

**КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО РЫБОЛОВСТВУ
ФГБОУ ВПО
«Калининградский государственный технический университет»**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Методические указания к лабораторным работам

Часть I

**МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА
И ТРАНСФОРМАТОРЫ**

**Калининград
1995 – 2015**

УДК 621.313
НТБ КГТУ
УТВЕРЖДЕНО
Проректором по учебной работе
Калининградского государственного
технического университета

АВТОРЫ:

В.Ф. Белей, д.т.н., профессор
В.И. Лозовенко, доцент
С.А. Якута, к.т.н., доцент
А.К. Аксенов, старший инженер
В.И. Гнатюк, д.т.н., профессор

Методические указания рассмотрены и одобрены на заседании кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики Калининградского государственного технического университета.

РЕЦЕНЗЕНТ – кафедра электрооборудования судов и электроэнергетики Калининградского государственного технического университета.

Оглавление	
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	1
1.ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....	4
2.ОПИСАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ.....	6
Лабораторная работа 2.1. Испытание генератора постоянного тока.....	6
Лабораторная работа 2.2. Испытание двигателя постоянного тока параллельного возбуждения.....	16
Лабораторная работа 2.3. Испытание двигателя последовательного возбуждения.....	22
Лабораторная работа 2.4. Потери и КПД машин постоянного тока.....	29
Лабораторная работа 2.5. Исследование электромашинного усилителя (ЭМУ) с поперечным полем.....	35
Лабораторная работа 2.6. Испытание двухобмоточного однофазного трансформатора	41
Лабораторная работа 2.7. Исследование способов соединения обмоток трансформатора	49
Лабораторная работа 2.8. Исследование параллельной работы трехфазных двухобмоточных трансформаторов.....	62
Лабораторная работа 2.9. Исследование несимметричных режимов работы трехфазных трансформаторов.....	72
Лабораторная работа 2.10. Испытание автотрансформаторов.....	91

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Выполнение лабораторной работы состоит из четырех этапов: подготовка к работе, сборка электрических цепей и собственно испытаний электрической машины, обработка результатов испытаний и составление отчета, защита лабораторной работы преподавателю.

Подготовка к выполнению лабораторной работы. Этот этап выполняется заблаговременно. При этом необходимо:

1) ознакомиться с оборудованием лабораторной установки, выписать паспортные данные исследуемой электрической машины и выяснить направление вращения агрегата;

2) изучить «Сведения из теории»;

3) ознакомиться с заданиями на экспериментальное и аналитическое исследование;

4) ознакомиться или разработать схему испытаний. Здесь важно выявить роль и назначение всех элементов электрических цепей, схему испытаний рекомендуется вычертить на отдельном листе бумаги в соответствии с ГОСТ;

5) определить последовательность операций при пуске, остановке и регулировании нагрузки и частоты вращения испытаний машины. Продумать необходимые действия на случай возникновения аварийных ситуаций во время проведения испытаний;

6) продумать последовательность операций при снятии каждой характеристики. Для каждой характеристики выяснить основную переменную величину, которую следует изменять во время снятия характеристики, и определить количество опытных точек, которые должны быть сняты во время эксперимента. Подготовить таблицы, в которые будут записаны результаты всех опытов.

Сборка электрических цепей и проведение испытаний машины:

1) сборка схемы производится при выключенном напряжении, а подключение схемы лабораторной установки к сети осуществляется после ее проверки преподавателем или инженером лаборатории;

2) протокол с результатами испытаний после окончания лабораторной работы следует подписать у преподавателя, ведущего занятие. Этот протокол должен быть приложен к отчету по лабораторной работе;

3) Находясь в лаборатории, необходимо строго выполнять требования инструкции по технике безопасности.

Обработка результатов испытаний и составление отчета. Этот этап работы является завершающим, подводящим итог всей лабораторной работы по испытанию конкретной электрической машины.

Обработку результатов испытаний следует проводить строго руководствуясь заданиями на экспериментальное и аналитическое исследования электрической машины.

Отчет должен быть составлен четко, ясно, аккуратно, достаточно полно и в то же время кратко, с соблюдением принятых стандартных условных обозначений. Чтобы отличить величины в физических и относи-

тельных единицах, будем обозначать строчными буквами величины в относительных единицах и прописными – в физических.

Учебно–лабораторное занятие завершается зачетным собеседованием с преподавателем. Во время собеседования студент должен показать свои знания и умения в организации испытаний электрических машин, знакомство с аппаратурой, знание техники проведения экспериментов и обработки результатов испытаний. Особое внимание следует уделить устройству, пониманию физических процессов, происходящих в машинах, объяснению вида соответствующих характеристик, а также особенностям эксплуатации электрических машин.

2. ОПИСАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Лабораторная работа 2.1. Испытание генератора постоянного тока

На электрических станциях генераторы постоянного тока зачастую используются в качестве источников питания обмоток возбуждения синхронных генераторов.

Цель работы

Ознакомиться с устройством и принципом действия генераторов постоянного тока. Ознакомиться с методами испытаний генераторов постоянного тока. На основе испытаний построить и проанализировать характеристики генератора постоянного тока. Ознакомиться с особенностями эксплуатации генераторов постоянного тока.

Краткие теоретические сведения

Свойства генераторов постоянного тока (ГПТ) определяются в основном способом питания их обмоток возбуждения. В зависимости от этого различают генераторы: с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Рассматриваемые генераторы имеют сходное устройство и отличаются лишь выполнением обмотки возбуждения. Обмотки независимого и параллельного возбуждения выполняются с большим числом витков из провода с малым сечением. Обмотка последовательного возбуждения из провода большого сечения, но с малым числом витков. Обе эти обмотки монтируются на главных полюсах машины. Генераторы малой мощности иногда выполняются с постоянными магнитами. Свойства таких генераторов близки к свойствам генераторов с независимым возбуждением.

Генератор постоянного тока преобразует подводимую к валу якоря генератора механическую энергию в электрическую энергию постоянного тока. Это преобразование осуществляется следующим образом. В обмотку возбуждения подают постоянный ток. Этот ток создает основной магнитный поток, магнитные линии которого неподвижны. При вращении якоря от постороннего источника механической энергии, обмотка якоря пересекает магнитные линии магнитного поля машины и в ней индуцируется переменная ЭДС (E_a), которая посредством коллектора выпрямляется, и на зажимах якоря ГПТ будет постоянное напряжение (U_a). С целью улучшения коммутации между главными устанавливаются дополнительные полюса.

Ниже приводим основные уравнения, описывающие работу генератора,

$$E_a = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (1)$$

$$U_a = E_a - I_a \cdot R_a, \quad (2)$$

где I_a – ток якоря, А

R_a – омическое сопротивление обмотки якоря, Ом;

Φ – магнитный поток одного полюса, Вб;

c – конструктивная постоянная машины;

ω – частота вращения якоря, рад/сек.

Свойства ГПТ описываются нелинейными зависимостями, которые часто изображаются графически – характеристиками, устанавливающими связь между током возбуждения I_a ; I_b и напряжением на зажимах якоря U_a . Основными характеристиками, определяющими свойства генераторов постоянного тока, являются характеристики холостого хода, внешняя, короткого замыкания, регулировочная и нагрузочная. Рассмотрим снятие некоторых вышеуказанных характеристик для ГПТ с независимым возбуждением, далее с параллельным и смешанным возбуждением. Характеристика холостого хода (ХХХ) $U_a = F(I_b)$ при $i_a = 0$ и $\omega = \text{const}$ определяет зависимость напряжения или ЭДС якоря E_A от тока возбуждения I_b . Характеристика снимается экспериментально по схеме рис. 1 при отключенных нагрузочных сопротивлениях R_n .

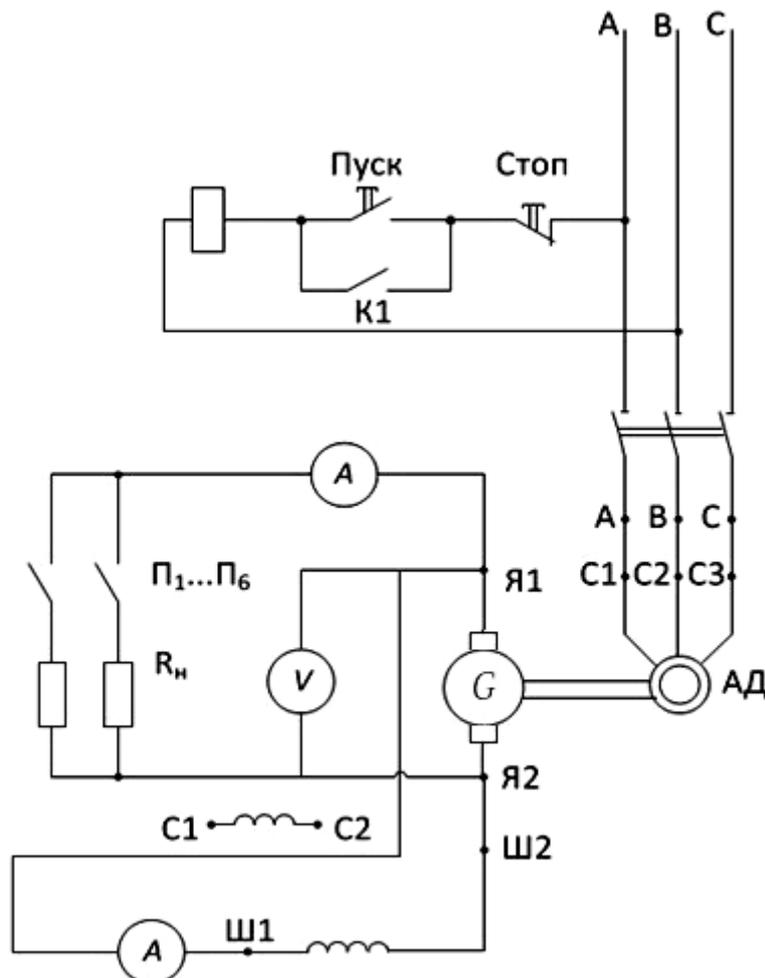


Рис. 1а

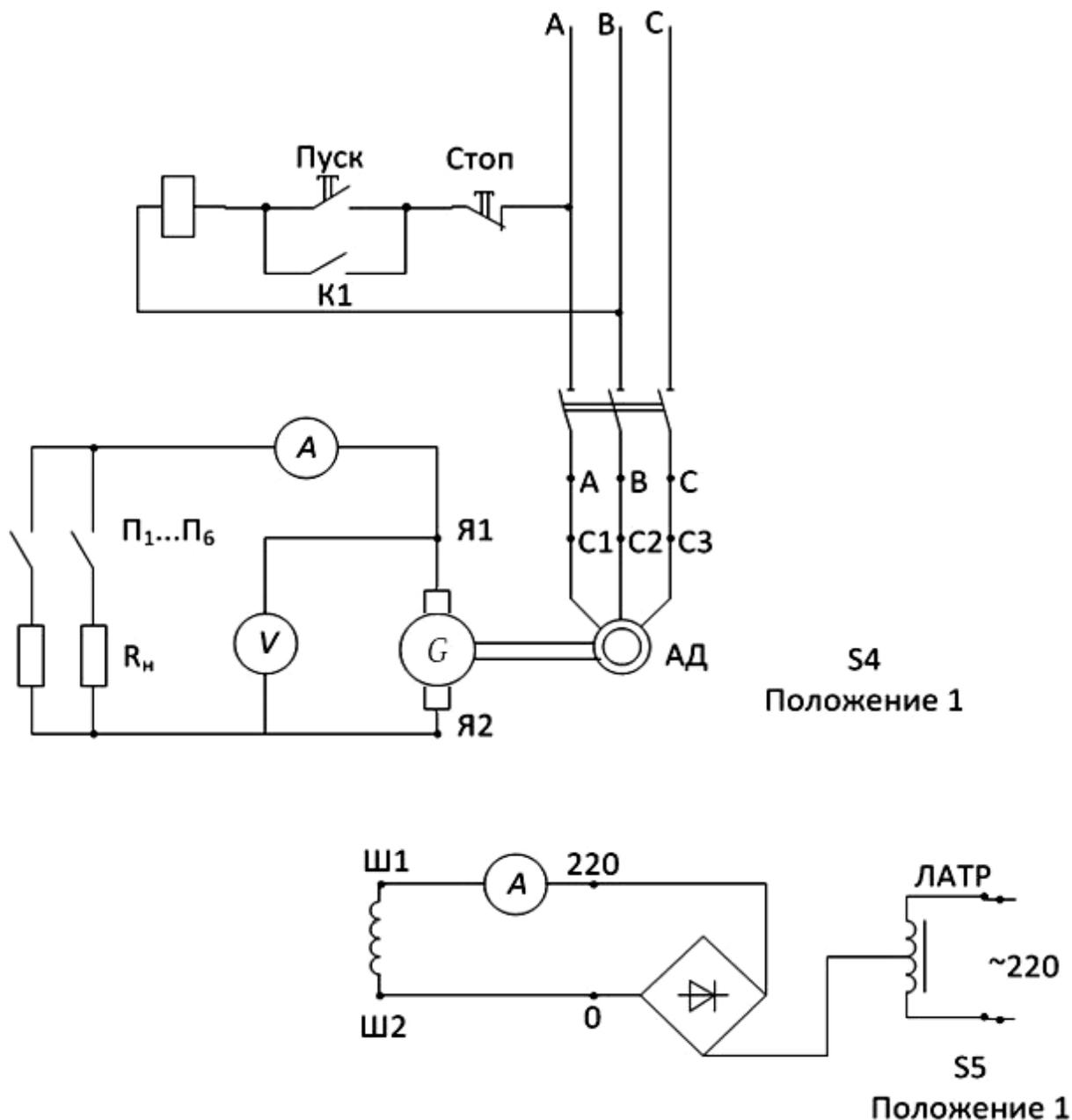


Рис. 1б

Снятие характеристики целесообразно начать с максимального значения тока возбуждения и максимального напряжения $U_a = (1,15-1,25) U_n$ точка «а» кривой на рис. 2. При уменьшении I_B напряжение уменьшается по нисходящей ветви «аб» характеристики сначала медленно ввиду насыщения магнитной цепи, а затем быстрее. При $I_B = 0$ генератор развивает некоторое напряжение U_0 , обычно равное 2–3% от U_n , вследствие остаточной намагниченности полюсов и ярма индуктора. Далее, дважды изменяя направление I_B , в итоге вернемся к точке «а» (рис. 2). ХХХ имеет вид неширокой гистерезисной петли вследствие явления гистерезиса в магнитной цепи индуктора. При снятии ХХХ ток I_B необходимо менять только в направлении, указанном на рис. 2 стрелками, т.к. в противном случае точки не будут ложиться на данную гистерезисную петлю, а будут рассеиваться.

Внешняя характеристика генератора $U_a = F(I_B)$ при $I_B = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$ (рис. 3) определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки в естественных условиях, когда ток возбуждения не регулируется. При увеличении i_a напряжение U_a несколько падает по двум причинам: вследствие падения напряжения в цепи якоря $i_a R_A$ и уменьшения E_A ввиду уменьшения результирующего магнитного потока под воздействием поперечной реакции якоря.

Регулировочная характеристика $I_B = F(i_a)$ при $U_a = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$ показывает, как нужно регулировать ток возбуждения, чтобы при изменении нагрузки напряжение генератора оставалось неизменным. С увеличением i_a ток I_B необходимо несколько увеличивать, чтобы компенсировать влияние падения напряжения $i_a R_{aи}$ влияние реакции якоря.

Характеристический (реактивный) треугольник определяет величину реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря. Он строится для нахождения величины реакции якоря по экспериментальным данным и используется также для построения некоторых характеристик машины, если они не могут быть сняты экспериментально. Характеристический треугольник можно построить с помощью Х.Х.Х. и любой другой основной характеристики машины, а также по расчетным данным. Рассмотрим здесь его построение с помощью Х.Х.Х. и внешней характеристики.

Нанесем на график усредненную кривую Х.Х.Х. (кривая 1, рис. 3) и внешнюю характеристику (кривая 2, рис. 3). Теперь построим характеристический треугольник для режима работы генератора в точке «3». (внешней характеристики). Из точки «б», соответствующей режиму, при котором $I_a = 0$, опустим перпендикуляр «ба» на ось абсцисс. Из точки «з» проведем линию «зе», параллельную оси абсцисс из точки «е» на прямой «аб» в соответствующем масштабе, отложим отрезок «ед» равный падению напряжения на сопротивлении обмотки якоря «ед» = $I_h \cdot R_a$.

Из точки «д» проводим линию «де» до пересечения с Х.Х.Х. треугольник «едг» и является характеристическим. Отрезок «гд» показывает, на какую величину нужно увеличить ток возбуждения, чтобы скомпенсировать размагничивающее действие реакции.

Нагрузочная характеристика $U_a = f(I_b)$ при $I_a = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$. Она проходит ниже Х.Х.Х. вследствие падения напряжения в цепи якоря и влияния реакции якоря. Х.Х.Х. представляет собой предельный случай нагрузочной характеристики, когда $I_a = 0$. Поясним, как посредством Х.Х.Х. и характеристического треугольника можно построить нагрузочную характеристику, например, при $I_a = I_h$. Передвигая характеристический треугольник, построенный для номинального режима работы генератора, параллельно самому себе так, чтобы его вершина «г» скользила по Х.Х.Х., то его вершина «е» очертит нагрузочную характеристику (сплошная кривая 3, рис. 3). Эта характеристика несколько разойдется с опытной (пунктирная линия 4, рис.3) так величина катета «гд» будет меняться вследствие изменения условий насыщения.

Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

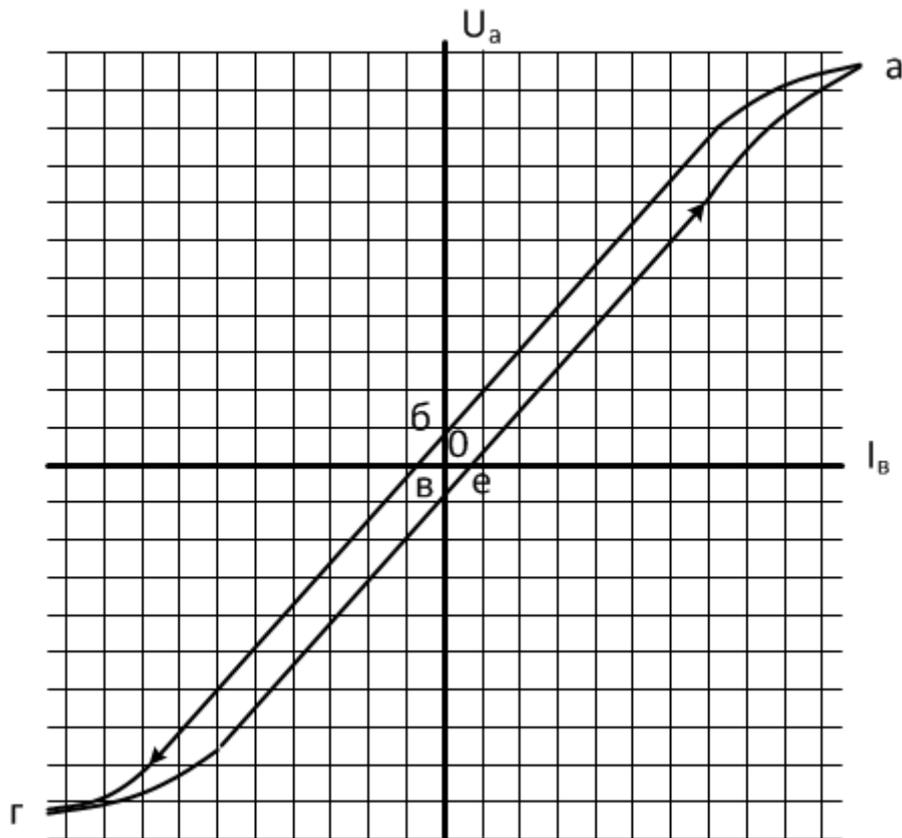


Рис. 2

Характеристический треугольник и нагрузочная S характеристика ГПТ

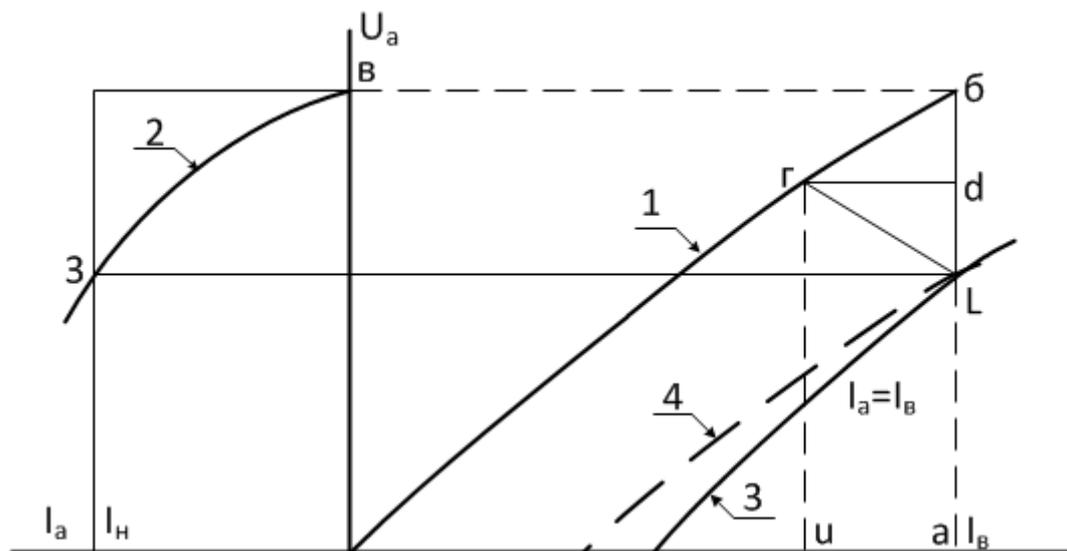


Рис. 3

В генераторе с параллельным возбуждением обмотка возбуждения (Ш1–Ш2) подсоединяется через регулировочный реостат при параллельной нагрузке (рис. 1б). Следовательно, в машине используется принцип самовозбуждения, при котором обмотка возбуждения получает питание

непосредственно от самого генератора. Как известно, самовозбуждение возможно только при выполнении определенных условий:

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

Характеристика холостого хода $U_a = f(I_b)$ при $I_a = 0$ и $\omega = \text{const}$ (см. рис. 16) при параллельном возбуждении может быть снята только в одном квадрате путём регулирования I_b с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения.

