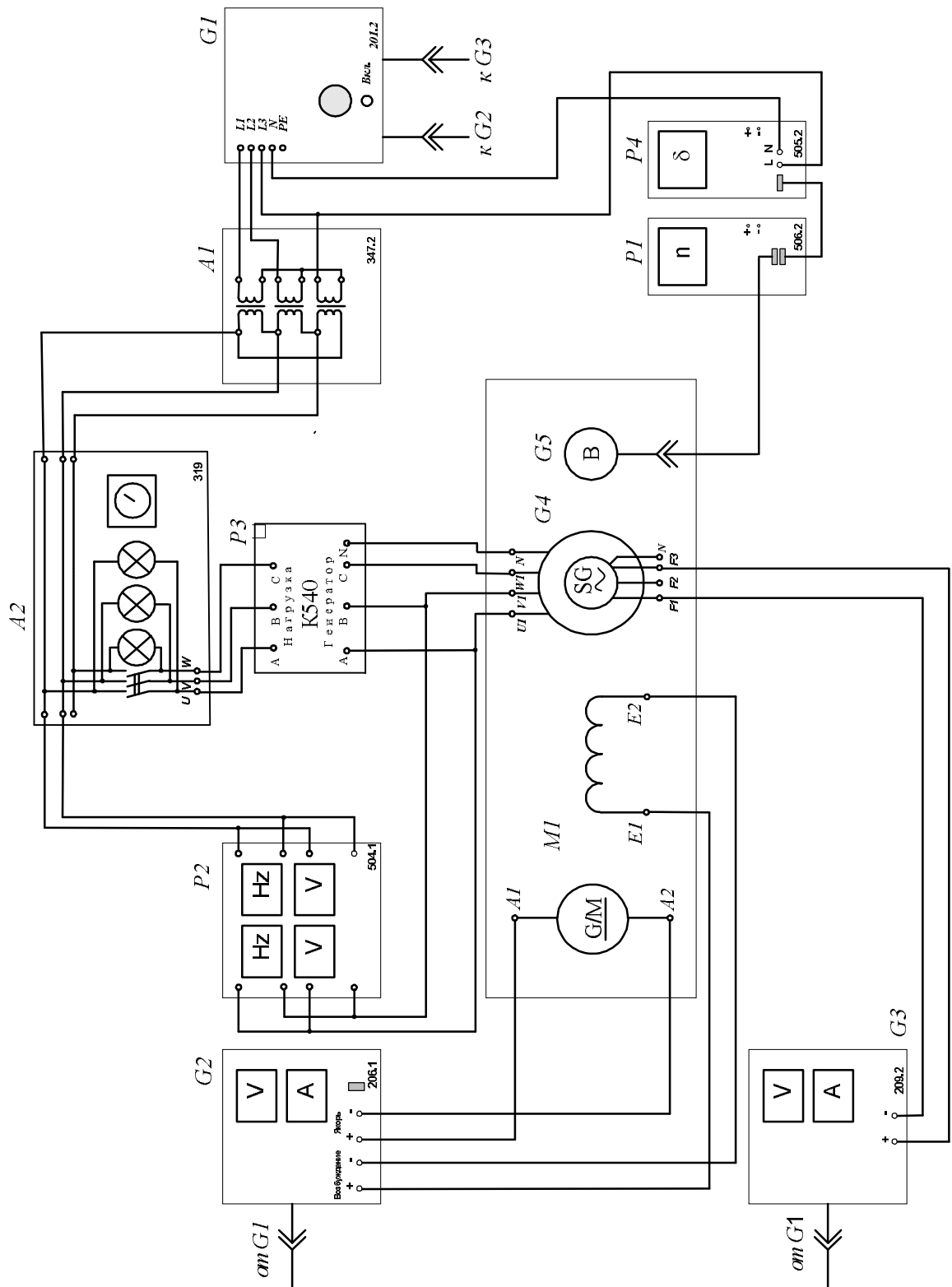


Рисунок 5.1. Схема для исследования параллельной работы СГ с сетью

- для снятия второй характеристики, изменяя напряжение якоря ДПТ, добиться что бы активная мощность, отдаваемая СГ в сеть, равнялась $P_2 = 10$ Вт (в фазе), Это значение поддерживать постоянным при снятии всех точек характеристики;