Внешняя характеристика $U_a = f(I_a)$ при $R_b = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$.

Регулировочная характеристика $I_b = f(U_a)$ при $U_a = \text{const}$ также, как и у ГПТ.

Генератор смешанного возбуждения самовозбуждается так же, как генератор параллельного возбуждения, и их Х.Х.Х. аналогичны.

Снятие внешней регулировочной характеристик генератора со смешанным возбуждением производится так же, как и у ГПТ с параллельным возбуждением.

Описание лабораторной установки

Схема изображена на рис. I. Она содержит исследуемый генератор постоянного тока, приводимый во вращение асинхронным двигателем. В таблице 1 приведены паспортные данные машины постоянного тока.

Таблица 1

Тип	P_n кВт	U_n В	I_n А	$I_{вн}$ А	R_a Ом	$R_{ш1-ш2}$ Ом	n_n об/мин
ПЗ1М	2,0	230	11,2		0,96	360	2850

В качестве нагрузки, подключаемой к якору машины постоянного тока посредством переключателей Ш–ПБ, используются нагрузочные сопротивления R_n . В состав установки входят: электроизмерительные приборы: амперметры и вольтметры, автотрансформатор ЛАТР и выпрямитель питания постоянным током обмотки возбуждения ГПТ – переключатели S4 и S5 для коммутации электрических цепей.

Задание на экспериментальное исследование

1. На основе технических данных ГПТ подобрать необходимые измерительные приборы.
2. Согласно рис 1 собрать схему установки. Установить переключатели S4 и S5 в положение «I».

Переходим к снятию характеристик ГПТ с независимым возбуждением. Для этого посредством пускателя К1 включаем асинхронный двигатель, приводящий в действие ГПТ.

3. Характеристика холостого хода. Снимаем зависимость $U_a = f(I_b)$. Результаты заносим в табл. 2. Опыт проводим в следующей последовательности. Установим такой ток возбуждения, при котором напряжение ГПТ будет равным $U_a \approx (1,08-1,3) U_H$. Далее уменьшаем ток возбуждения до нуля. Отключаем асинхронный двигатель. Меняем местами концы обмотки возбуждения «Ш1» и «Ш2» и вольтметра.

Включаем асинхронный двигатель в сеть, увеличиваем ток возбуждения до значения ЭДС равной $(1,08-1,3) U_H$ генератора.

Затем плавно снижаем ток возбуждения до нуля. Отключаем асинхронный двигатель от сети, вновь меняем местами концы обмотки возбуждения «Ш1» и «Ш2» и вольтметра. Включаем двигатель и плавно увеличиваем ток возбуждения от нулевого значения до значения, при котором ЭДС станет равным $(1,08-1,3) U_H$. Примерный вид х.х.х. показан на рис. 2.

4. Внешняя характеристика. Установить при $I_a = 0$ напряжение равное номинальному. Подключать к якору посредством переключателей

Ш-ПБ ступени нагрузочного устройства R_H таким образом, чтобы ток якоря менялся от $I_a = 0$ до $I_a \approx I_H$ при $I_b = const$

Измерять ток возбуждения, ток и напряжение якоря. Результаты измерений занести в табл. 3.

5. Регулировочная характеристика. Установить при $I_a = 0$ напряжение ГПТ, равное $(0,85 - 0,87) U_H$ и, изменяя ток якоря от нулевого значения до значения, близкого к номинальному, поддерживать посредством изменения I_b неизменным напряжение ГПТ. Измерить I_a, I_b, U_a . Результаты занести в табл. 4.

6. Переходим к снятию характеристик для ГПТ с параллельным возбуждением. Для этого собираем схему установки, приведенную на рис. 1б.

7. Характеристика холостого хода. Сопротивление $R_{рег}$ в цепи возбуждения следует установить в положение равным нулю. Включить приводной асинхронный двигатель. Если процесс самовозбуждения ГПТ не происходит, то отключить асинхронный электродвигатель от сети и поменять местами концы шунтовой обмотки возбуждения. Далее вновь включить асинхронный двигатель в сеть. Опыт проводить в следующей последовательности:

а) установить $R_{рег}$ в нулевое положение, чтобы получить наибольший ток возбуждения;

б) постепенно и плавно снижать с помощью реостата $R_{рег}$ ток возбуждения до минимума. Записать в табл. 5 ...6 точек измерений.

8. Внешняя характеристика. При отключенных нагрузочных реостатах ($I_a = 0$) установить напряжение на зажимах якоря ГПТ равное номинальному. Затем загружать ГПТ, включая ступени нагрузочного реостата R_H . При этом в цепи возбуждения регулировочное сопротивление $R_{рег}$ остается неизменным. То есть, характеристика снимается без регулирования

в цепи возбуждения, при естественных условиях работы. Результаты измерений занести в таблицу, аналогичную табл.3.

9. Регулировочная характеристика. Снимается по методике, изложенной в пункте 5.

10. Переходим к снятию внешних и регулировочных характеристик ГПТ со смешанным возбуждением. Для этого при отключенном асинхронном двигателе включаем последовательно в цепь якоря ГПТ сериесную обмотку возбуждения С1–С2. Эти характеристики следует снять при согласном и встречном включении шунтовой и сериесной обмоток возбуждения ГПТ.

10.1. Снятие внешних характеристик осуществляется по методике, изложенной в пункте 8. Различие заключается в том, что здесь снимаются две внешние характеристики; при согласном и встречном включениях обмоток возбуждения. Результаты опытов занести в табл. 6.

10.2. Снятие регулировочных характеристик. Здесь также снимаются две характеристики: при встречном и согласном включении обмоток возбуждения по методике, изложенной в пункте 5. Результаты опытов следует занести в таблицу по формуле аналогичную табл. 6.

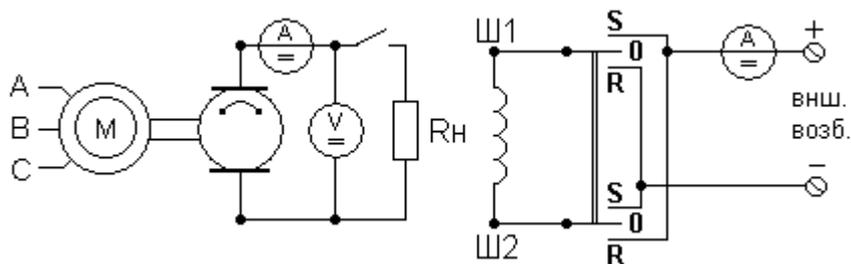


Рис.4

Таблица 2 – Данные опыта при ХХ.

О – отключено, П – переключение.

	S						O		P		R						
	+										-						
I _B	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5	0,25	0,0				0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	H _c
U _a									0,0								H _c
I _B	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5	0,25		0,0		0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	B _c	
U _a							0,0										B _c
	S						P		O		R						

Таблица 3 – Данные внешней характеристики.

I _a	0					
U _B						
mU _a	115					

Таблица 4 – Данные регулировочной характеристики.

Ia	0					
Uв						
Ia	98	98	98	98	98	98

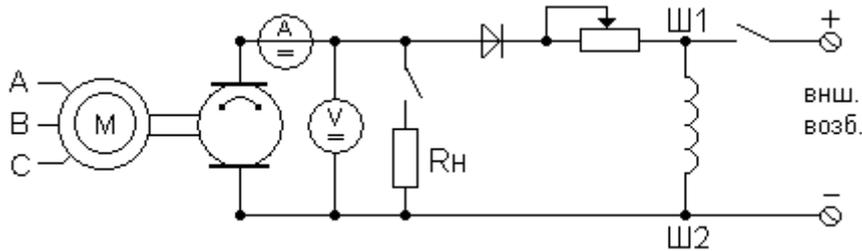


Рис. 5

Таблица 5 – Данные внешней характеристики при самовозбуждении.

Ia	0					
Uв						
Ia	115					

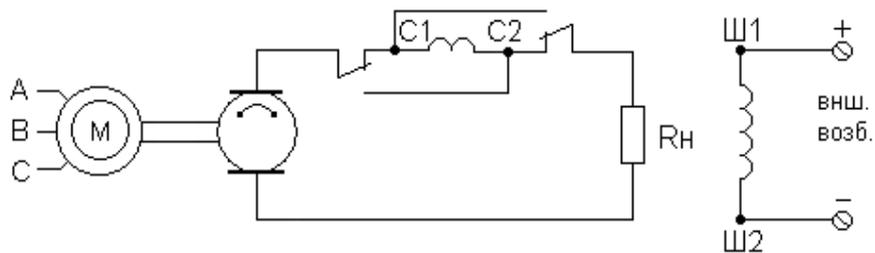


Рис.6

Таблица 6 – Данные внешней хар-ки при комплексном возбуждении.

Ia	0					
Iв						
Ua	115					
Ia	0					
Iв						
Ua	115					

Задание на аналитическое исследование:

1. На графике 1 построить X.X.X. ГПТ с независимым возбуждением. Через начало координат провести среднюю линию. Для номинального значения напряжения ГПТ определить коэффициент насыщения машины (см. Л1).

2. На графике 2 построить внешние характеристики ГПТ с независимым и параллельным возбуждением. По ним определить номинальное изменение напряжения ГПТ.

3. На графике 3 построить Х.Х.Х. и внешнюю характеристики генератора с независимым возбуждением. По заданию преподавателя построить характеристический треугольник и нагрузочную характеристику ГПТ.

4. На графике 4 построить регулировочные характеристики ГПТ с независимым, параллельным и смешанным возбуждением.

5. На графике 5 построить две внешние характеристики ГПТ при согласном и встречном включении шунтовой и серийной обмотки возбуждения ГПТ.

Вопросы для самопроверки

1. Объяснить устройство генератора постоянного тока.
2. Объяснить назначение главных и дополнительных полюсов.
3. Какая из характеристик позволяет судить о насыщении магнитной цепи машины?
4. Что определяет характеристический треугольник?
5. Объяснить термин «критическая скорость вращения»?
6. В каких пределах и каким образом достигается регулирование напряжения на зажимах якоря ГПТ, используемого в качестве возбудителя синхронных машин?
7. Почему внешняя характеристика ГПТ с параллельным возбуждением падает круче, чем у ГПТ с независимым возбуждением?
8. Объяснить влияние реакции якоря на внешнюю и регулировочную характеристики ГПТ.
9. Назовите условия, которые следует выполнить, чтобы осуществить процесс самовозбуждения ГПТ?
10. Что необходимо выполнить, если произошло размагничивание ГПТ?
11. Что такое потенциальное искрение и круговой огонь?

Лабораторная работа 2.2. Испытание двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Двигатели постоянного тока находят широкое применение в промышленных, транспортных и других установках, где требуется широкое и плавное регулирование скорости вращения (электропривод лебедок и т.д.).

Цель работы

Изучить конструкцию и принцип действия двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Экспериментально снять характеристики двигателя. Ознакомиться с особенностями эксплуатации двигателей постоянного тока.

Краткие теоретические сведения

Уравнения, описывающие работу двигателя постоянного тока (ДПТ)

$$\begin{aligned} U_a &= E_a + I_a \cdot R_a; & E_a &= c \cdot \Phi \cdot \omega; \\ M &= c \cdot \Phi \cdot I_a; & \omega &= \frac{U}{c \cdot \Phi} - \frac{M}{c^2 \cdot \Phi^2} \cdot (R_a + R_{\text{доб}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где U_a – подводимое к якору ДПТ напряжение;

E_a – противоэлектродвижущая сила якоря;

I_a – ток якоря;

R_a – полное сопротивление цепи якоря;

Φ – магнитный поток;

M, ω – соответственно момент и угловая скорость на валу якоря ДПТ.

Энергетическая диаграмма ДПТ изображена на рис. 1. Первичная мощность P_1 является электрической и потребляется из питающей сети. За счет этой мощности покрываются потери на возбуждения ΔP_b и электрические потери в цепи якоря ΔP_z , а оставшаяся часть составляет электромагнитную мощность якоря $P_{эм}$, которая превращается в механическую мощность. Магнитные потери $\Delta P_{ст}$ механические и добавочные $\Delta P_{доб}$ потери покрываются за счет механической мощности.

Остальная часть мощности представляет собой полезную механическую мощность P_2 на валу

$$\begin{aligned} P_1 &= U \cdot (I_a + I_b); \\ \Delta P_z &= I_a^2 \cdot R_a \end{aligned} \quad (2)$$

Эксплуатационные свойства ДПТ можно оценивать на основе рабочих, механических, регулировочных и нагрузочных характеристик.

Рабочие характеристики – это зависимости скорости n , тока якоря I_a потребляемой мощности P_1 , момента M и КПД от мощности на валу P , при дополнительном сопротивлении в цепи якоря $R_{доб} = 0$ и постоянной величине тока возбуждения $I_b = I_{b \text{ ном}}$. Величина момента на валу ДПТ соз-

дается электромагнитным тормозом. Измерив величину момента и скорость вращения, можно определить мощность на валу

$$P_2 = M \cdot \omega; \omega = \frac{\pi n}{30}, \quad (3)$$

где – ω угловая скорость ДПТ,

Энергетическая диаграмма двигателя постоянного тока

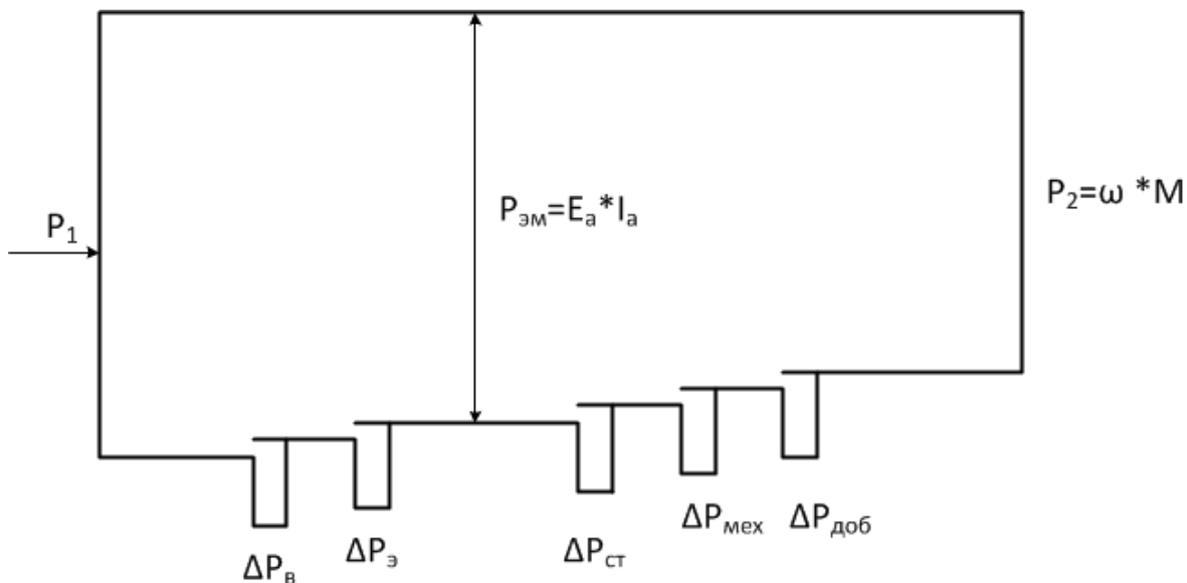


Рис. 1

Механическая характеристика ДПТ

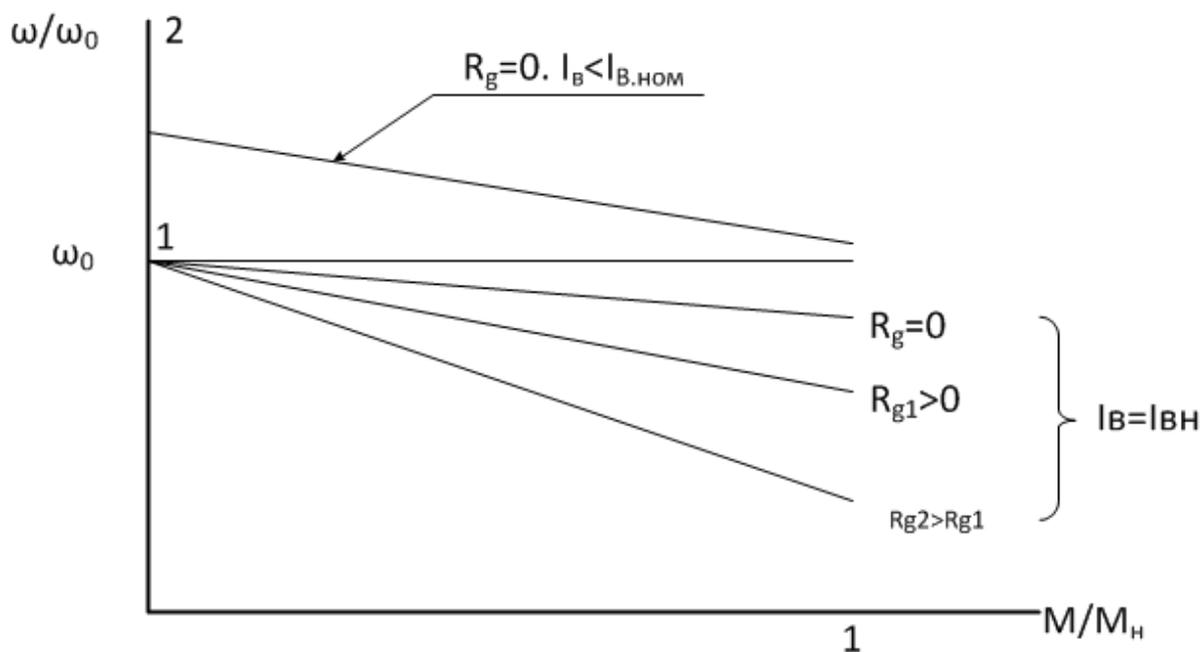


Рис. 2

КПД определится по выражению

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб} + U_b I_b + I_a^2 \cdot R_a} \quad (4)$$

$$\Delta P_{доб} = 0,01 \cdot P_1 \cdot (I_a \cdot I_{a \text{ ном}})^2$$

Механическая характеристика – это зависимость угловой скорости от момента $\omega = f(M)$. Как следует из уравнения 1 скорость ДЖ можно регулировать путем изменения подводимого к якорю напряжения, магнитного потока (тока возбуждения) или включения последовательно с якорем добавочного сопротивления.

На рис. 2 показаны механические характеристики при различных значениях магнитного потока и величин добавочных сопротивлений в цепи якоря ДПТ.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 3) состоит из испытуемого двигателя, электромагнитного тормоза ТЭМ, со стороны которого создается момент сопротивления на валу ДПТ. Величина этого момента регулируется путем изменения тока в обмотке ТЭМ ЛАТРОм. В табл. 1 приведены технические данные ДПТ.

Таблица 1

Тип	КПД %	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	I_n , А	R_a , Ом	R_b , Ом	n_n , об/мин	$\Delta P_{ст}$, Вт	$\Delta P_{мех}$, Вт
П42	77	2,2	220	13,1	0,8	0,67	255	1000	150	150

В цепь якоря включено пусковое сопротивление R_n , которое шунтируется контактом пускового реле (РП) во время пуска, а также могут подключаться последовательно с якорем два добавочных сопротивления R_1 и R_2 .

В состав лабораторного стенда входят реостат R_b , для регулирования тока возбуждения ДПТ, электроизмерительные приборы и, переключатели S4 и S5.

Задание на экспериментальное исследование

1. Перед сборкой схемы ознакомиться с техническими данными двигателя постоянного тока (ДПТ) и рассчитать его номинальный момент M_n . На основе технических данных ДЩ подобрать необходимые для испытаний электроизмерительные приборы.

2. Собрать схему, приведенную на рис. 3. Переключатель S4 установить в положение ТЭМ, а S5 в положение «Пуск». После проверки схемы преподавателем кнопками К1 и К2 подключить схему к сети.

3. Снятие рабочих характеристик. Установить и поддерживать постоянным номинальный ток возбуждения $I_b = 0,8$ А при $R_{доб} = 0$, далее

посредством нагрузочного устройства создать момент сопротивления на валу ДПТ близкий по величине номинальному $M \approx M_H$.

Схема лабораторной установки

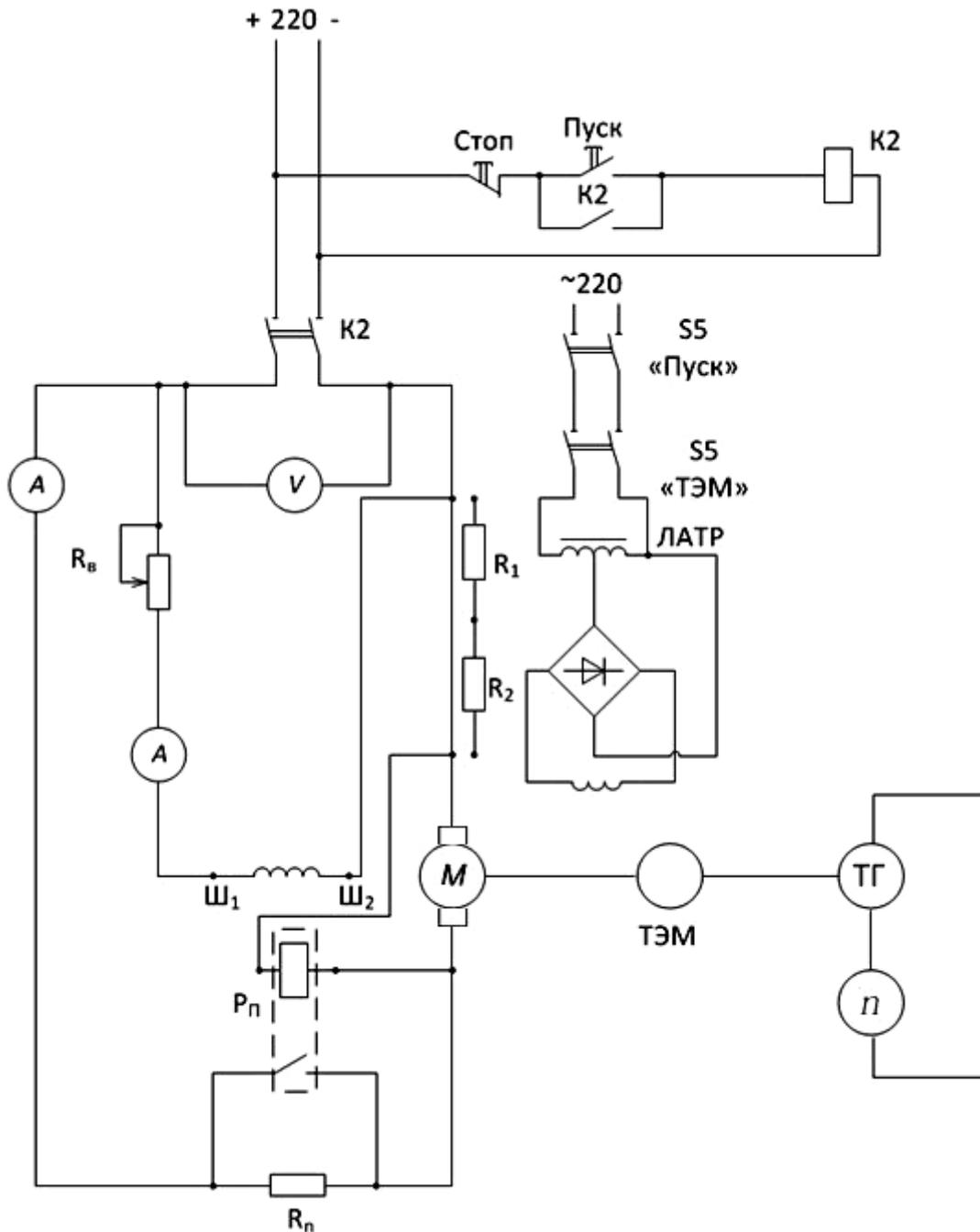


Рис. 3

Изменяя момент на валу двигателя от $M=M_H$ до $M=0$, измерить напряжение на двигатель U , ток возбуждения I_b , ток якоря I_a , момент M_H частоту вращения n . Опытные данные занести в табл. 2.

Таблица 2

№ пп	Экспериментальные данные					Расчетные данные		
	М (кгм)	U (В)	I _a (А)	I _в (А)	n (об/м)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
1	1,75			0,8				
2	1,5			0,8				
3	1,25			0,8				
4	1			0,8				
5	0,5			0,8				
6	0			0,8				

Таблица 3

№ пп	Экспериментальные данные					Расчетные данные		
	М (кгм)	U (В)	I _a (А)	I _в (А)	n (об/м)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
1	1,75			0,6				
2	1,5			0,6				
3	1,25			0,6				
4	1			0,6				
5	0,5			0,6				
6	0			0,6				

Таблица 4

$$R_{\text{доб}} = R_1 = 6 \text{ Ом}$$

№ пп	Экспериментальные данные					Расчетные данные		
	М (кгм)	U (В)	I _a (А)	I _в (А)	n (об/м)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
1	1,25			0,75				
2	1			0,75				
3	0,5			0,75				
4	0			0,75				

Таблица 5

$$R_{\text{доб}} = R_1 + R_2 = 11 \text{ Ом}$$

№ пп	Экспериментальные данные					Расчетные данные		
	М (кгм)	U (В)	I _a (А)	I _в (А)	n (об/м)	P1 (Вт)	P2 (Вт)	КПД
1	1,25			0,75				
2	1			0,75				
3	0,5			0,75				
4	0			0,75				

4. Механические характеристики

4.1. Механическая характеристика при пониженном значении тока возбуждения (потока).

Установим ток возбуждения $I_b \approx 0.8 \cdot I_{bн}$, будем поддерживать его в течение опыта постоянным. Изменяя момент от $M = M_H$ до $M = 0$, снимем опытные данные U, I_a, I_b, n, M . Результаты запишем в табл. 3.

4.2. Механические характеристики при различных значениях

$$R_{доб} = 0; R_{доб} = R_1 + R_2; R_{доб} = R_1$$

Первоначально включим последовательно в цепь якоря добавочное сопротивление $R_{доб} = R_1 + R_2$. Далее установим момент на валу ДГГ1 близкий к номинальному при $I_b = I_{bн}$. Уменьшая момент от M_H до $M = 0$, фиксируем при $I_b = I_{bн}$ величины U, I_a, I_b, n .

Экспериментальные данные заносим в табл. 4. Далее уменьшаем величину добавочного сопротивления $R_{доб} = R_1$ и повторяем измерения. Результаты заносим в табл. 4.

Задание на аналитическое исследование

1. На основе опытных данных, приведенных в табл. 2, вычислить подводимую к двигателю и отдаваемую им мощность P_1 и P_2 и КПД. Нанести на график 1 зависимости n, I_H, P_1, M и КПД $f(P_2)$, отметив на нем значения n_H, I_H, M_H, η_H соответствующие номинальной мощности двигателя P_H и значение P_2 , при котором η двигателя достигает наибольшего значения. Определить ток якоря при холостом ходе I_{a0} .

2. На графике 2 на основе опытных данных, приведенных в табл. 3, строим две механические характеристики при $I_b = I_{bн}$ и $I_b \approx 0.8 \cdot I_{bн}$ и $R_{доб} = 0$

3. На основе данных, приведенных в табл. 2 и 4 на графике 3 строим механические характеристики $n=f(M)$ при $R_{доб} = 0; R_{доб} = R_1 + R_2; R_{доб} = R_1$

Вопросы для самопроверки

1. Объясните устройство и принцип действия двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.
2. Чему равна скорость холостого хода с независимым возбуждением?
3. Напишите уравнение механической характеристики и назовите способы регулирования скоростью изучаемого двигателя.
4. Назовите преимущества и недостатки регулирования скорости ДПТ магнитным потоком.
5. Какие факторы определяют допустимую перегрузку ДПТ?
6. Как осуществляется пуск ДПТ?
7. Как осуществляется реверс ДПТ?

Лабораторная работа 2.3. Испытание двигателя последовательного возбуждения

Эти двигатели имеют существенные преимущества в случае тяжелых условий пуска и изменения момента в широких пределах. Для них менее опасны перегрузки по моменту, поэтому они широко используются для электрической тяги (трамвай, метро, троллейбусы, электровозы и т.д.)

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией, методами пуска и регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением. Освоить методы испытаний и расчета рабочих и механических характеристик данного двигателя.

Краткие теоретические сведения

В двигателях последовательного возбуждения ток якоря одновременно является также током возбуждения $I_a = I_b$. Поэтому магнитный поток Φ_δ изменяется в широких пределах

$$\Phi_\delta = K_\phi \cdot I_a \quad (1)$$

Коэффициент K_ϕ в значительном диапазоне нагрузок при $I_a < I_H$ является практически постоянным, и лишь при $I_a > (0,8-0,9)I_H$ вследствие насыщения магнитной цепи машины K_ϕ начинает несколько уменьшаться (рис. 1).

Учитывая формулу (1), получим:

$$M = C \cdot \Phi_\delta \cdot I_a = c \cdot K_\phi \cdot I_a^2 \quad (2)$$

$$E_a = C \cdot \Phi_\delta \cdot \omega; \quad (3)$$

$$\omega = \frac{U}{c \cdot \Phi_\delta} - \frac{I_a \cdot R_a}{c \cdot \Phi_\delta} = \frac{U}{c \cdot \Phi_\delta} - \frac{M}{c^2 \cdot \Phi_\delta^2} \cdot R_a, \quad (4)$$

где R_a – сопротивление якоря;

C – конструктивная постоянная.

Скоростная характеристика двигателя (рис. 2) является мягкой и имеет гиперболический характер. При $K_\phi = \text{const}$ вид кривой показан штриховой линией.

При малых I_a скорость двигателя становится недопустимо большой. Поэтому работа двигателей последовательного возбуждения, за исключением микромашин, на холостом ходу не допускается.

Обычно минимально допустимая нагрузка $P_2 = (0,2 - 0,25)P_H$. Поскольку у двигателей параллельного возбуждения $M \sim I_a$, а у двигателей

последовательного возбуждения приблизительно $M \sim I_a^2$, и при пуске допускается $I_a = (1,5-2,0)I_H$, то двигатели последовательного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент по сравнению с двигателем параллельного возбуждения.

Зависимость магнитного потока от тока якоря

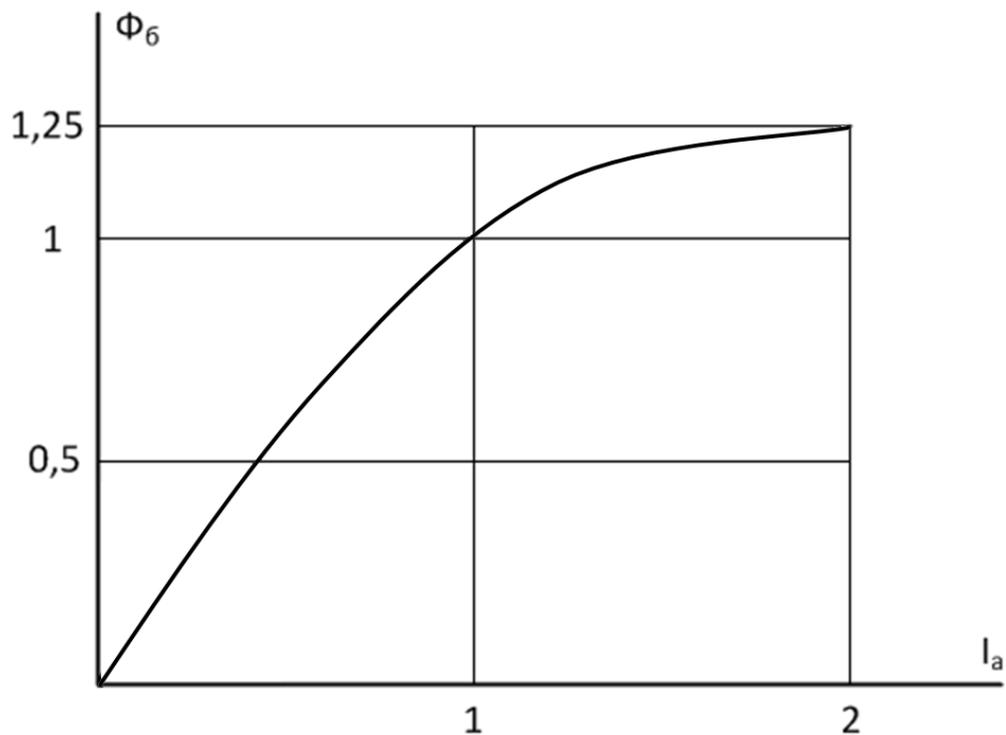


Рис. 1

Естественная скоростная характеристика

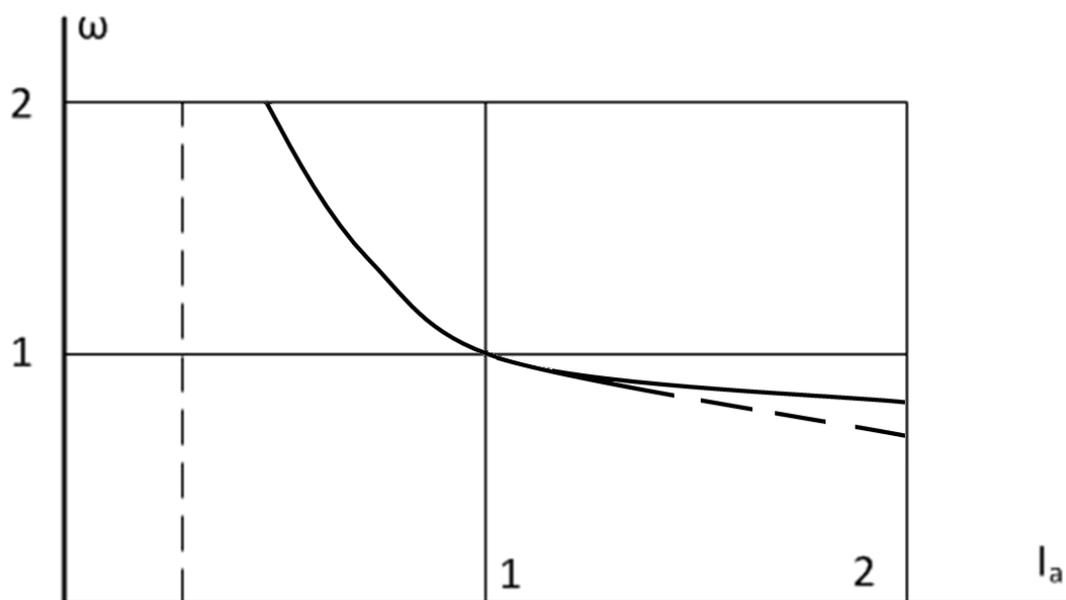


Рис. 2

Схемы регулирования скорости вращения двигателя

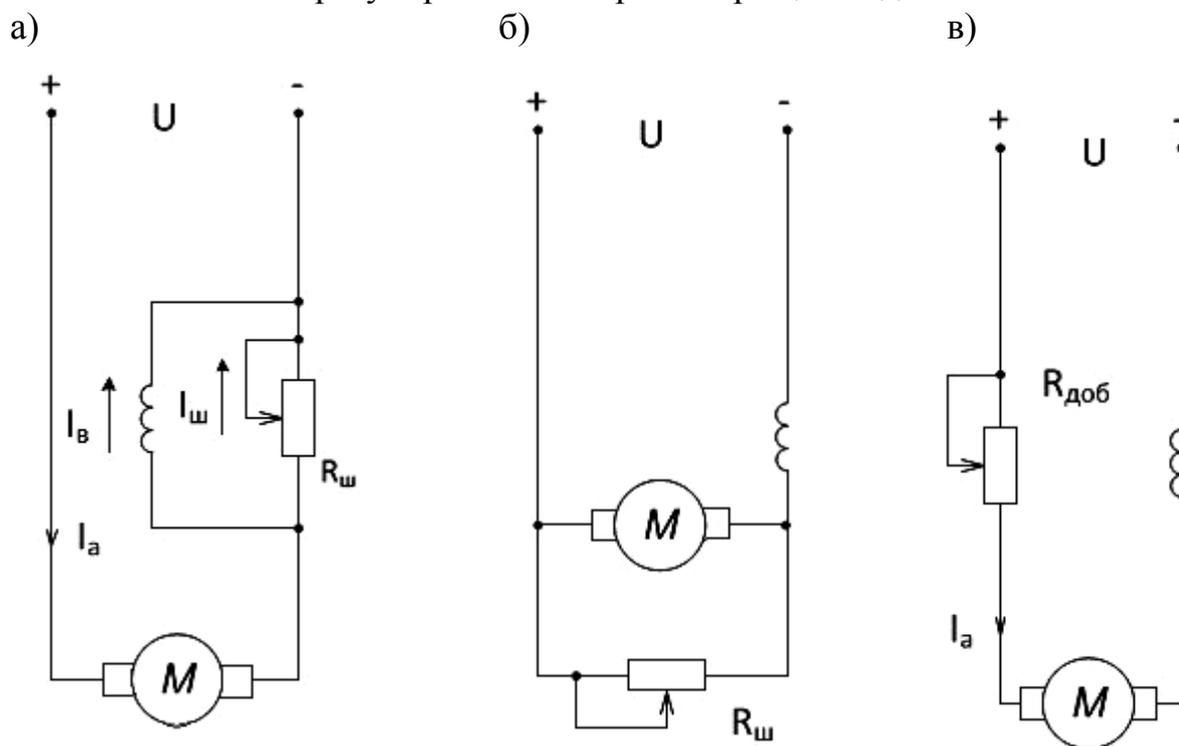


Рис. 3

Отметим, что при превышении скорости вращения двигатель последовательного возбуждения в режим генератора не переходит. На рис. 2 это отражено тем, что $\omega = f(I_a)$ оси ординат не пересекают. Для перевода двигателя последовательного возбуждения в режим генератора необходимо переключить концы обмотки возбуждения.

Регулирование частоты вращения двигателя осуществляется:

1) посредством ослабления поля. Это производится либо путем шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением (рис. 3а), либо уменьшением числа включенных в работу витков обмотки возбуждения. Т.к. сопротивление обмотки возбуждения R_B и падение напряжения малы, то $R_{ш}$ также должно быть мало;

2) регулирование скорости путем шунтирования якоря (рис. 3б). При шунтировании якоря ток и поток возбуждения возрастают, а скорость уменьшается. Шунтирование якоря эффективно только тогда, когда магнитная цепь не насыщена. В связи с этим шунтирование якоря на практике применяется редко;

3) регулирование скорости включением сопротивления в цепь якоря (рис. 3в). Этот способ позволяет регулировать ω вниз от номинального значения. Т.к. при этом значительно уменьшается КПД, то такой способ регулирования находит ограниченное применение;

4) регулирование скорости изменением напряжения. Этот способ широко применяется в транспортных установках. Как известно, работу двигателей характеризуют его рабочие характеристики P_1 , η , I_a , $M=f(P_2)$, где P_1 , P_2 — соответственно потребляемая из сети и отдаваемая двигателем мощности;

M – момент на валу двигателя. Расчет этих характеристик можно осуществить по формулам:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}; \quad P_2 = \omega \cdot m \quad (5)$$

$$P_1 = U_{\text{сети}} \cdot I_a; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

Описание лабораторной установки

Схема лабораторной установки показана на рис. 4 и на лабораторном стенде. Установка содержит исследуемый двигатель постоянного тока последовательного возбуждения (ЭДС) и электромагнитный тормоз (ТЭМ), посредством которого создается тормозной момент на валу ДПТ. Технические данные ДПТ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип	P_n , кВт	I_n , А	U_n , В	η	n_n , об/мин	R_a , Ом	R_{c1-c2} , Ом
П42–УХЛ4	2,2	13,1	220	0,77	1000	0,68	1,58

В состав установки входят:

пусковое реле (РП), работающее в функции против Э.Д.С., при достижении определенной ЭДС якоря, шунтирует пусковое сопротивление;

R_n сопротивление $R_{ш}$;

тахогенератор «п»;

цепь питания обмотки возбуждения ТЭМ, состоящая из контактора К1, ЛАТРа и выпрямителя;

электроизмерительные приборы.

Задание на экспериментальное исследование

1. На основе технических данных ДПТ подобрать необходимые измерительные приборы.

2. Согласно рис. 4 собрать схему установки. После проверки схемы преподавателем включить контактор К1. ЛАТРОм установить ток возбуждения ТЭМ не менее 1 А, что соответствует созданию на валу ДПТ необходимого минимального момента сопротивления. Посредством пускателя К2 подключаем ДПТ к сети постоянного тока.

Внимание! Если ДПТ во время пуска идет в разнос, то немедленно отключить контактор К2.

3. Снятие рабочих и естественной механической характеристик.

Изменяя ток возбуждения ТЭМ от максимального возможного значения до 1 А, снимем значения I_b ТЭМ, U, I_a, n, M . Результаты испытаний занесем в таблицу 2.