- уменьшить ток возбуждения СГ до значения $I_B = 0,1I_{BH}$, снять первую точку характеристики;
- увеличивая ток возбуждения СГ снять три-четыре точки на падающей ветви характеристики. Обязательно снять точку, при которой ток якоря достиг минимального значения;
- продолжая увеличивать ток возбуждения СГ снять три точки на возрастающем участке характеристики. Последняя точка снимается при достижении номинального значения одного из токов $I_B = I_{BH}$ либо $I_a = I_{ан}$;
- характеристики при $P_2 = 20$ Вт и $P_2 = 30$ Вт снимаются в той же последовательности, что и для второй характеристики.

Результаты измерений для каждой характеристики заносятся в таблицы 5.1...5.4. Образец таблицы приведен ниже.

Таблица 5.1 U-образная характеристика СГ при $P_2 =$

I_a, A							
I_B, A							

По данным таблиц 5.1...5.4 построить U-образные характеристики в одной плоскости координат.

5.4.3. Снятие угловых характеристик СГ

Под угловыми характеристиками СГ, работающего параллельно с сетью, понимаются зависимости отдаваемой генератором активной мощности от угла нагрузки $P = f(\theta)$ при постоянном токе возбуждения $I_B = \text{const}$. Эта характеристика показывает, как можно регулировать активную мощность, отдаваемую СГ в сеть. Угол нагрузки генератора θ определяется, как фазовый угол δ сдвига ЭДС генератора G4 и напряжения сети и измеряется с помощью указателя P4 (измеритель угла нагрузки синхронной машины), связанного контрольным кабелем с преобразователем угловых перемещений G5 и выходом источника G1 (сеть). В данном опыте предстоит снять две угловые характеристики: при $I_B = 0,5I_{BH}$ и $I_B = I_{BH}$. Опыт производится в следующей последовательности:

- включить выключатель "СЕТЬ" указателя угла нагрузки P4.
- вращая регулировочные рукоятки источника G2 и возбудителя G3, установите равными нулю значение тока якоря СГ.
- с помощью потенциометров «ГРУБО» и «ТОЧНО» установить стрелку указатель P4 в нулевое положение (середину) шкалы. Если этого сделать не удастся, то проводник, соединяющий гнездо «L» указателя P4 с гнездом «L2» источника G1, пересоединить так, чтобы он соединял гнездо «L» указателя P4 с гнездом «L1» или «L3» источника G1.
- установить вращением регулировочной рукоятки возбудителя G3 требуемый ток возбуждения I_B генератора G4, и поддерживать его неизменным в ходе эксперимента.

- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменять угол δ нагрузки и записывать показания указателя P4 угла нагрузки синхронной машины и ваттметра измерительного комплекта P3 в таблицы 5.6 и 5.7. Таблица 5.6 снимается при токе $I_B = 0,5 I_{BH}$, а таблица 5.7 - для тока $I_B = I_{BH}$.

Таблица 5.6. Угловая характеристика СГ при $I_B = 0,5 I_{BH}$

θ , град									
P, Вт									

Таблица 5.7. Угловая характеристика СГ при $I_B = I_{BH}$

θ , град									
P, Вт									

- В случае перехода генератора G4 в асинхронный режим работы его следует разгрузить по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа генератора с сетью.
- По завершении эксперимента, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки, разгрузить генератор G4 по активной мощности, нажав кнопку "ОТКЛ." отключить блок синхронизации A2 от сети, повернув регулировочные рукоятки сначала у возбудителя G3, а затем у источника G2 против часовой стрелки до упора. С помощью выключателей "СЕТЬ" отключить возбудитель G3 и источник питания ДПТ G2, нажав на кнопку – гриб отключить источник G1 и перевести его автоматические выключатели в нижнее положение.

По данным таблиц 5.6 и 5.7 построить угловые характеристики СГ $P = f(\theta)$ в одной плоскости координат.