Схема лабораторной установки

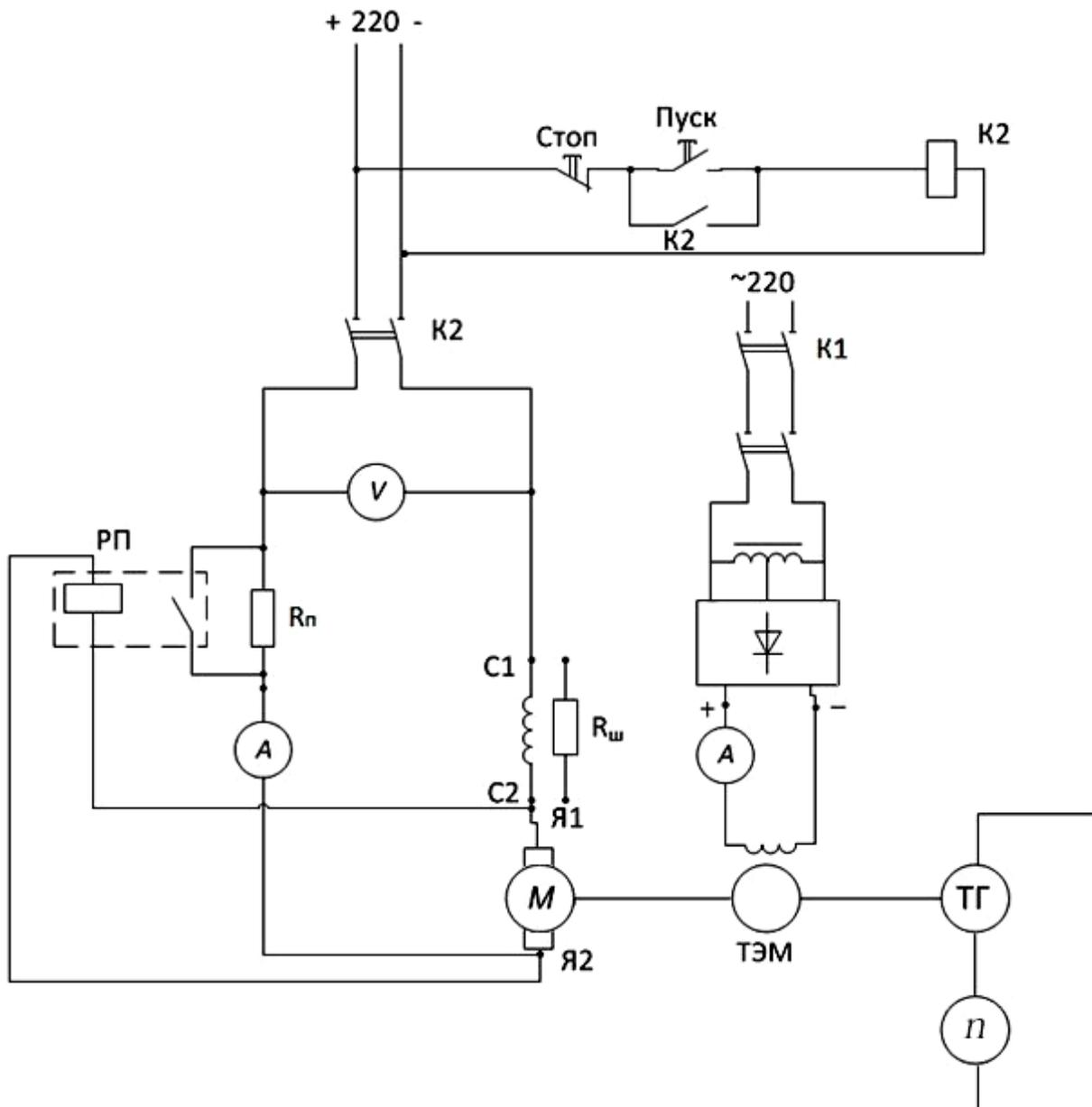


Рис. 4

Таблица 2

№	Опытные данные					Расчетные данные			
	$I_{втем}$	I_a, A	U, B	$N, \text{об/мин}$	$M, \text{Нм}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$\omega, \text{с}^{-1}$	η
1									
2									
3									
4									
5									

После снятия опытных данных отключаем лабораторную установку.

4. Снятие механических характеристик

4.1. При ослаблении магнитного поля. Подключаем параллельно к обмотке возбуждения шунтовое сопротивление $R_{ш}$. Проводим включение лабораторной установки в последовательности, указанной в п. 3, а далее в той последовательности снимаем опытные данные и заносим в табл. 3.

Таблица 3

№	Опытные данные					Расчетные данные
	$I_{втем}$	I_a, A	U, B	$N, \text{об/мин}$	$M, \text{Нм}$	$\omega, \text{с}^{-1}$
1						
2						
3						
4						
5						

4.2. Механическая характеристика ДПТ при включенном последовательно в цепь якоря $R_{доб} = R_{ш}$

При отключенной установке включить последовательно в цепь якоря добавочное сопротивление $R_{ш}$. Далее в последовательности, указанной в пункте 3, включить установку и снять опытные данные. Результаты занести в табл. 4.

Таблица 4

№	Опытные данные					Расчетные данные
	$I_{втем}$	I_a, A	U, B	$N, \text{об/мин}$	$M, \text{Нм}$	$\omega, \text{с}^{-1}$
1						
2						
3						
4						
5						

Задание на аналитическое исследование

1. На основе опытных данных (табл. 2) рассчитаем P_1, P_2 и ω . На графике 1 построим зависимости $n, P_1, \eta, I_a, M = f(P_2)$. На графике 2 строим механическую характеристику $\omega = f(M)$

На основе данных, приведенных в табл. 3 и 4, на графике 2 построить механические характеристики $\omega = f(M)$ работе ДПТ с ослабленным полем и при наличии в цепи якоря добавочного резистора.

Вопросы для самопроверки

1. Устройство двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.
2. Объяснить роль пускового реостата.
3. Почему с уменьшением нагрузки частота вращения двигателя с последовательным возбуждением значительно увеличивается?
4. От каких параметров зависит вращающий момент рассматриваемого двигателя?
5. Каким образом перевести двигатель с последовательным возбуждением в генераторный режим?
6. Назовите способы регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.
7. Указать область применения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.
8. Объяснить характер зависимости момента от тока у двигателей с последовательным возбуждением.

Лабораторная работа 2.4. Потери и КПД машин постоянного тока

При работе электрической машины часть потребляемой ею энергии теряется и рассеивается в виде тепла. Мощность потерянной энергии называют потерями мощности или потерями.

Цель работы

Ознакомиться с видами потерь в машинах постоянного тока, на основе экспериментального метода холостого хода двигателя определить КПД генератора постоянного тока параллельного возбуждения.

Краткие теоретические сведения

Рассматриваемые в данной работе вопросы большей частью являются общими для машин постоянного и переменного тока. Потери в электрических машинах подразделяются на основные и добавочные. Основные потери возникают в результате происходящих в машине основных электромагнитных и механических процессов, а добавочные потери обусловлены различными вторичными явлениями. Во вращающихся электрических машинах основные потери подразделяются на: механические, магнитные или потери в стали и электрические потери.

Механические потери $\Delta P_{\text{мех}}$ включают в себя потери в подшипниках, потери на трение щеток о коллектор или контактные кольца и вентиляционные потери.

Все виды механических потерь зависят от скорости вращения и не зависят от нагрузки.

Потери в стали $\Delta P_{\text{с}}$ состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи в зубцах и спинке якоря. Они зависят от величины магнитной индукции и скорости вращения машины и не зависят от нагрузки.

Следовательно при испытаниях электрических машин механические потери и потери в стали могут быть определены по данным опыта холостого хода, если его провести при соблюдении условий, что поток Φ_0 , ЭДС E_0 и обороты ротора n_0 будут равны соответственно номинальным значениям, т.е. $\Phi_0 = \Phi_{\text{н}}$; $E_0 = E_{\text{н}}$; $n_0 = n_{\text{н}}$. Таким образом, потери холостого хода ΔP_0 равны:

$$\Delta P_0 = \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{с}} = (U_a - I_a \cdot R_{\text{ам}} - 2 \cdot \Delta U_{\text{щ}}) \cdot I_a = E_a \cdot I_a, \quad (1)$$

где U_a – напряжение на зажимах генератора;

I_a – ток якоря;

$R_{\text{ам}}$ – сопротивление цепи якоря, приведенное в рабочей температуре, которая принимается равной 75°C для класса изоляции «В» согласно ГОСТ;

$\Delta U_{щ}$ – Падение напряжения в переходном сопротивлении для щеток одной полярности. Для упрощения расчетов $\Delta U_{щ}$ принимается постоянным и для угольных и графитных щеток равным 1 В;

E_a – Э.Д.С. якоря:

$$E_a = U_a - I_a \cdot R_{ам} - 2 \cdot \Delta U_{щ} \quad (2)$$

$$R_{ам} = R_a \cdot \frac{(235+75)}{235+t_0}, \quad (3)$$

где R_a – суммарное сопротивление цепи якоря, состоящей из обмоток якоря, добавочных полюсов и компенсационной обмотки;

t_0 – температура окружающей среды, °С

Электрические потери состоят из потерь в обмотках цепи якоря, потерь на возбуждение и потерь на переходном сопротивлении щеточных контактов. Электрические потери в обмотках цепи якоря можно найти из выражения

$$\Delta P_{э} = R_{ам} \cdot I_a^2 \quad (4)$$

К потерям на возбуждение относятся потери в обмотке возбуждения и потери в регулировочном реостате.

Потери в параллельной цепи возбуждения можно определить по формуле:

$$\Delta P_b = U_b \cdot I_b = U_n \cdot I_b, \quad (5)$$

где U_b – напряжение на зажимах цепи возбуждения;

I_b – ток возбуждения; E_r – ЭДС генератора

$$E_r = U_n + I_a \cdot R_{ам} + 2 \cdot \Delta U_{щ}, \quad (6)$$

где U_n – номинальное напряжение генератора.

Потери в переходном сопротивлении щеточных контактов для щеток обеих полярностей определяются по формуле;

$$\Delta P_{щ} = 2 \cdot \Delta U_{щ} \cdot I_a \quad (7)$$

Добавочные потери возникают в стали сердечника якоря вследствие искажения основного магнитного поля поперечной реакцией якоря, в коммутационных секциях из-за неравномерного распределения тока по сечению проводника, пульсаций магнитного поля в уравнительных соединениях и т.п.

Добавочные потери при нагрузке не равной номинальной определяются формуле

$$\Delta P_{доб} = 0.01 \cdot P_n \cdot \left(\frac{I_a}{I_n} \right)^2, \quad (8)$$

где I_n – номинальный ток якоря.

Полные потери в машине равны сумме всех потерь:

$$\Sigma P = \Delta P_0 + \Delta P_3 + \Delta P_b + \Delta P_{щ} + \Delta P_{доб} \quad (9)$$

Методы определения потерь и КПД вращающихся электрических машин регламентированы ГОСТ 25941–83.

До начала испытаний необходимо, чтобы машина проработала без нагрузки при номинальной частоте в течении 15 мин для машин мощностью 1 ... 10 кВт.

Потери и КПД электрических машин определяется непосредственным или косвенным методом. Метод непосредственного определения менее точен, поэтому его рекомендуют применять лишь для машин с КПД не более 85 %.

При определении КПД непосредственным методом одновременно определяются потребляемая (подводимая) мощность P_1 и полезная (отдаваемая) мощность P_2 . В этом случае КПД находят по формуле:

$$\eta = \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \cdot 100\% \quad (10)$$

Для непосредственного определения потерь и КПД используют следующие методы: метод измерения механической мощности, метод измерения электрической мощности и метод тарированной вспомогательной машины (3).

Косвенный метод определения потерь и КПД, называемый также методом отдельных потерь, основан на том, что опытным или расчетным путем находят отдельно каждый вид потерь, суммируют их, а КПД рассчитывают по формуле:

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P} \right) \cdot 100\% \quad (11)$$

Известны следующие методы косвенного определения потерь и КПД: метод взаимной нагрузки, метод динамометра или тарировочного двигателя, метод хх двигателя (ненагруженного двигателя) (3).

Метод холостого хода двигателя, являясь достаточно точным, чрезвычайно прост для выполнения, и поэтому весьма широко применяется. И по этому методу можно определить потери в стали и механические потери в машине, вращающейся в режиме ненагруженного двигателя. Остальные потери определяются расчетным путем.

Полезная мощность генератора определяется по формуле

$$P_2 = U_n \cdot (I_a - I_b) \quad (12)$$

Описание лабораторной установки

Схемы изображены на рис. 1,2. В табл. 1 приведены паспортные данные МПТ.

Таблица 1

Тип	P_n , кВт	U_n	I_n	n_n об/мин	η %	Класс изоляции
П51У-4	2,7	230	11,7	970	76	В

В состав установки входят: электроизмерительные приборы, авто-трансформатор и выпрямитель постоянного тока, пусковой реостат R_n с пусковым реле (РП) и реостат для регулирования тока возбуждения $R_b = 100 \text{ Ом}$.

Задание на экспериментальное исследование

1. На основе технических данных МПТ подобрать необходимые измерительные приборы,

2. Измерение сопротивления обмоток якорной цепи. Собрать схему по рис.1. Измерение осуществляется по методу вольтметра и амперметра. Для получения точных результатов измерения осуществляют для трёх различных положений якоря, причем показания приборов снимают для трёх различных значений тока якоря в каждом положении якоря. Ток якоря устанавливается в пределах от 1 до 2 А. Затем находят среднее арифметическое из полученных значений сопротивлений якоря R_a которое принимается за истинное. Приведение сопротивления к рабочей температуре осуществляют по формуле (2).

3. Определение КПД генератора методом холостого хода. Собрать схему по рис. 2. Генератор пускают в режиме двигателя на холостом ходу.

Примечание: пуск осуществлять медленным повышением подводимого напряжения до момента срабатывания пускового реле. Амперметр в цепи

якоря сначала устанавливается на предел 5 А, затем переключается на предел 2.5 А. Через 15 мин. после пуска двигателя изменяют подводимое напряжение U_a в пределах от номинального значения U_n до $1,1 U_n$. При этом скорость вращения якоря поддерживают постоянной путём изменения тока возбуждения. Показания приборов заносят в табл. 2.

Схема для измерения сопротивления якоря

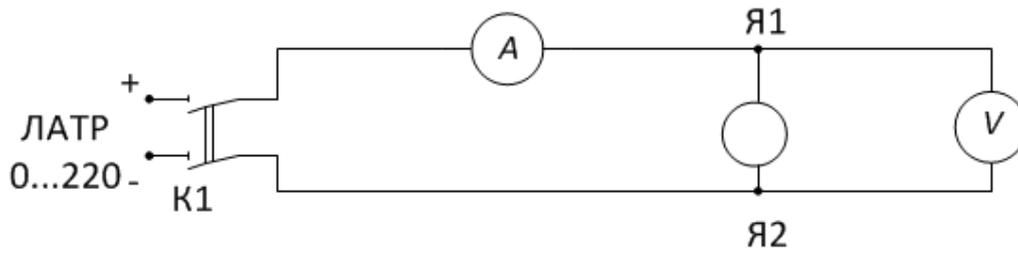


Рис. 1

Схема лабораторной установки

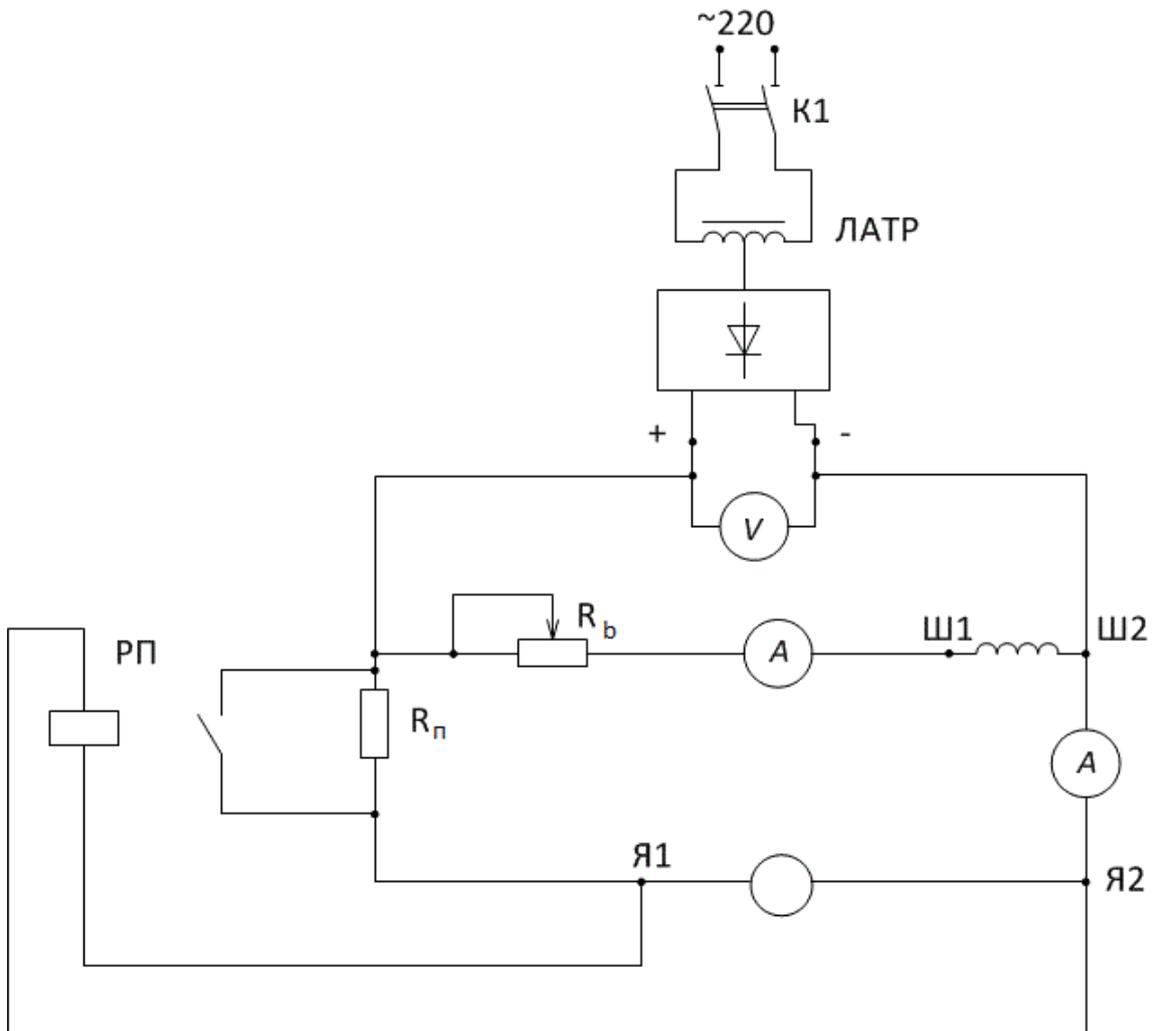


Рис.2

Таблица 2

№	Экспериментальные данные			Расчетные данные	
	$U_a, В$	$I_a, А$	$I_b, А$	$E_a, В$	$\Delta P_0, Вт$
1					
2					
3					
4					
5					

Задание на аналитическое исследование

1. По формулам (1) и (2) определить Э.Д.С. якоря и потери холостого хода и данные занести в табл.2. По этим данным построить зависимости:

$$\Delta P_0 = f(E_a) \text{ и } I_b = f(E_a)$$

2. Определить остальные потери расчетным путём. Для этого задаться различными значениями тока якоря в пределах от номинального тока возбуждения до $1.1 I_n$. Для каждого значения тока якоря определить отдельные виды потерь, суммарные потери и КПД, используя формулы п. 1 и построенные зависимости $\Delta P_0 = f(E_a)$ и $I_b = f(E_a)$, для определения значений I_b и ΔP_0 .

Данные расчета заносятся в таблица 3.

Таблица 3

№	I_a, A	E_r, B	I_b, A	ΔP_0 Вт	ΔP_ω Вт	$\Delta P_{\text{в}}$ Вт	$\Delta P_{\text{в}}$ Вт	$\Delta P_{\text{доб}}$ Вт	ΣP Вт	P_2 Вт	η %
1											
2											
3											
4											
5											

По данным таблицы 3 строят зависимость отдельных видов потерь и суммарных потерь в функции от P_2 на одном рисунке и $\eta = f(P_2)$ на другом.

Вопросы для самопроверки

1. Виды потерь в МПТ.
2. Потери холостого хода. От чего они зависят?
3. Электрические и добавочные потери.
4. Методы экспериментального определения КПД?
5. Сущность метода отдельных потерь?
6. Как осуществляется определение КПД по методу холостого хода двигателя?
7. Сущность метода тарировочного двигателя.

Лабораторная работа 2.5. Исследование электромашинного усилителя (ЭМУ) с поперечным полем

ЭМУ поперечного поля находят широкое применение в системах автоматики, а также как возбуждители либо под возбуждители мощных электродвигателей и генераторов постоянного тока, обладая высоким усилением и быстродействием.

Цель работы

Изучить конструкцию и принцип действия ЭМУ. Экспериментально снять характеристики холостого хода и внешние характеристики для режимов полной компенсации, недокомпенсации и перекомпенсации.

Краткие теоретические сведения

ЭМУ поперечного поля – это генератор постоянного тока. Отличительной его особенностью является то, что в нем используется магнитный поток, создаваемый током обмотки якоря (поперечный поток реакции якоря) для создания ЭДС на рабочих щетках. На коллектор накладываются две пары щеток: щетки поперечной оси, замкнутые накоротко, и щетки продольной оси (рабочие), к которым присоединяется нагрузка (рис. 1). В ЭМУ, на статоре обычно размещают несколько обмоток возбуждения ОУ, называемые обмотками управления, компенсационную обмотку ОК и обмотку дополнительных полюсов.

Коэффициентом усиления усилителя называется отношение выходной мощности $P_{\text{вых}}$ к входной мощности $P_{\text{вх}}$

$$K_y = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{U_a \cdot I_a}{U_y \cdot I_y} \quad (1)$$

Для увеличения коэффициента усиления по мощности и уменьшения мощности управления, ЭМУ исполняют с малым воздушным зазором и с ненасыщенной магнитной системой и рассчитывают по возможности наибольшую скорость вращения. Приводными двигателями ЭМУ являются электродвигатели постоянного тока или асинхронные электродвигатели с к.з. ротором. Обычно ЭМУ поперечного поля рассчитывают на частоту вращения 1500 и 3000 об/мин.

Принцип действия ЭМУ поперечного поля заключается в следующем: по обмотке возбуждения (управления) проходит небольшой по величине ток, который создает на продольной оси машины магнитный поток Φ_y , неподвижный в пространстве. В обмотке якоря при его вращении между щётками 1–1 этот поток индуцирует Э.Д.С. Так как щётки замкнуты накоротко, то даже небольшая ЭДС вызовет в обмотке якоря сравнительно большой ток I_1 . Этот ток, протекая по обмотке якоря и поперечной подмагничивающей обмотке (ПО), в свою очередь создает сильный магнитный поток поперечного поля реакции якоря Φ_1 . В нормальных машинах постоянного тока этот поток оказывает вредное влияние на работу маши-

ны, а в ЭМУ поперечного поля этот поток используется как полезный поток возбуждения для второй ступени усиления.