5.5. Контрольные вопросы

- Объяснить зачем трёхфазные синхронные генераторы включаются на параллельную работу.
- Перечислить условия включения СГ на параллельную работу с сетью способом точной синхронизации.
- Объяснить на каком участке U-образной характеристики СГ отдает в сеть активно-индуктивную мощность.
- Объяснить на каком участке U-образной характеристики СГ отдает в сеть активно-ёмкостную мощность.
- Объяснить на каком участке U-образной характеристики СГ отдает в сеть только активно мощность.

- Как, используя U-образные характеристики, определить коэффициент мощности СГ?

6.6. Список используемой литературы

1. Беспалов, В. Я. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котленец; М.: Издательский центр Академия, 2006. 320 с. Библиогр.: с. 309-313.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / А. И. Вольдек; Л.: Наука, 1974. 839 с. Библиогр.: с. 831-838.

РАБОТА №6. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА (ДПТ)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – изучить способы регулировки частоты вращения ДПТ независимого возбуждения и научиться снимать его скоростные характеристики.

6.1. Описание лабораторного стенда

Лабораторная работа выполняется на лабораторном комплекте, который состоит из электромашинного агрегата и функциональных блоков модульного типа.

Электромашинный агрегат типа ЭМAM4 (электромашинный агрегат с маховиком 4-й модели), в дальнейшем агрегат, конструктивно представляет спаренные между собой и установленные на едином основании машину постоянного тока, машину переменного тока и маховик. Спаренными называются электрические машины, валы которых соединены механически с помощью муфт, вал машины переменного тока так же сочленен с преобразователем угловых перемещений. В данной лабораторной работе машина постоянного тока используется в качестве двигателя постоянного тока, а универсальная машина переменного тока в качестве трёхфазного синхронного генератора. Таким образом, двигатель постоянного тока приводит во вращение синхронный генератор, который преобразует механическую энергию двигателя в электрическую. Для защиты пользователей от движущихся частей агрегата его соединительные муфты закрыты кожухами.

Паспортные данные устройств агрегата (технические характеристики) приведены в работе №4.

6.2. Порядок выполнения работы

- 2.1. Записать паспортные данные испытуемого двигателя и нагрузочного генератора.
- 2.2. Снять скоростные характеристики ДПТ:
 - а) по схеме рисунка 6.1. При номинальном напряжении питания $U = U_n$, добавочном сопротивлении в цепи якоря $R_d=0$, регулировочном сопротивлении в цепи возбуждения $R_p=0$ (естественная скоростная характеристика).
 - б) по схеме рисунка 6.2. При номинальном напряжении питания $U = U_n$, добавочном сопротивлении в цепи якоря $R_d \neq 0$, регулировочном сопротивлении в цепи возбуждения $R_p = 0$.
 - в) по схеме рисунка 6.3. При номинальном напряжении питания $U = U_n$, добавочном сопротивлении в цепи якоря $R_d = 0$, регулировочном сопротивлении в цепи возбуждения $R_p \neq 0$, уменьшающем ток возбуждения до значения $I_b = 0,7I_{bн}$.

г) по схеме рисунка 6.1. При напряжении питания $U = 0,5U_n$, добавочном сопротивлении в цепи якоря $R_d = 0$, регулировочном сопротивлении в цепи возбуждения $R_p = 0$.

6.3. Пояснения к выполнению лабораторной работы

В качестве механической нагрузки ДПТ используется трёхфазный синхронный генератор СГ, вал которого соединен с валом двигателя через маховик. Полученная конструкция называется машинным агрегатом. К СГ через выпрямитель подключается нагрузочный реостат (R_n на схемах), сопротивление которого при выполнении работы остается постоянным. При изменении напряжения возбуждения СГ пропорционально изменяются его напряжение и ток, а, следовательно, и создаваемый СГ, тормозной момент. В процессе выполнения лабораторной работы электрическую нагрузку (ток) генератора постепенно увеличивают, что вызывает увеличение тормозного момента на его валу. Что бы преодолеть возрастающий тормозной момент генератора (механическую нагрузку) двигатель должен потреблять из сети больше электрической энергии. Здесь наглядно проявляется соблюдение закона сохранения энергии - чем больше электрической энергии СГ отдает нагрузочному реостату, тем больше механической энергии он потребляет от ДПТ, который в свою очередь потребляет из сети больше электрической энергии.