Схема ЭМУ поперечного поля

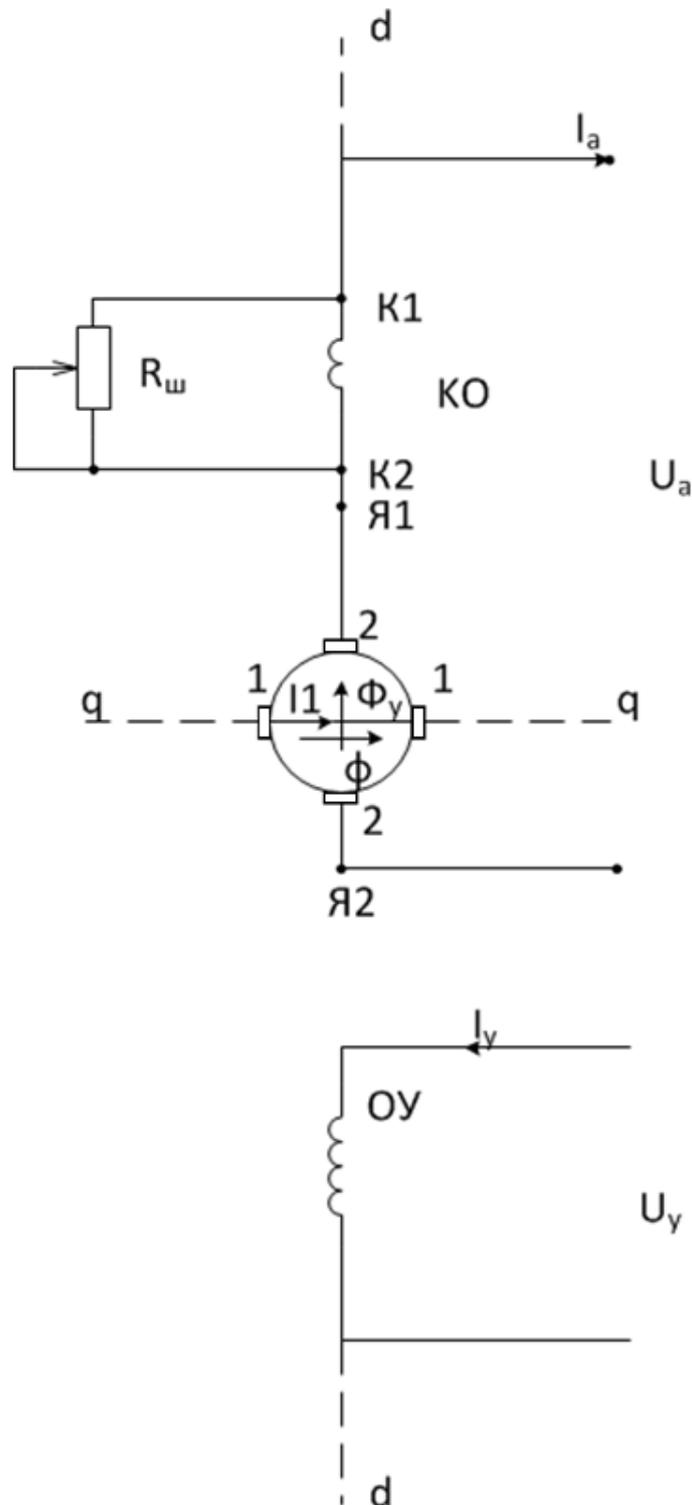


Рис. 1

Магнитный поток Φ_1 обуславливает возникновение во вращающемся якоре значительной по величине ЭДС, снимаемой со щёток 2–2. При прохождении тока нагрузки I_a возникает нежелательное продольное поле ре-

акции якоря, которое размагничивает машину. Чтобы избежать этого, необходимо скомпенсировать этот поток реакции якоря. С этой целью на статоре ЭМУ укладывается компенсационная обмотка КП, которая включается таким образом, чтобы при прохождении через неё тока создавалась магнитодвижущая сила (МДС), компенсирующая продольный поток реакции якоря. Этим устраняется воздействие магнитного потока, создаваемого током нагрузки на поток обмотки управления при работе ЭМУ под нагрузкой. Величина МДС компенсационной обмотки регулируется при помощи сопротивления R_{ω} , включенного параллельно этой обмотке. Изменяя величину этого сопротивления, мы тем самым изменяем величину тока компенсационной обмотки. Так, увеличивая сопротивление R_{ω} , получаем избыточную МДС и ЭМУ окажется в режиме перекомпенсации, т.е. напряжение на рабочих щетках при увеличении нагрузки будет увеличиваться. При уменьшении этого сопротивления большая часть тока пройдет через него, минуя компенсационную обмотку, и ЭМУ будет работать в режиме недокомпенсации (напряжение на выходе ЭМУ будет уменьшаться с увеличением тока нагрузки). Можно подобрать такое сопротивление R_{ω} , что напряжение на рабочих щётках ЭМУ останется постоянным при $n = \text{const}$ и $I_a \neq 0$. Этот режим называется полной компенсацией.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 2) состоит из ЭМУ с приводом от асинхронного двигателя. В табл. 1 приведены технические данные ЭМУ

Таблица 1

Т и п	Усилитель				Двигатель		
	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	R_{oy} , Ом	P_n , кВт	n_n , об/мин	U_n , В
ЭМУ-3А	0,2	115	1,75	1000	0,47	2850	220/ 380

Для регулирования тока, протекающего через компенсационную обмотку, используют реостат R_{ω} . Сопротивление нагрузки подбирается так, чтобы ток нагрузки можно было менять от нуля до I_n . Питание обмотки осуществляется от ЛАТора и выпрямителя 0...42 В.

Задание на экспериментальное исследование

1. Перед сборкой схемы ознакомиться с техническими данными ЭМУ и подобрать необходимые для испытаний электроизмерительные приборы. Определить необходимое сопротивление нагрузки.

2. Собрать схему на рис. 2. Переключатель S4 установить в положение «ТЭМ», а S5 в положение ПУСК.

3. Снять характеристику холостого хода ЭМУ при $n = n_n$. Для этого переключатель S1 должен быть разомкнут. ЭМУ приводится в движение с $n = n_n$, подключая к сети асинхронный двигатель. Отмечают ЭДС на вы-

ходе ЭМУ при токе управления $I_y = 0$. Затем подключают обмотку управления к источнику постоянного тока и с помощью ЛАТРа меняют ток обмотки управления I_y . При этом ЭДС на выходе ЭМУ E_a не должна превышать U_H более чем на 10–15%. Показания приборов записывают в табл. 2.

Схема лабораторной установки

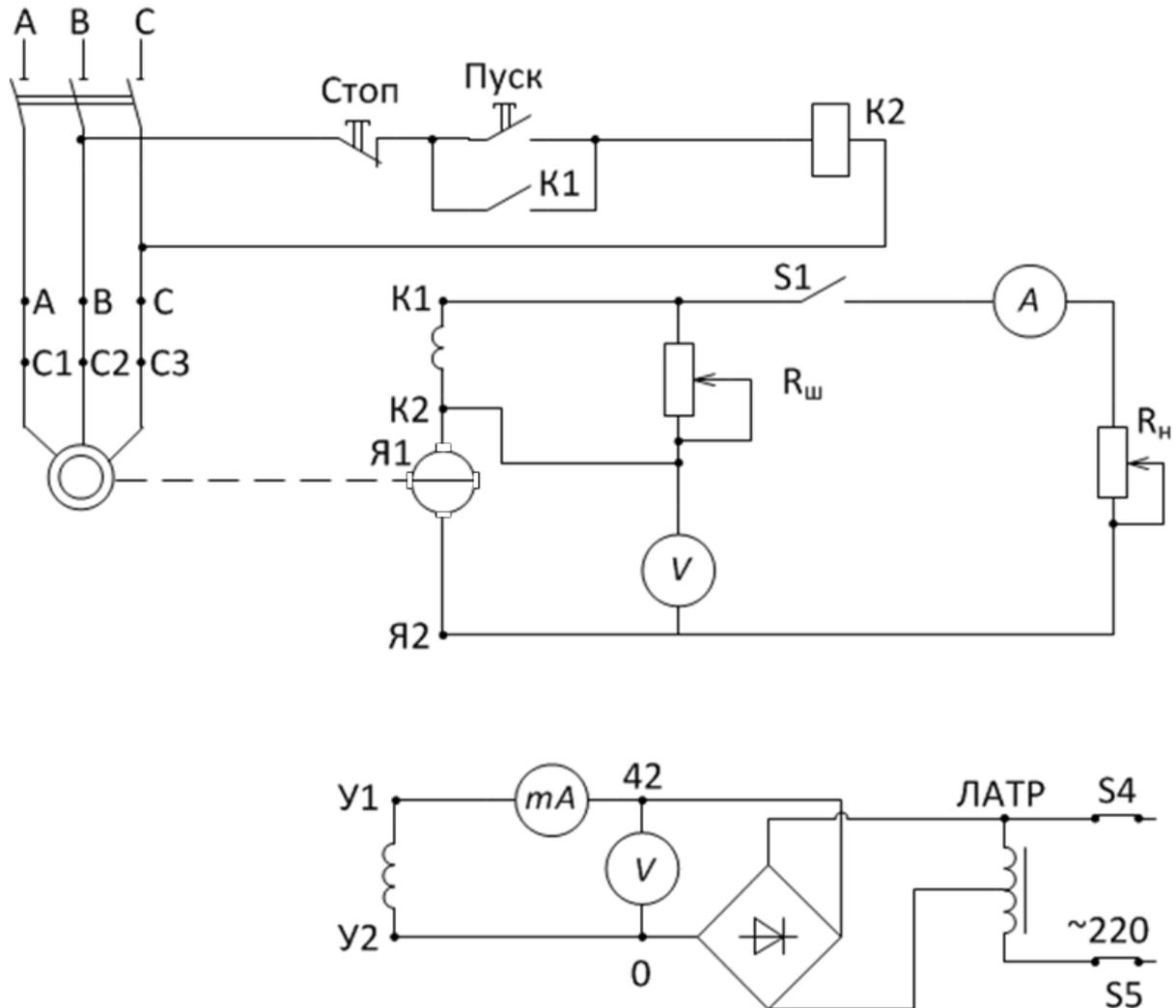


Рис. 2

Таблица 2

$E_a, \text{В}$							
$I_y, \text{А}$	0						

4. Внешние характеристики. Для снятия внешних характеристик устанавливают $E_a = U_H$ при токе нагрузки $I_a = 0$ и $n = n_H$. Затем постепенно увеличивают нагрузку, меняя R_H .

Подбирая различные значения сопротивления R_ω , снимают внешние характеристики для ЭМУ в режимах полной компенсации, недокомпенсации и перекомпенсации. Данные опытов заносят в табл. 3.

Таблица 3

№	Режим работы					
	Полная компенсация		Недокомпенсация		Перекомпенсация	
	$U_a, В$	$I_a, А$	$U_a, В$	$I_a, А$	$U_a, В$	$I_a, А$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

Необходимо записать показания амперметра и вольтметра в цепи управления.

Задание на аналитическое исследование

1. По данным табл. 2 строится характеристика холостого хода $E_a = f(I_y)$

2. По данным табл. 3 строятся внешние характеристики $U_a = f(I_a)$ для режимов полной компенсации, недокомпенсации и перекомпенсации на одном рисунке.

3. Построить зависимость коэффициента усиления от мощности на выходе ЭМУ. Данные для вычисления берутся из табл.3 и сводятся в табл.4.

Таблица 4

№	Режим работы ЭМУ					
	Компенсация		Недокомпенсация		Перекомпенсация	
	$P_{\text{вых}}, Вт$	K_y	$P_{\text{вых}}, Вт$	K_y	$P_{\text{вых}}, Вт$	K_y
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

По данным табл. 4 отруются зависимости $K_y = f(P_{\text{вых}})$

Вопросы для самопроверки

1. Устройство и принцип действия ЭМУ с поперечным полем.
2. Достоинства и недостатки ЭМУ с поперечным полем.
3. Применение ЭМУ.

4. Назначение компенсационной обмотки.
5. Режимы работы ЭМУ.
6. Одноступенчатые ЭМУ с независимым возбуждением.
7. Двухмашинные ЭМУ.
8. От чего зависит быстродействие ЭМУ.

Лабораторная работа 2.6. Испытание двухобмоточного однофазного трансформатора

Цель работы

Освоить методы испытаний трансформатора, рассчитать параметры и построить ряд характеристик трансформатора.

Сведения из теории

В силовых электрических сетях широко используются однофазные двухобмоточные трансформаторы. Исследование этого простого по устройству трансформатора позволяет в основном понять физику процессов, происходящих в трансформаторах, измерить их параметры и характеристики.

При исследовании электромагнитных процессов в магнитосвязанных цепях с большим удобством для расчетов используют метод электрических схем замещения, при котором магнитные связи между цепями заменяются электрическими (рис. 1). Для этого вместо реального трансформатора рассматривают эквивалентный ему так называемый приведенный трансформатор, первичные и вторичные обмотки которого имеют одинаковое число витков $w_1 = w_2$

При этом число витков вторичной обмотки изменится $K = \frac{w_1}{w_2}$ раз. В результате такой замены или приведения, параметры вторичной обмотки трансформатора также изменятся

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= U_2 \cdot K \\ \dot{E}_2 &= E_2 \cdot K \\ \dot{I}_2 &= \frac{I_2}{K} \\ \dot{r}_2 &= r_2 \cdot K^2 \\ \dot{X}_2 &= X_2 \cdot K^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Рабочие процессы в трансформаторах описываются с учетом рис. 1 следующими уравнениями

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot (r_1 + jX_1) \quad (2)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \cdot (\dot{r}_2 + j\dot{X}_2) \quad (3)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2) \quad (4)$$

где: \dot{U}_1 – подводимое к первичной обмотке трансформатора напряжение;

\dot{E}_1 – Э.Д.С., наведенная в первичной обмотке основным магнитным потоком трансформатора;

\dot{U}_2, \dot{E}_2 – соответственно напряжение и Э.Д.С. наведенной вторичной обмотки;

- I_1 – первичный ток;
- I_2 – приведенный вторичный ток;
- I_M – намагничивающий ток;
- r, X_1 – соответственно активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеивания первичной обмотки;
- r'_2, X'_2 – приведенное активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеивания вторичной обмотки;
- r_m, X_m – активное и индуктивное сопротивления намагничивающей цепи схемы замещения трансформатора;
- Z'_H – приведенное полное сопротивление нагрузки.

Электрическая схема трансформатора

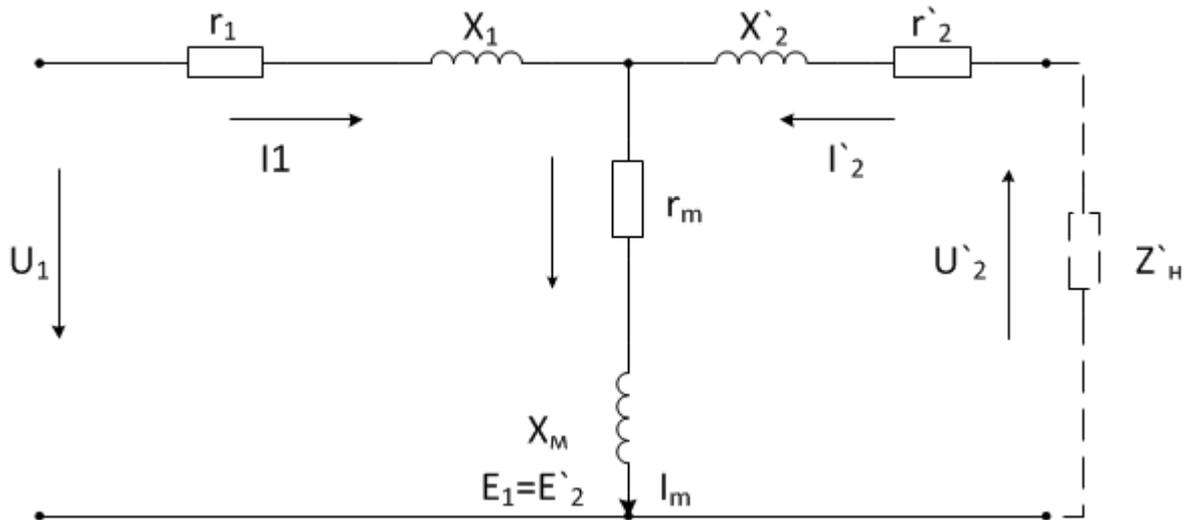


Рис. 1

Опытное определение параметров схемы замещения, параметров и характеристик трансформатора осуществляют по данным опыта холостого хода, короткого замыкания и исследования работы трансформатора под нагрузкой.

Опыт холостого хода

Опыт проводят по схеме, показанной на рис. 2а. Синусоидальное напряжение подводится к вторичной обмотке трансформатора, а первичная обмотка разомкнута.

Измеряется вторичное $U_0 = U_{20}$ и первичное U_{10} напряжения, ток холостого хода $I_0 = I_2$ и мощность $P_0 = P_2$. По данным опыта холостого хода определяют

$$P_{\text{мг}} = P_0 - I_0^2 \cdot r_2$$

$$r_m = \frac{P_{\text{мг}}}{\left(\frac{I_2}{K}\right)^2}$$

$$Z_M = \left(\frac{U_{20}}{I_0} \right) \cdot K \tag{5}$$

$$K = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}$$

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{U_0 \cdot I_0}$$

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - r_M^2}$$

где $P_{\text{МГ}}$ – магнитные потери в сердечнике трансформатора.

Схема лабораторной установки

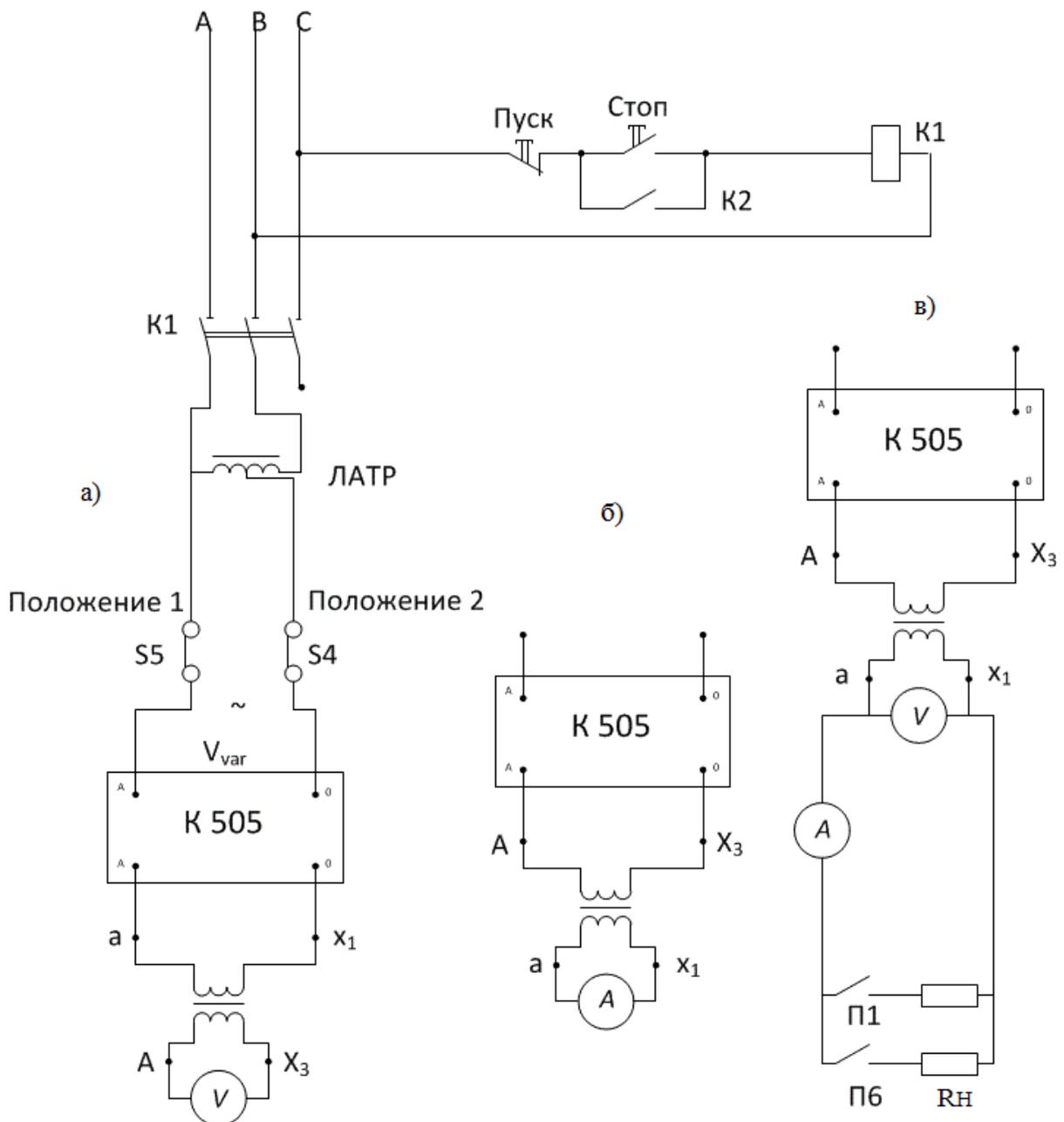


Рис. 2

Опыт короткого замыкания (рис. 2б)

Вторичная обмотка замыкается на амперметр или накоротко, а к первичной обмотке по избежание перегрева и повреждения трансформатора подводится пониженное напряжение с таким расчетом, чтобы ток находился в пределах номинального. По данным этого опыта определяют:

$U_{\text{к}}$, мощность короткого замыкания $P_{\text{к}}$ и параметры схемы замещения X_1 и X_2 , r_1 и r_2 (рис. 1), коэффициент мощности при к.з. $\cos \phi_{\text{к}}$

$$\begin{aligned}Z_{\text{к}} &= \frac{U_{\text{к}}}{I_{\text{к}}} \\r_{\text{к}} &= \frac{P_{\text{к}}}{I_{\text{к}}^2} \\X_{\text{к}} &= \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2} \\ \cos \phi_{\text{к}} &= \frac{P_{\text{к}}}{U_{\text{к}} * I_{\text{к}}} \\r_1 = r_2 &= \frac{r_{\text{к}}}{2} \\X_1 - X_2 &= \frac{X_{\text{к}}}{2}\end{aligned}\tag{6}$$

Напряжение и $U_{\text{к}} = U_{\text{кн}}$ котором ток короткого замыкания равен номинальному: $I_{\text{к}} = I_{\text{н}}$ носит название напряжения короткого замыкания и обозначается $U_{\text{к}}$. Величина $U_{\text{к}}$ выражается на практике также в процентах:

$$U_{\text{к}} \% = \frac{U_{\text{кн}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%\tag{7}$$

Работа трансформатора под нагрузкой (рис. 2в)

Этот опыт проводится, как правило, при $U_1 = U_{1\text{н}}$ при изменении тока нагрузки от 0 до $1,1 * I_{1\text{н}}$ основании этого режима определяют изменение напряжениями ΔU и КПД трансформатора.

Изменением напряжения трансформатора называется арифметическая разность между вторичными напряжениями трансформатора при холостом ходе и при номинальном токе нагрузки, когда первичное напряжение постоянно и равно номинальному, а частота также постоянная равна номинальной.

Изменение напряжения представляет собой важную эксплуатационную характеристику трансформатора. С целью более высокой точности вычисления ΔU производят аналитически по формуле (8). Обычно вычисляют в процентах.

$$\Delta U\% = U_{ka}\% \cdot \cos\phi_2 + U_{kr}\% \cdot \sin\phi_2$$

$$U_{ka}\% = \frac{I_1 \cdot r_k}{U_{1H}} \cdot 100\% \quad (8)$$

$$U_{kr}\% = \frac{I_1 \cdot X_k}{U_{1H}} \cdot 100\%$$

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_0 + K_{HГ}^2 \cdot P_k}{K_{HГ} \cdot S_H \cdot \cos\phi_2 + P_0 + K_{HГ}^2 \cdot P_k} \right) \quad (9)$$

P_0 – потери холостого хода при $U_1 = U_{1H}$
 P_k – мощность короткого замыкания ($P_k = P_{кн}$)
 $K_{HГ}$ – коэффициент нагрузки трансформатора.

Описание лабораторной установки

Схема изображена на рис. 2 и на стенде. Она содержит исследуемый трансформатор (табл. 1).

Паспортные данные трансформатора

Таблица 1

Тип	S_H ВА	U_{1H} , В			U_{2H} , В		f, Гц	Примечание
		AX1	AX2	AX3	ax1	ax2		
ОСВМ- 0,25- 740M5	250	231	226	220	133	115	50	

В качестве нагрузки, подключаемой к трансформатору посредством переключателей П1–П6 используются нагрузочные сопротивления R_H . В состав установки входят также: измерительный комплект К505, амперметр, вольтметр, автотрансформатор – ЛАТР переключатели S4 и S5 для коммутации цепи питания трансформатора.

Задания на экспериментальное и аналитическое исследования

1. Опыт холостого хода. Согласно рис. 2а собрать схему для проведения этого опыта. Переключатели S4 установить в положение 2, S5 в положение 1. Посредством пускателя К1 подключаем схему к сети переменного тока.

Изменять подводимое напряжение $U_0 \approx 0.3 \cdot U_{2H}$ до $U_0 \approx 1.1 \cdot U_{2H}$. Измерить вторичное $U_0 = U_{20}$ первичное U_{10} напряжения, ток холостого хода $I_0 = I_2$ подводимую мощность $P_0 = P_2$. Результаты измерений свести в табл. 2.

Таблица 2

Опытные данные	$U_{20}, \text{ В}$					
	$U_{10}, \text{ В}$					
	$I_0, \text{ А}$					
	$P_0, \text{ Вт}$					
Расчетные данные	$\cos(\varphi_0)$					
	K					

Вычислить: коэффициент трансформации K и коэффициент мощности холостого хода $\cos \phi_0$ для всех опытных точек.

Нанести на график 1: $P_0, I_0, \cos \phi_0 = f(U_{20})$. По характеристикам холостого хода (график 1) устанавливаются значения $P_{0н}, I_{0н}, \cos \phi_{0н}$ для $U_{20} = U_2$

2. Опыт короткого замыкания. Собрать схему рис. 2б. Вторичная цепь трансформатора должна быть разомкнута. Подобрать соответствующие приборы и установить переключатели вольтметра и амперметра К505 в необходимые положения. Ручку ЛАТРа установить в крайнее левое положение. Подключить схему к электрической сети и убедиться, что первичную обмотку трансформатора подается напряжение, близкое к нулю. Отключить схему, замкнуть вторичную обмотку трансформатора (рис. 2б).

Изменять подводимое напряжение $U_k = U_1$ так, чтобы ток короткого замыкания изменялся в пределах $I_k = I_1 \approx (0.5 - 1.5) \cdot I_{1н}$.

Измерить подводенное напряжение $U_k = U_1$ первичный ток $I_k = I_1$ и подводимую мощность $P_k - P_1$ вторичный ток I_2 . Результаты занести в табл. 3. Опыты следует проводить быстро, ограничиваясь тремя – четырьмя отсчетами.

Таблица 3

Опытные данные	$U_k, \text{ В}$				
	$I_k, \text{ А}$				
	$P_k, \text{ Вт}$				
	$I_2, \text{ А}$				
Расчетные данные	$\cos(\phi_k)$				
	$Z_k, \text{ Ом}$				
	$r_k, \text{ Ом}$				
	$X_k, \text{ Ом}$				

Вычислить $\cos \phi_k$ и параметры схемы замещения Z_k, r_k и X_k – Нанести на график 2: $P_k, I_k, \cos \phi_k = f(U_k)$ характеристикам короткого замыкания определить номинальные значения $P_{кн}, \cos \phi_{кн}, U_k$ соответствующие номинальному значению тока $I_{1н}$.

3. Работа трансформатора под нагрузкой. Собрать схему, приведенную на рис. 2в. Установить и поддерживать в течение опыта $U_1 = U_{1н}$

Изменять нагрузку трансформатора посредством подключения переключателями П1–П6 нагрузочных сопротивлений R_n таким образом, чтобы ток нагрузки менялся в пределах от $I_2 = 0$ до $I_2 \approx 1.1 \cdot I_{2н}$

Измерить подводимые напряжения U_1 мощность P_1 и ток I_1 ток I_2 и напряжение U_2 нагрузки. Результаты опытов занести в табл. 4.

Таблица 4

Опытные данные	$U_1, В$						
	$I_1, А$						
	$P_1, Вт$						
	$U_2, В$						
	$I_2, А$						
Расчетные данные	$\Delta U\% = \frac{(U_{20} - U_2)}{U_{20}} \cdot 100\% .$						
	$\Delta U\%$ по формуле 8						

Дополнительные требования к содержанию отчета

1. По данным опыта холостого хода и короткого замыкания, снятых соответственно при номинальном напряжении и номинальном токе рассчитать параметры Т-образной схемы замещения трансформатора (рис. 1).

2. По данным, полученным из работы трансформатора под нагрузкой и опыта короткого замыкания, по формулам (8) рассчитать $\Delta U\%$, а полученные результаты привести в табл. 4. На графике 3 построить опытную и расчетную зависимости $\Delta U = f\left(\frac{I_1}{I_n}\right)$ при $\cos \phi_2 = 1$.

3. Определить КПД трансформатора для значений:

$K_{нг} = 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25$ при двух значениях $\cos \phi_2 = 0.8$ и 1 . Нанести на график 4 зависимости $\eta = f(K_{нг})$ при $\cos \phi_2 = 1$ и $\cos \phi_2 = 0.8$. Определить степень нагрузки трансформатора, при котором достигается наибольший КПД.

Вопросы для самопроверки

1. Объяснить устройство и принцип действия трансформатора.
2. Дать расшифровку типа и паспортных данных исследуемого трансформатора.
3. Какие параметры определяются из опыта холостого хода.
4. Можно ли трансформатор, рассчитанный на 220 В включать в режиме холостого хода на напряжение 380 В?
5. Чем объясняется малая величина тока холостого хода трансформатора?
6. С какой целью проводится опыт короткого замыкания?
7. Можно ли включать трансформатор на постоянное напряжение?

8. Каким образом характер нагрузки $\cos \phi_2$ влияет на характер зависимости $\Delta U = f(I_2)$ и $\eta = f(K_{нr})$?

9. Почему измерение коэффициента трансформации должно производиться с высокой точностью?

10. На какие параметры трансформатора влияет качество сборки сердечника?

11. Почему, без нагрузки трансформатор работает бесшумно, а под нагрузкой «гудит»?

Лабораторная работа 2.7. Исследование способов соединения обмоток трансформатора

В практике эксплуатации трансформаторов важно знать схемы соединения обмоток и взаимное направление ЭДС в них. Особенно важно это при параллельной работе трансформаторов, которая возможна только лишь при строго определенном соединении их обмоток.

Данная лабораторная работа посвящена изучению возможных схем и групп соединения обмоток.

Цель работы

Изучить методы экспериментального определения обмоток высшего ВН и низшего НН напряжений, начал и концов обмоток и обмоток, находящихся на одном стержне. Ознакомиться со схемами соединения обмоток ВН и НН и получить практические навыки по определению групп соединения трехфазных трансформаторов.

1. Сведения из теории

1.1 Схемы соединения обмоток

Для силовых трансформаторов согласно ГОСТ 11667–35 установлены стандартные обозначения начал и концов обмоток и их ответвлений.

В трехфазном трансформаторе начала и концы обмоток ВН обозначают соответственно А, В, С и Х, Y, Z начала и концы обмоток НН – а, в, с и х, у, z. Чередование фаз А, В, С принято считать слева направо, если смотреть на трансформатор со стороны отводов ВН.

Если обмотка ВН имеет регулировочные ответвления, то их обозначают теми же буквами, что начало и конец обмотки, но с цифровыми индексами 1, 2, 3 и т.д. (см., например, паспортные данные исследуемого трансформатора).

В трехфазных трансформаторах обмотки могут быть соединены по схемам «звезда», «треугольник» или «зигзаг», которые обозначают буквами У, Д, Z. При выводе нейтрали ее обозначают буквой О. В обозначении схем добавляют индекс «н» (Y_n, Z_n).

Трехфазные силовые двух обмоточные трансформаторы выполняются со следующими схемами соединения обмоток: $\frac{Y}{Y_n}, \frac{Y}{D}, \frac{Y}{Z}, \frac{D}{D_n}, \frac{D}{Z_n}, \frac{Z}{Z_n}, \frac{Z}{Y_n}, \frac{Z}{D_n}$.

1.2. Понятия начала и конца обмотки и группы соединения

1.2.1. Однофазный трансформатор

Понятие начала и конца обмоток условно, но при соединении обмоток введение его является совершенно необходимым.

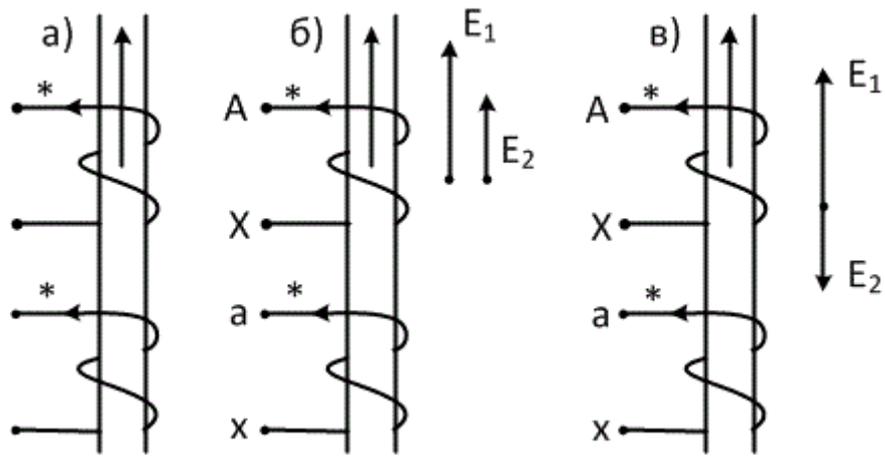


Рис.1

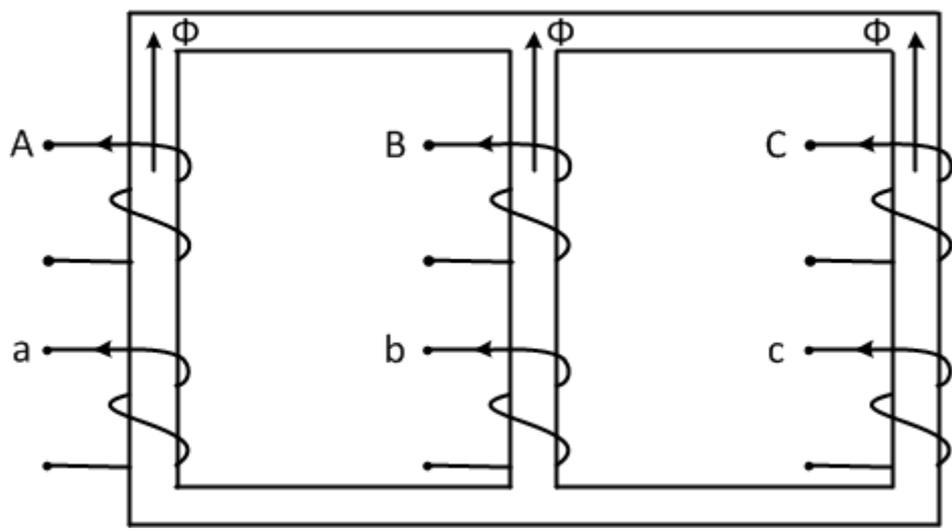


Рис. 2

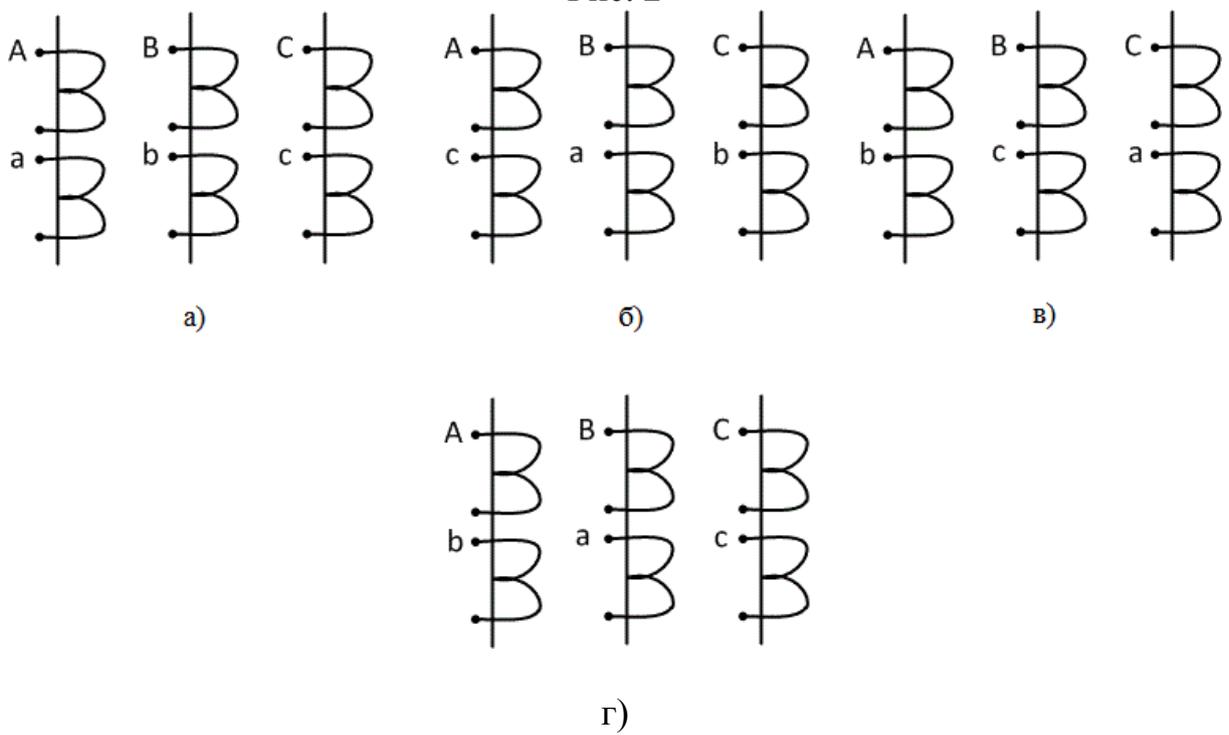


Рис.3.

Не следует путать понятие одноименных зажимов, введенное в курсе ТОЭ, и понятие начала и конца обмоток. Рассмотрим рис. 1, где показаны две обмотки, расположенные на одном стержне, которые пронизываются одним и тем же потоком w . Одноименные зажимы обозначены на рис. 1 точками. Начала и концы обмоток у однофазного трансформатора можно выбрать произвольным образом, как указано, например, на рис. 1б, в.

На рис. 1в начала обмоток ВН и НН совпадают с одноименными зажимами, поэтому ЭДС E_1 и E_2 , индуцируемые в обмотках 1 и 2 будут одинаково направлены относительно начал обмотки, следовательно, совпадают по фазе (рис. 1б). Если же у одной из обмоток, например, у второй, изменить обозначение начала и конца на обратное (рис. 1в), то направление наведенной ЭДС E_2 по отношению к выводам обмотки изменится на противоположное E_1 и E_2 будут сдвинуты по фазе на 180° (см. рис. 1в).

Для характеристики относительного сдвига фаз линейных ЭДС обмоток ВН и НН вводится понятие группы соединения обмоток трансформатора. Группа соединений равна

$$\text{группа} = \psi_\pi / 30^\circ, \quad (1)$$

где ψ_π – угол сдвига в градусах между линейными ЭДС на одноименных выводах обмоток ВН и НН, отсчитываемый от вектора ЭДС обмотки ВН по направлению часовой стрелки.

Так как в однофазных трансформаторах

$$E_\pi = E_\phi, \quad (2)$$

то для них возможны две группы соединений:

группа 0 при $\psi_\pi = 0$ (рис. 1б);

группа 6 при $\psi_\pi = 180^\circ$ (рис. 1в).

1.2.2. Трехфазный трансформатор

В трехфазном трансформаторе нельзя произвольно выбирать начала и концы обмоток отдельно для каждой фазы. При одинаковом направлении потока в стержнях как на рис. 2 необходимо, чтобы ЭДС были одновременно в каждой фазе. ВН или НН направлены к началам, либо к концам обмоток, ЭДС индуцируемые в обмотках, находящихся на одном стержне, при этом будут как и для однофазного трансформатора совпадать по фазе, либо иметь сдвиг 180° .

В трехфазном трансформаторе группа соединения зависит:

от схемы соединения обмоток;

от выбора начал и концов обмоток;

от того, на каком стержне находятся обмотки, принадлежащие фазам А, В, С.

Смысл последнего утверждения заключается в том, что на каждом стержне магнитопровода могут размещаться не только одноименные фазы, как, например, на рис. 2 и 3а, но и разноименные (см. рис. 3б, в).

При изменении названия фаз обязательно должен соблюдаться порядок их чередования (недопустимо чередование фаз, указанное на рис. 3г).

В трехфазных трансформаторах схемы соединения Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z могут образовывать четные группы 0, 2, 4, 6, 8, 10, а схемы Y/Δ, Δ/Y, Y/Z – нечетные группы I, 3, 5, 7, 9, II/I

Стандартизированы согласно ГОСТу 11677–00 только две группы: 0, II (см. рис. 4а, б).

Все остальные группы могут быть получены из основных путем перемаркировки начал обмотки НН, либо путем перемаркировки фаз обмотки ЯП., например, группу 6 можно получить из нулевой, а группу 5 из II, если перемаркировать начала всех обмоток НН (рис. 5).

Рассмотрим подход, как определить маркировку зажимов для заданной группы при известной схеме соединений. В качестве примера рассмотрим группу 2 для схемы УУ. Для второй группы из (I) следует, что $\psi_{\pi} = 60^\circ$.

Нарисуем векторную диаграмму так, чтобы угол сдвига между линейными ЭДС на одноименных выводах ВН и НН был равен 60° (рис. 6).

Ищем теперь пары коллинеарных векторов фазных ЭДС. Ими на рис. 6 являются E_a и E_b , E_b и E_c , E_c и E_a

Так как вектора ЭДС могут быть коллинеарными только для обмоток, находящихся на одном стержне, то, следовательно, на стержне, где находится обмотка ВН фазы А должна размещаться обмотка НН фазы В. Для других стержней соответственно В и С, С и А. Так как все коллинеарные фазные ЭДС противоположно направлены, то маркировку зажимов обмоток НН следует выполнить в соответствии с рис. 1в. Учитывая все изложенное, на рис. 4–7 приведена схема соединения и обозначения выводов обмоток.

На практике для определения группы соединения часто пользуются не формулой (1), а стрелочными часами (1), (2), (8).