6.3.1. Снятие естественной скоростной характеристики

Для снятия естественной скоростной характеристики $n = f(I_a)$ дополнительное сопротивление R_d в цепь якоря и регулировочное сопротивление R_p в цепь возбуждения не включают (рис.6.1). Первой снимают точку, соответствующую режиму холостого хода ДПТ. Для этого с помощью выключателя (на схеме обозначен А1, код 301.1) разрывают цепь якоря СГ. Затем, включают источник питания ДПТ (на схеме обозначен G2, код 206.1), и плавно увеличивая напряжение на якоре ДПТ добиваются что бы частота вращения его ротора достигла 1500 об/мин. Значение тока возбуждения в этом режиме называется номинальным $I_b = I_{bn}$, оно записывается над таблицей 6.1, так же здесь записывается напряжение якоря ДПТ, при котором частота вращения ротора достигла значения 1500 об/мин. Далее, с помощью выключателя А1, подключают нагрузочный реостат R_n к СГ. Плавно увеличивая ток возбуждения СГ (до значения $I_{всг} \leq 1,7 \text{ A}$), снимают 5...6 точек скоростной характеристики, пока ток якоря ДПТ не достигнет значения $I_a = I_{ан} \dots 1,2 I_{ан}$.

Таблица 6.1. Естественная скоростная характеристика. $I_b = I_{bn} =$, $R_d=0$, $U = U_n =$

I, A						
$n, \text{об/мин}$						

6.3.2. Снятие скоростной характеристики при введении в цепь якоря добавочного сопротивления R_d

Для снятия характеристики собирается схема (рис. 6.2), которая отличается от предыдущей тем, что в цепь якоря ДПТ включается реостат с сопротивлением R_d . На якорь ДПТ подаётся такое же напряжение, как и в предыдущем опыте. Затем по методике, описанной в п.6.3.1, снимается скоростная характеристика. После завершения опыта следует отключить нагрузочный реостат R_H в цепи якоря СГ с помощью ключа А1. Данные опыта записываются в таблицу 6.2.

Таблица 6.2. Искусственная скоростная характеристика. $I_B = I_{BH} =$, $R_d \neq 0$,
 $U = U_H =$

I, A						
$n, об/мин$						

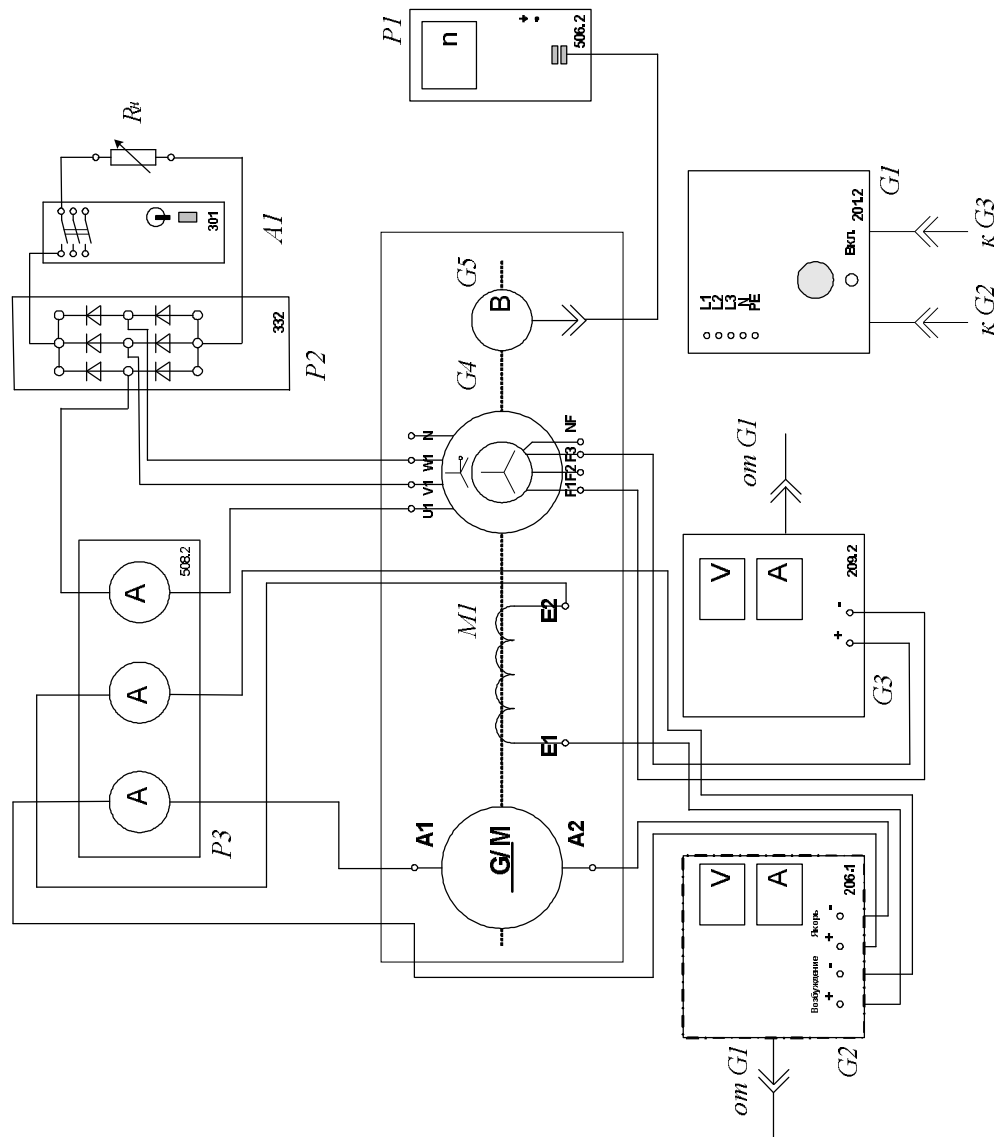


Рисунок 6.1. Схема для снятия естественной скоростной характеристики ДПТ

6.3.3. Снятие скоростной характеристики при введении в цепь возбуждения регулировочного сопротивления R_p

Для снятия характеристики собирается схема рисунка 6.3, которая отличается от предыдущей тем, что в цепь возбуждения ДПТ включается реостат с сопротивлением R_p , а реостат R_d шунтируется или исключается из схемы. При отсутствии напряжения на якоре ДПТ, изменяя сопротивление реостата R_p добиваются, чтобы значение тока возбуждения ДПТ составляло $I_b = 0,7I_{bн}$. После этого на якорь ДПТ подаётся напряжение, такое же, как и в первых двух опытах и в таблицу 6.4 записываются значения первой точки скоростной характеристики. Далее с помощью ключа А1 в цепь статора СГ подключается нагрузочный реостат R_n и по методике, описанной в п.6.3.1, снимаются остальные точки скоростной характеристики. Данные опыта записываются в таблицу 6.3.

Таблица 6.3. Искусственная скоростная характеристика. $I_b = 0,7I_{bн}$, $R_d = 0$, $U = U_n =$

I, А						
n, об/мин						

6.3.4. Снятие скоростной характеристики при уменьшении напряжения питания цепи якоря

Для снятия характеристики собирается схема рисунка 6.1, в которой отсутствуют реостаты R_p и R_d . Далее рукояткой, расположенной на источнике питания ДПТ (G2 на схеме), устанавливаем напряжение якоря, равное $U = 0,5U_n$. Затем по методике, описанной в п.6.3.1, снимается скоростная характеристика. Данные опыта записываются в таблицу 6.4.

Таблица 6.4. Искусственная скоростная характеристика. $I_b = I_{bн}$, $R_d = 0$, $U = 0,5U_n =$