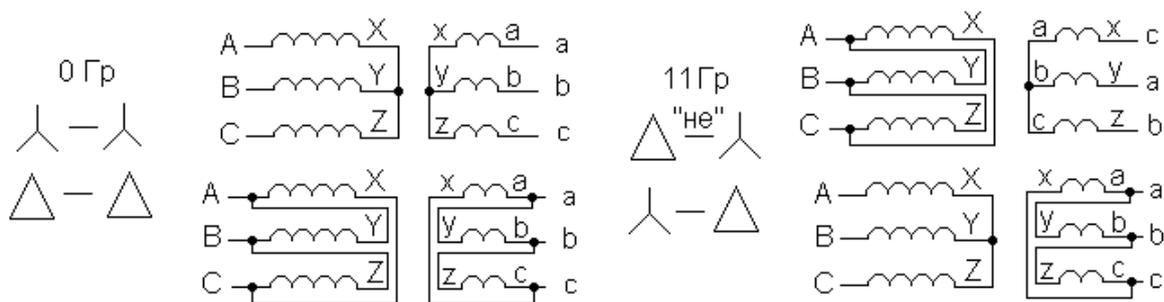


Рис. 4–7

1.3. Опытное определение обмоток ВН и НН и обмоток, находящихся на одном стержне

Пусть заданы выводы обмоток трехфазного трансформатора (рис. 8), подключим одну из обмоток, например, 1–2 к испытательному напряжению. Измерим и занесем в табл. 1 напряжение на выводах остальных обмоток. Если пренебречь падением магнитного напряжения в ярме, то при прохождении тока по любой из обмоток можно считать, что поток Φ_l соз-

данный этой обмоткой, распределяется поровну между другими стержнями (рис. 9). Учитывая это, можно, анализируя данные табл. 1, определить, во-первых, обмотку, находящуюся на одном стержне с обмоткой 1–2, а, во-вторых – обмотки ВН и НН.

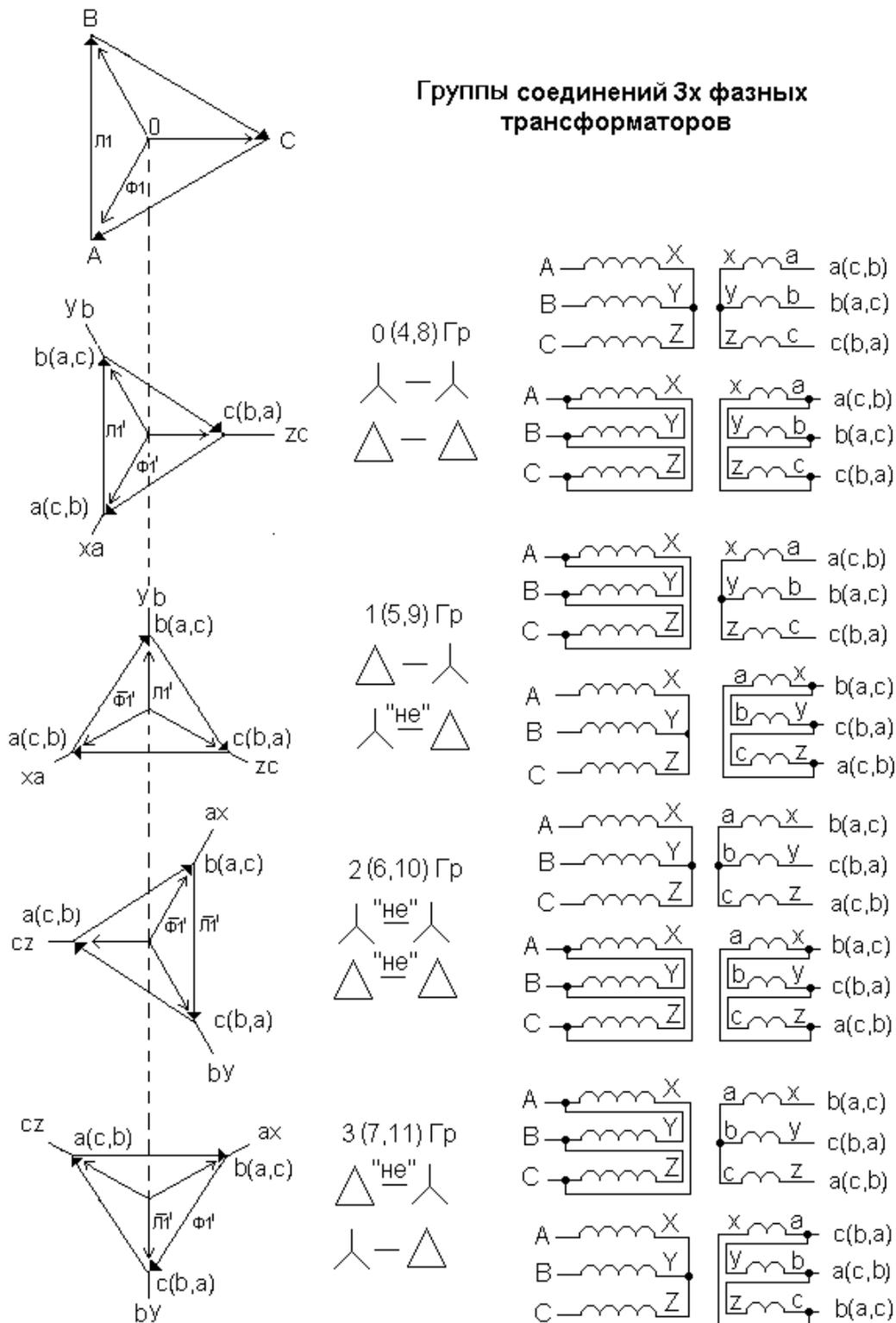


Рис. 5

Рис. 8

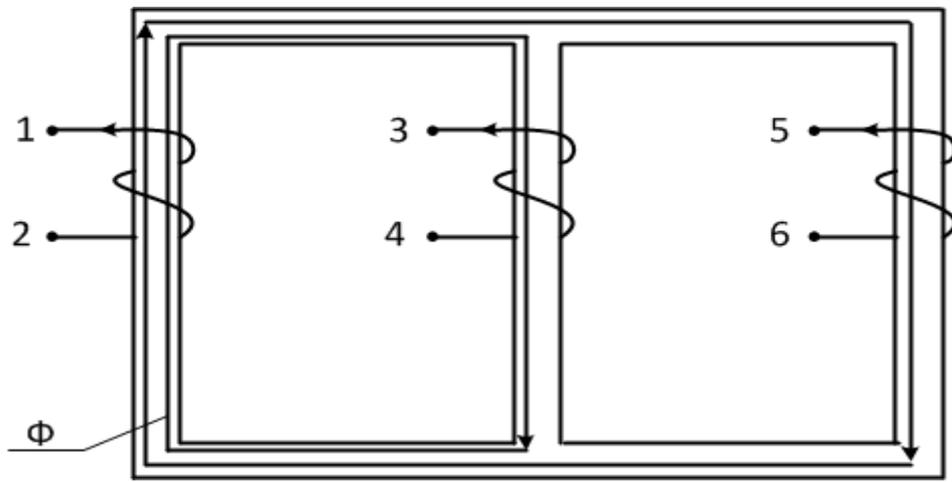


Рис. 9

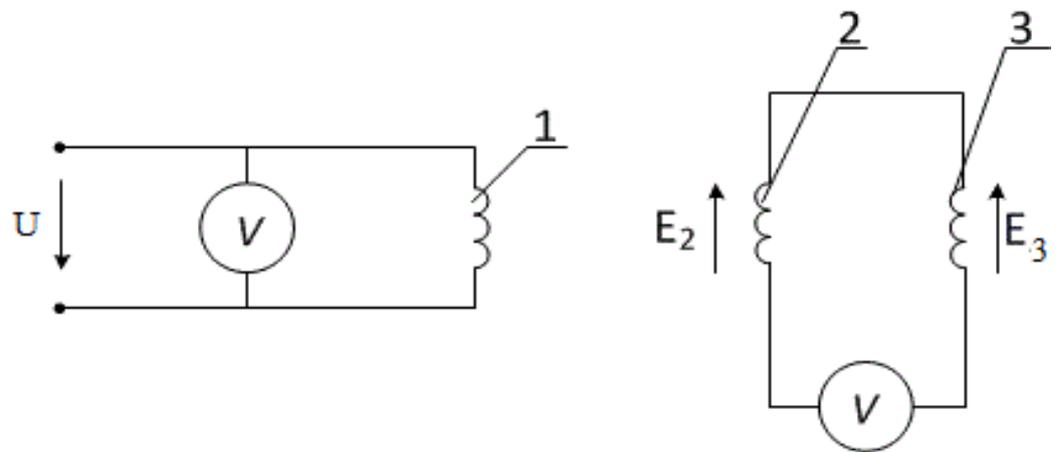


Рис. 10

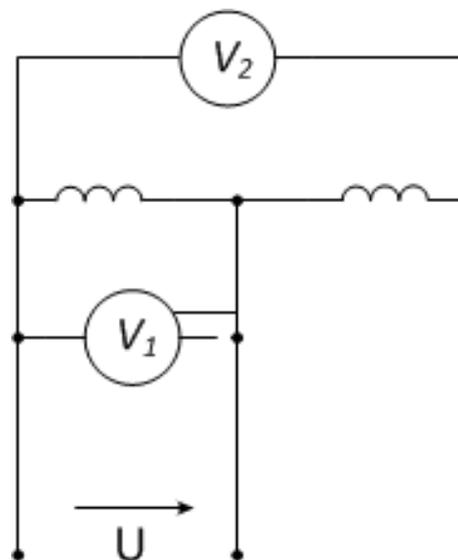


Рис. 11

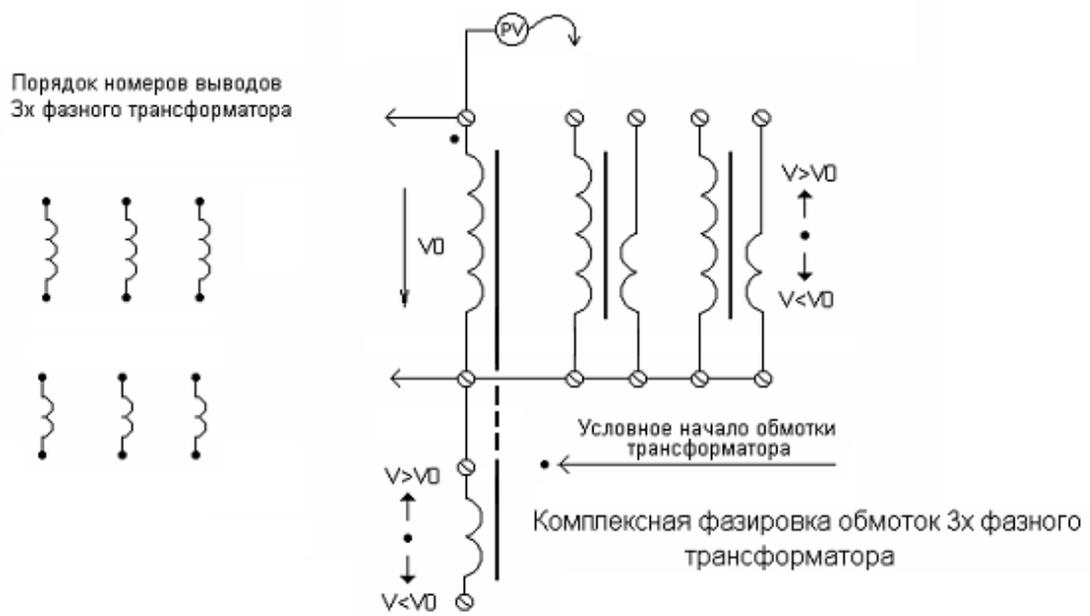


Рис. 11а

Таблица 1

Назн						
№	1__2	3__4	5__6	7__8	9__10	11__12
1						
2						
3						
4						
5						
6						
Выв						

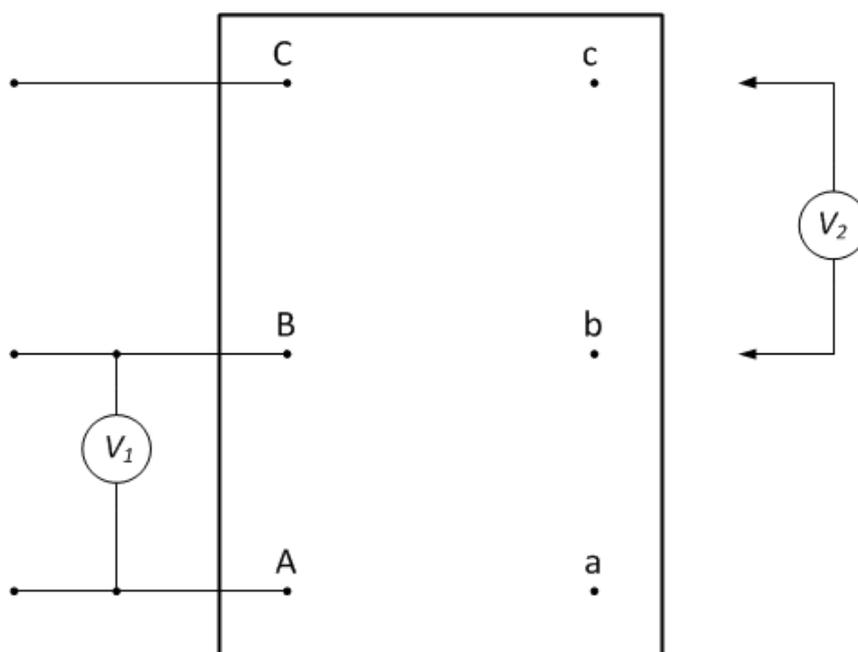


Рис. 12

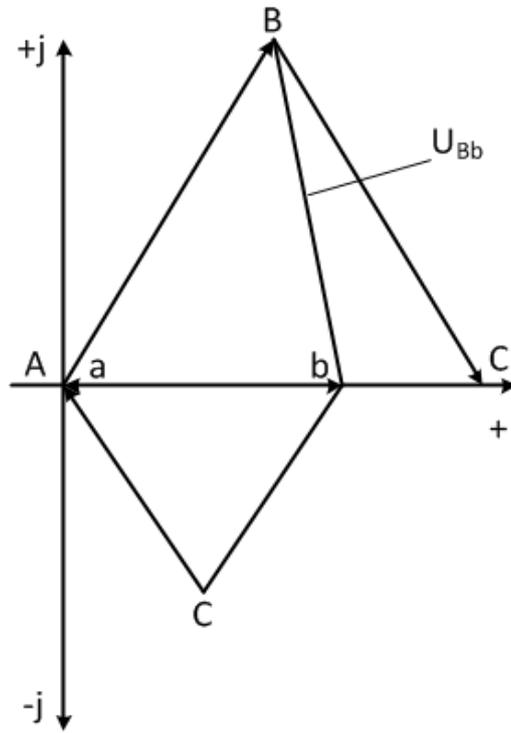


Рис. 13

Предположим, что обмотка 1–2 является обмоткой ВН. Тогда для обмотки НН, находящейся на этом стержне, напряжение

$$U_{\text{НН}} = U_{1-2}/k. \quad (2)$$

Для обмоток НН, находящихся на других стержнях,

$$U_{\text{НН}} \approx \frac{U_{1-2}}{(2 \cdot k)} \quad (3)$$

Для обмоток ВН

$$U_{\text{ВН}} = \frac{U_{1-2}}{2} \quad (4)$$

Отметим, что если $K \approx 2$, то значения $U_{\text{НН}}$ по (2) и $U_{\text{ВН}}$, из (4) будут близки и обмотки ВН и НН могут быть определены неверно. Поэтому, если в табл. 1 имеется более двух близких цифр, необходимо опыт повторить для обмоток НН, которые были найдены по формулам (3).

После того, как определены обмотки ВН и НН определяют для каждой обмотки ВН ту обмотку НН, которая находится на том же стержне, что и обмотка ВН. Это несложно сделать, сравнивая напряжение на обмотках НН (см. формулы (2) и (3)).

1.4. Определение начал и концов обмоток ВН

Это можно выполнить несколькими способами. Один из них заключается в следующем. На одну из обмоток ВН подают напряжение, а две

другие соединяют последовательно и измеряют напряжение U_1 и U_2 . Схема представлена на рис. 10. В этом опыте потоки в стержнях, на которых находятся обмотки 2 и 3, направлены в одну сторону и ЭДС в обеих обмотках должны быть одновременно направлены к их началам или концам.

Комплексная фазировка обмоток 3х фазного трансформатора

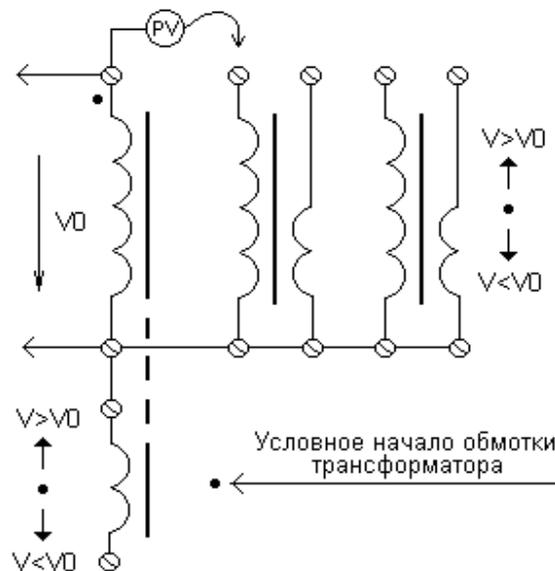


Рис. 14

Если обмотки 2 и 3 соединены началами или концами, то при обходе замкнутого контура в обоих случаях ЭДС E_2 и E_3 направлены навстречу и показание вольтметра U_2 будет близки к нулю. В противном случае ЭДС сонаправлены и показания вольтметров U_1 и U_2 будут близки.

Произвольно присвоим одной из обмоток, например, второй, обозначения А, Х. По показаниям вольтметра U_2 определяют начало В и концы У третьей обмотки. Зная маркировку обмоток 2 и 3, определяем аналогично начало С и конец Z оставшейся обмотки.

1.5. Маркировка начал и концов обмотки НН, находящейся на одном стержне с обмоткой ВН.

Маркировка обмотки зависит от групп соединения. Для групп 0, 4, 8, 11, 3, 7 она должна выполняться в соответствии с рис. 1б, а для остальных по рис. 1в. На рис. 2 приведена схема, по которой осуществляется маркировка обмотки НН. В зависимости от показаний вольтметров U_1 и U_2 и группы соединения представляется маркировка начала и конца обмотки.

1.6. Проверка групп соединения обмоток

Группу соединения обмоток трансформатора в лабораторной работе определяют методом двух вольтметров (5;8). При использовании этого метода собирают исследуемую схему и соединяют зажимы А и а. К одной из

обмоток подводят симметричное трехфазное напряжение и измеряют вольтметром U_1 . напряжения между зажимами в–В в–С, с–В (см. рис. 12).

Измеренные напряжения $U_{вВ}$, $U_{вС}$, $U_{сВ}$ сравнивают с соответствующими расчетными, вычисленными по формулам.

1.6.1. Вывод формул для определения групп соединения обмоток.

В качестве примера рассмотрим вторую группу. Нарисуем на комплексной плоскости векторную диаграмму для второй группы (рис. 13). Напряжение $U_{вВ}$ равно разности векторов $U_{ав}$ и $U_{АВ}$ спроектируем эти векторы на оси и определим величину $U_{вВ}$

$$U_{вВ} = U_{АВ} \cdot \cos 60 - U_{ав} + jU_{АВ} \cdot \cos 30 \text{ или} \quad (7)$$

$$U_{вВ} = U_{АВ} \cdot \left[\left(\frac{k}{2} - 1 \right) + j \cdot k \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

где K – линейный коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_{АВ}}{U_{ав}} \quad (8)$$

Из (7) получим

$$U_{вВ} = U_{л} \cdot \sqrt{k^2 + k + 1} \quad (9)$$

Аналогично определяем остальные напряжения

$$U_{вС} = U_{л} \cdot \sqrt{k^2 + k + 1} \quad (10)$$

$$U_{сВ} = U_{л} \cdot (k - 1) \quad (11)$$

В формулах (9), (10), (11) $U_{л}$ – линейное напряжение на зажимах обмотки НН.

Для остальных групп соединений предлагается формулы получить самостоятельно.

1.6.2 Инструментальные методы проверки групп соединений.

Инструментальное измерение фазометром 360° .

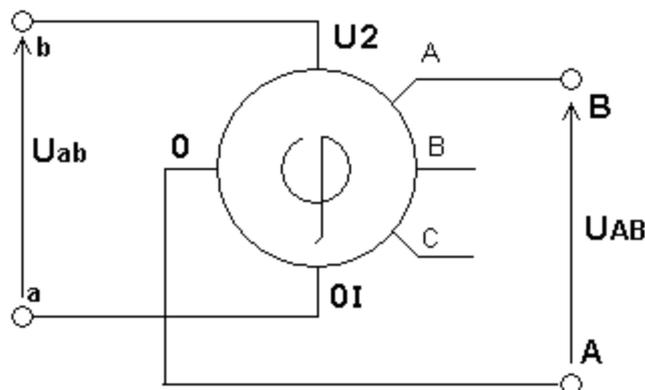
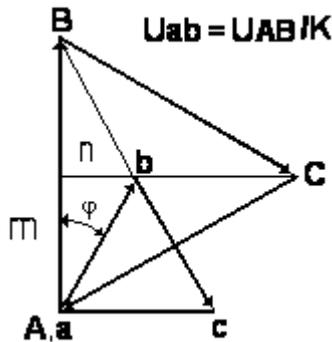


Рис.15

Проверка групп соединений методом вольтметра.



$$n = U_{ab} \cdot \sin\varphi; m = U_{ab} \cdot \cos\varphi; U_{ab} = U_{AB}/K$$

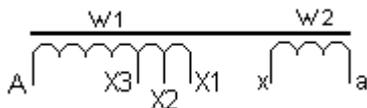
$$U_{bB} = \sqrt{\sin^2\varphi + (K - \cos\varphi)^2} \cdot U_{AB}/K$$

$$\varphi_{cB} = \varphi_{bB} + 60^\circ, \varphi_{bC} = \varphi_{bB} - 60^\circ$$

Для трехфазных понижающих трансформаторов 380/220/127 ($\frac{W_{1H}}{W_2} = K_{TPH} = \sqrt{3}$) номинальный линейный коэффициент U_{bB} зависит от схемы соединения:

$$(\Delta - Y) K_H = 1, (\Delta - \Delta, Y - Y) K_H = \sqrt{3}, (Y - \Delta) K_H = 3$$

Так как вторичное напряжение может несколько отличаться от номинального до $\pm 5\%$ то линейный коэффициент $K = K_H \cdot K_{П}$, где $K_{П}$ - коэффициент поправки, величина которого зависит от используемых отводов первичных обмоток трансформатора



(Для применяемых в работе трансформаторов)

$$K_{П1} = 127/127 \approx 1 - \text{номинальный,}$$

$$K_{П2} = 127/130 \approx 0,977 - \text{повышающий,}$$

$$K_{П3} = 127/133 \approx 0,955 - \text{повышающий.}$$

Межобмоточные напряжения (U_{bB}, U_{cB}, U_{bC}) при $K_{П} = 0,955$ и $U_{AB} = 220В$.