I, А						
n, об/мин						

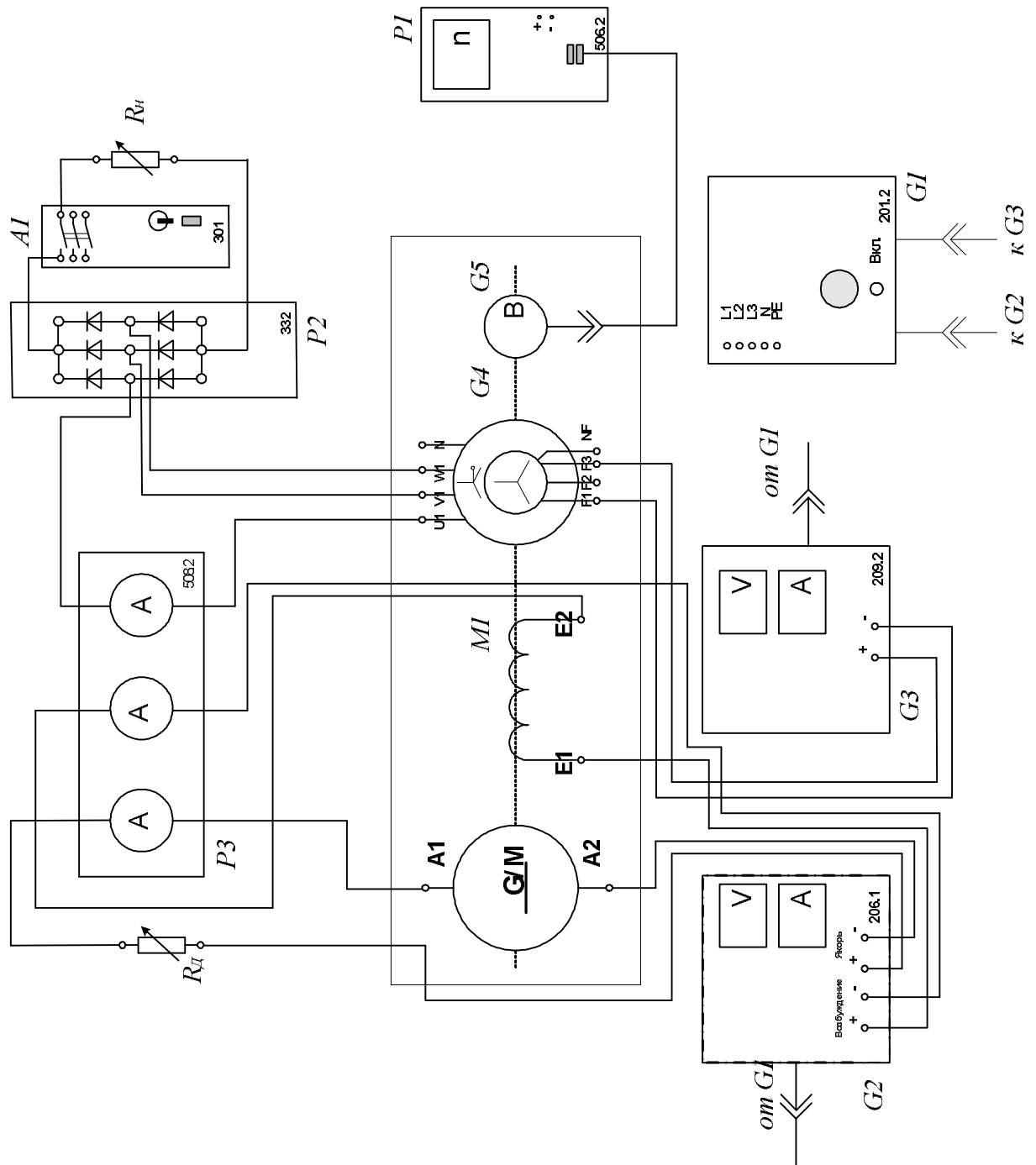


Рисунок 6.2. Схема для снятия скоростной характеристики при включении добавочного сопротивления $R_{\text{д}}$ в цепь якоря

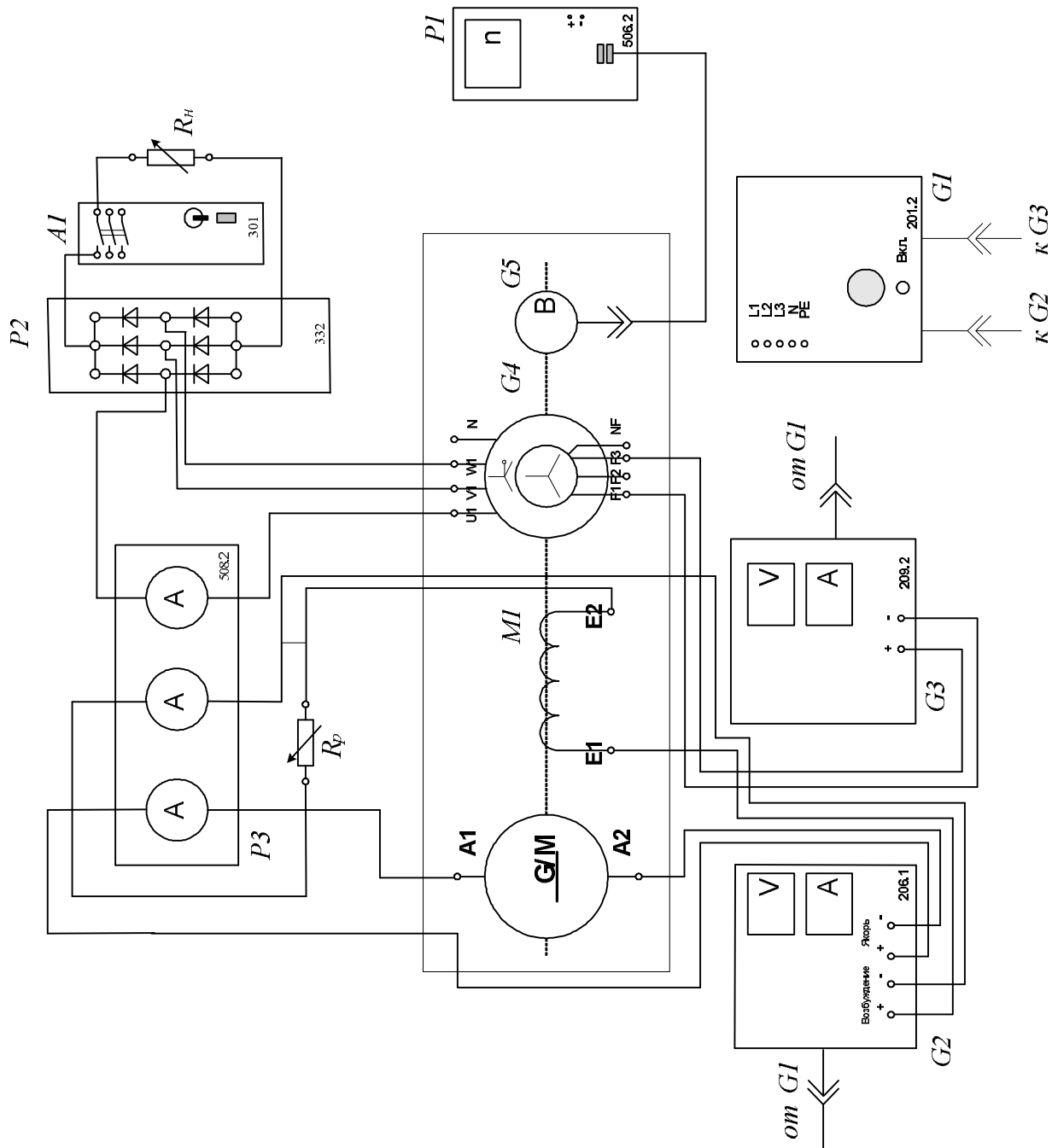


Рисунок 6.3. Схема для снятия скоростной характеристики при изменении тока возбуждения ДПТ

По данным таблиц 6.1, 6.2, 6.3 и 6.4 построить скоростные характеристики $n = f(I_a)$ ДПТ независимого возбуждения в одной плоскости координат.

6.4. Контрольные вопросы

- Объяснить устройство ДПТ.
- Объяснить принцип действия ДПТ.
- Какие существуют способы возбуждения ДПТ?
- Какие существуют способы регулировки частоты вращения ДПТ?
- Объяснить, как влияют на вид скоростных характеристик ДПТ независимого возбуждения изменение сопротивления цепи якоря, изменение сопротивления цепи возбуждения, изменение величины напряжения.

6.5. Список используемой литературы

1. Беспалов, В. Я. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котленец; М.: Издательский центр Академия, 2006. 320 с. Библиогр.: с. 309-313.
2. Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]: учебное пособие / А. И. Вольдек; Л.: Наука, 1974. 839 с. Библиогр.: с. 831-838.