φгр	φрад	Гр	Кп	√3Кп	3Кп	Sinφ	Cosφ	U _{bB} , U _{cB} , U _{bC}
		U _{AB} =220В						0,955
0	0	0		87		0	1	U _{ab} K-1 абс.
30	0,5236	1	117		158	1/2	√3/2	U _{ab} √(K ² -K√3+1)
60	1,0472	2		192		√3/2	1/2	U _{ab} √(K ² -K+1)
90	1,5708	3	319		233	1	0	U _{ab} √(K ² +1)
120	2,0944	4		309		√3/2	(-)/2	U _{ab} √(K ² +K+1)
150	2,618	5	435		289	1/2	(-)/√3/2	U _{ab} √(K ² +K√3+1)
180	3,1416	6		353		0	(-)/1	U _{ab} (K+1)
210	3,6652	7	435		289	(-)/2	(-)/√3/2	U _{ab} √(K ² +K√3+1)
240	4,1888	8		309		(-)/√3/2	(-)/2	U _{ab} √(K ² +K+1)
270	4,7124	9	319		233	(-)/1	0	U _{ab} √(K ² +1)
300	5,236	10		192		(-)/2	1/2	U _{ab} √(K ² -K+1)
330	5,7596	11	117		158	(-)/2	√3/2	U _{ab} √(K ² -K√3+1)

Δ - Y Y - Y, Δ - Δ Y - Δ

При соединении выводов «А» и «а» первичной и вторичной обмоток трансформатора, по напряжению U_{bB} можно проверить группу соединения.

Напряжение **U_{cB} опережает** U_{bB} на 2 группы (60°), например: $7_{гр}+2=9_{гр}$, а напряжение **U_{bC} отстает** на 2 группы, например: $7_{гр}-2=5_{гр}$.

То есть соответствующие группе напряжения находятся в соответствующих графах таблицы

2. Описание лабораторной установки

Лабораторная работа выполняется на стенде № 3. В ней исследуется трехфазный трехстержневой трансформатор типа ТСВМ–4–74–ОМ5. Его паспортные данные приведены на заводской бирке. На лицевую панель трансформатора выведена концы X_3, Y_3, Z_3 . Для испытаний трансформатора на стенде имеется симметричное трехфазное напряжение с $U_a = 220 \pm 5\% \text{ В}$.

Регулируемое однофазное напряжение получают с помощью ЛАТР. Измерение напряжений можно выполнить щитовыми вольтметрами, измерительным комплектом К505 или цифровым вольтметром. Для определения выводов обмоток используется мегомметр.

3. Предварительная подготовка к лабораторной работе

3.1. Перед выполнением работы необходимо:

- 1) ознакомиться с оборудованием лабораторной установки и выписать паспортные данные трансформатора;
- 2) изучить «Сведения из теории»;
- 3) ознакомиться с заданием на экспериментальное и аналитическое исследование;

В соответствии с заданиями и «Сведениями из теории» выполнить следующее:

- 1) определить последовательность проведения экспериментов;
- 2) составить для каждого эксперимента принципиальную схему и таблицу для внесения измеренных значений. На схемах указать значения подаваемых напряжений;
- 3) рассчитать напряжения, необходимые для определения группы соединения.

4. Задание на экспериментальное исследование

В работе определить:

- 1) выводы каждой обмотки;
- 2) обмотки ВН и НН;
- 3) обмотки, находящиеся на одном стержне;
- 4) начала и концы обмоток ВН и НН;
- 5) собрать заданную преподавателем группу соединения и измерить напряжения, которые позволяют определить группу.

5. Задание на аналитическое исследование

5.1. Определить линейный коэффициент трансформации.

5.2. Для заданной группы соединения вывести формулу расчета напряжений $U_{вв}$, $U_{вс}$, $U_{св}$

6. Дополнительные требования к содержанию отчета

6.1. Привести схемы и таблицы измерений к опытам.

6.2. Схему соединений обмоток для заданной группы.

6.3. Векторную диаграмму для заданной группы соединений.

6.4. Вывод формул к п. 5.2 и результаты расчета по ним.

6.5. Выводы по работе.

Вопросы для самопроверки

1. Какие из схем Y/Y , Δ/Δ , Δ/Z , Y/Δ , Δ/Y , Y/Z чаще используются и почему?

2. Как можно изменить сдвиг по фазе между ЭДС в однофазном трансформаторе, не изменяя маркировку зажимов?

3. Объяснить, как определять обмотки ВН и НН, если коэффициент трансформации близок к двум.

4. Предложить другие (не рассмотренные в работе) способы маркировки обмоток, находящихся на разных стержнях.

5. Что понимается под группой соединения обмоток?

6. Объяснить, как можно перейти от одной группы к другой для одной и той же схемы.

7. Объяснить, что такое левая и правая намотки обмоток. Какая из них находит большее применение?

8. Какие методы используются для определения групп соединения.

Лабораторная работа 2.8. Исследование параллельной работы трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Параллельное включение трансформаторов широко применяется в электрических системах. Это обусловлено тем, что, во-первых, не всегда существует возможность изготовить трансформатор большой мощности, а во-вторых, это позволяет решить задачу резервирования и повысить КПД при преобразовании электрической энергии. Основная проблема, возникающая при параллельной работе трансформаторов, связана с обеспечением равномерного распределения нагрузки между ними. Изучению факторов, влияющих на распределение нагрузки, посвящена данная лабораторная работа.

Цель работы

Изучить условия включения трансформаторов на параллельную работу и исследовать влияние неравенства коэффициентов трансформации и внутренних сопротивлений на распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.

1. Сведения из теории

Параллельная работа трансформаторов применяется для обеспечения бесперебойного энергоснабжения потребителей в случае аварии или необходимости ремонта трансформаторов. Кроме того, это позволяет увеличить КПД трансформаторов путем включения на параллельную работу такого их числа, при котором каждый будет работать с максимальным КПД.

При параллельном включении трансформаторов их первичные и вторичные обмотки присоединяются соответственно к общим шинам питающей сети и потребителям (рис. 1).

Для того, чтобы включить трансформаторы на параллельную работу, необходимо выполнить три условия:

- 1) трансформаторы должны иметь одинаковые группы соединения обмоток
- 2) иметь равные первичные и вторичные номинальные напряжения, что-то же самое, равные коэффициенты трансформации;
- 3) иметь одинаковые относительные значения напряжений короткого замыкания (U_k).

ГОСТ 11677–45 допускает параллельную работу при неравенстве коэффициентов трансформации не более, чем на 0,5% и напряжений короткого замыкания не более чем на 10% от их средних арифметических значений.

Если не выполняются первые два условия, то уже при холостом ходе за счет неравенства фаз или величин ЭДС вторичных обмоток возникают уравнительные токи, которые циркулируют по замкнутым контурам во вторичных и первичных обмотках. На рис. 1 один из контуров показан

пунктирными стрелками. Уравнительные токи при подключении нагрузки векторно складываются с токами нагрузки и вызывают неравномерную загрузку трансформаторов. При невыполнении третьего условия уравнительные токи не возникают, но нагрузка по трансформаторам распределяется не равномерно.

1.1 Параллельная работа трансформаторов в использовании разных группах соединений.

При разных группах соединений между одноименными зажимами вторичных обмоток возникает (2) разность ЭДС, ΔE за счет которой возникает уравнительный ток. Величина тока определяется величиной ΔE и сопротивлениями короткого замыкания трансформаторов. Так как эти сопротивления малы, то уже для ближайших групп (например, одиннадцатой) уравнительные токи превышают в несколько раз номинальные значения.

Поэтому включение на параллельную работу трансформаторов с разными группами недопустимо.

1.2. Распределение нагрузки при выборе различных значений коэффициента трансформации

Для того, чтобы определить возможность и целесообразность параллельного включения трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, необходимо проводить расчеты. Расчетные формулы можно получить из уравнений напряжений для первичной и вторичной обмоток

$$\begin{aligned} U_1 &= -E_1 + I_1 \cdot Z_1 \\ U_2 &= E_2 - I_2 \cdot Z_2 \end{aligned} \quad (1)$$

уравнения для токов трансформатора

$$I_1 = I_c + (-I_2) \quad (2)$$

и токов нагрузки

$$I = \sum I_{2i}, \quad (3)$$

где I – ток нагрузки;

I_{2i} – вторичный ток i -того трансформатора.

Пренебрегая токами намагничивания и приводя первичную обмотку ко вторичной из (1), (2) и (3) для двух параллельно включенных трансформаторов получим

$$-U_1 \cdot k_1 = I_{21} \cdot Z_{k1} + U_2$$

$$\begin{aligned} -U_{1k_2} &= I_{22} \cdot Z_{k2} + U_2 \\ I &= I_{21} + I_{22}, \end{aligned} \quad (4)$$

где I_{21}, I_{22} – векторы вторичных токов соответственно первого и второго трансформаторов;

Z_{k1}, Z_{k2} – сопротивление короткого замыкания соответственно первого и второго трансформаторов, приведенные ко вторичной обмотке;

Схема соединения обмоток трансформатора при параллельной работе

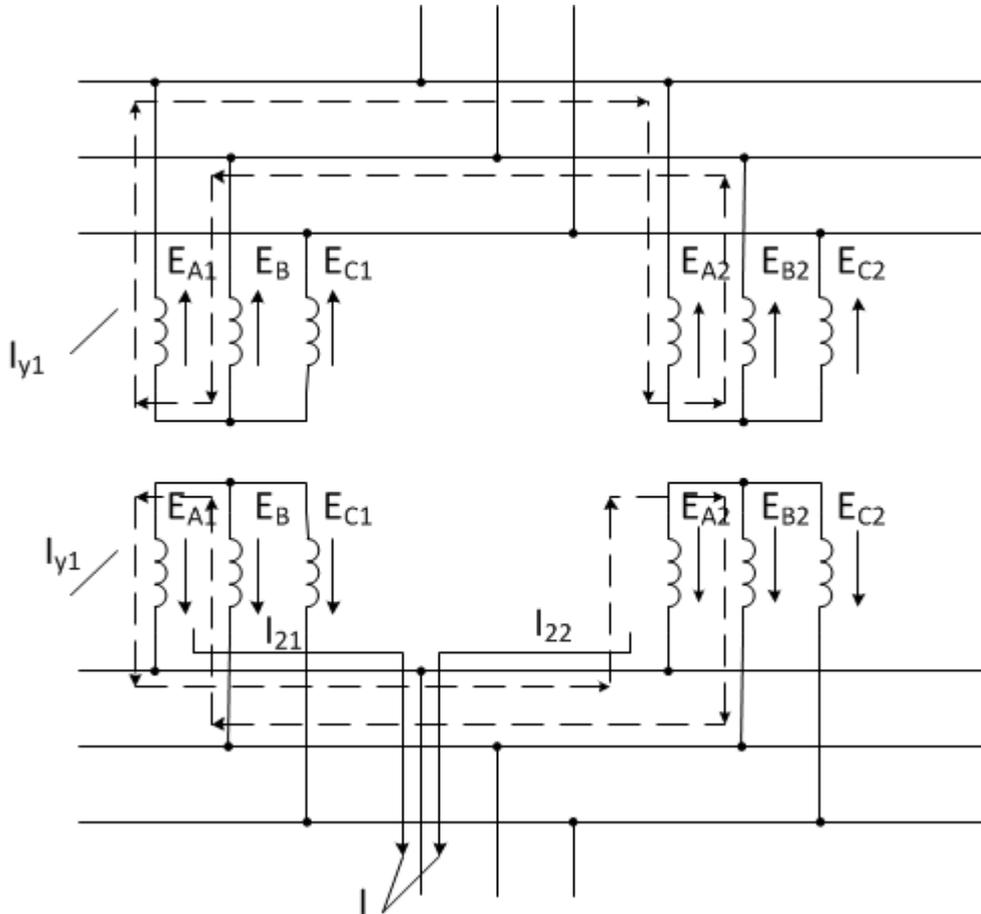


Рис 1

K_1, K_2 – фазные коэффициенты трансформации.

$$K_1 = \left(\frac{E_{21}}{E_{11}} \right) \quad (5)$$

$$K_2 = \left(\frac{E_{22}}{E_{12}} \right)$$

Решая (4) относительно I_{21}, I_{22} получим

$$I_{21} = \left(\frac{(U_1 \cdot (K_1 - K_2))}{Z_{k1} + Z_{k2}} \right) + \left(\frac{I \cdot Z_{k2}}{Z_{k1} + Z_{k2}} \right) \quad (6)$$

$$I_{22} = -\frac{U_1 \cdot (K_1 - K_2)}{Z_{k1} + Z_{k2}} + \frac{I \cdot Z_{k1}}{Z_{k1} + Z_{k2}}$$

Из (6) следует, что токи каждого трансформатора при неравных коэффициентах трансформации имеют две составляющие:

1) первая составляющая обусловлена неравенством коэффициентов трансформации и представляет собой уравнивающий ток, протекающий в цепи трансформаторов даже при холостом ходе, когда $I = 0$;

2) вторая составляющая пропорциональна току нагрузки,

Формулы (6) выражают зависимость вторичных токов трансформаторов от первичного напряжения U_1 и тока нагрузки I . В некоторых случаях, как, например, в лабораторной работе, известны напряжение U_2 и характер нагрузки. В этом случае удобно выразить токи I_{11} и I_{22} через напряжение U_2 . Для этого необходимо из (4) определить U_1 и подставить в (6).

1.3. Влияние неравенства напряжения короткого замыкания на распределение нагрузок.

Выражение для токов при неравенстве напряжений U_k можно получить из (6), приравняв коэффициенты трансформации. Вывод зависимости распределения нагрузки от напряжений короткого замыкания U_k % приведен в (1) и (2).

$$S_1^* : S_2^* : S_3^* = \left(\frac{1}{(U_{k1} \%)} \right) : \left(\frac{1}{(U_{k2} \%)} \right) : \left(\frac{1}{(U_{k3} \%)} \right) \quad (7)$$

Из (7) следует, что больше загружается тот трансформатор, у которого меньше напряжение U_k .

2. Описание лабораторной установки.

Лабораторная работа выполняется на стенде № 4. В ней исследуется параллельная работа двух трехфазных трансформаторов типа ТСВМ–4–74 0МЗ. Их паспортные данные приведены на заводских табличках. Дополнительные данные для расчетов следует определить из опыта короткого замыкания, который проводился при температуре обмоток $t = 20^\circ \text{C}$. Схема опыта приведена на рис. 2. Данные опыта приведены в табл. 1.

Экспериментальные данные опыта короткого замыкания

Таблица 1

$U_{ка}, \text{В}$	$U_{кв}, \text{В}$	$U_{кс}, \text{В}$	$I_{ка}, \text{А}$	$I_{кв}, \text{А}$	$I_{кс}, \text{А}$	$P_{ка}, \text{Вт}$	$P_{кв}, \text{Вт}$	$P_{кс}, \text{Вт}$
5,9	6,1	6,2	6,1	6,0	6,4	34,2	35	37

Работа трансформаторов при одинаковых коэффициентах трансформации выполняется при подключении питания к концам $X3$, $Y3$, $Z3$ обоих

трансформаторов. При исследовании работы с различными коэффициентами следует снять верхнюю крышку одного из трансформаторов и переключить на нем питание на выводы X2, Y2, Z2

При исследовании влияния неравенства напряжений короткого замыкания в каждую фазу вторичной обмотки одного из трансформаторов следует включить дополнительное активное сопротивление, выводы которого находятся справа на наклонной панели стенда. Величина сопротивления $R = 0,48 \text{ Ом}$.

Трехфазное симметричное напряжение выведено на клеммы А, В, С и включается кнопкой К1, отключается кнопкой «Стоп». Значение из линейного напряжения $U = 220 \pm 5\% \text{ В}$.

Схема лабораторной установки

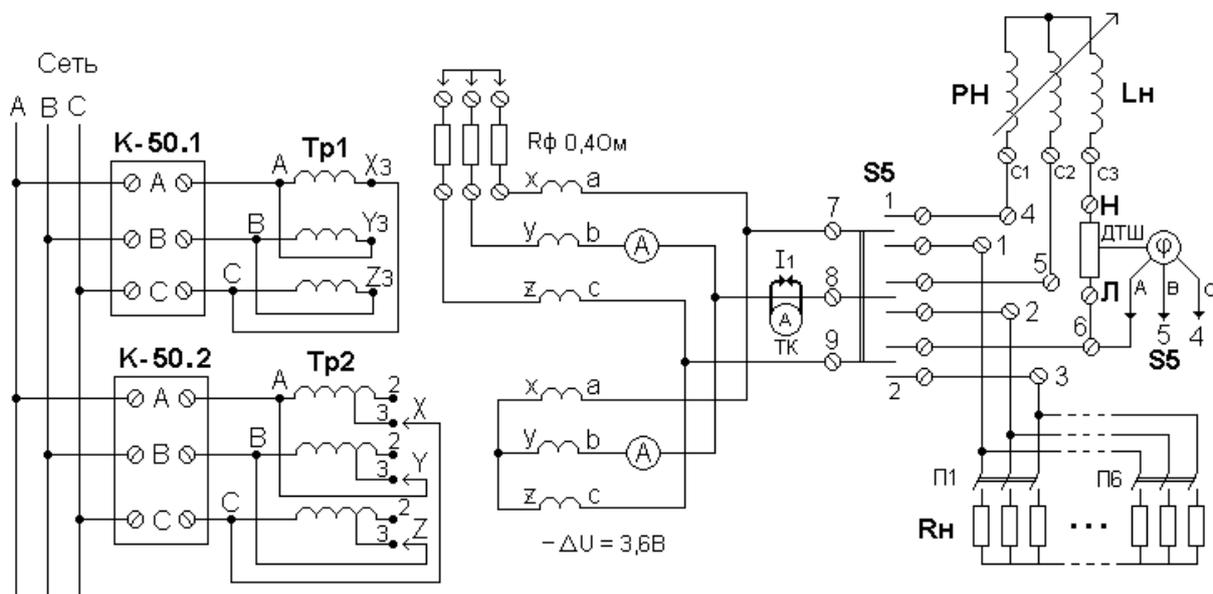


Рис.2

Для измерения тока нагрузки следует включить измерительный комплект К50. Вторичные токи каждого из трансформаторов и напряжение питания измеряют щитовыми амперметрами и вольтметром. Пределы измерения приборов выбрать самостоятельно исходя из паспортных данных трансформаторов.

Для создания активной нагрузки используется трехфазный шести ступенчатый резистор R_H . Ступени сопротивлений подключаются выключателями П1–П6. Индуктивная нагрузка создается регулятором РН, схема которого приведена на рис. 4. Индуктивную нагрузку следует включить через выключатель S5, принципиальная которого, и нумерация зажимов приведена на рис. 5.

Перед сборкой схемы необходимо включить П1–П6, переключатель S5 и указатель регулятора напряжения (РН) в нулевое положение.

Таблица 2 При активной нагрузке, $UK1=UK2$ и $K1=K2$.

Данные измерений						Расчетные данные			
№ пп	$U_{1\Phi}$ (В)	I_{11} (А)	P_{11} (Вт)	I_{21} (А)	I_{2C} (А)	$U_{2\Phi}$ (Вт)	P_2 (Вт)	KP_3	η (кпд)
		I_{12} (А)	P_{12} (Вт)	I_{22} (А)					
1									
2									
3									
4									
5									
6									

$KP_3 = P_{12} / P_{11}$, ($KP_3 \leq 1$), $\eta = P_2 / (P_{11} + P_{12})$ где $P_2 = U_{2\Phi} * I_{2C}$ активная мощность вторичной цепи.

Таблица 3 При индуктивной нагрузке, $UK1=UK2$ и $K1=K2$.

Данные измерений							Расчет		
№ пп	$U_{1\Phi}$ (В)	I_{11} (А)	P_{11} (Вт)	I_{21} (А)	I_{2C} (А)	$U_{2\Phi}$ (Вт)	φ_2	P_2 (Вт)	η (кпд)
		I_{12} (А)	P_{12} (Вт)	I_{22} (А)					
1									
2									
3									
4									

$\eta = P_2 / (P_{11} + P_{12})$ где $P_2 = U_{2\Phi} * I_{2C} * \cos \varphi_2$ активная мощность вторичной цепи.

Таблица 4 При активной нагрузке, разных $UK1 \neq UK2$ и $K1=K2$.

Данные измерений						Расчетные данные			
№ пп	$U_{1\Phi}$ (В)	I_{11} (А)	P_{11} (Вт)	I_{21} (А)	I_{2C} (А)	$U_{2\Phi}$ (Вт)	P_2 (Вт)	KP_3	η (кпд)
		I_{12} (А)	P_{12} (Вт)	I_{22} (А)					
1									
2									
3									
4									
5									
6									

$KP_3 = P_{12} / P_{11}$, ($KP_3 \leq 1$), $\eta = P_2 / (P_{11} + P_{12})$ где $P_2 = U_{2\Phi} * I_{2C}$ активная мощность вторичной цепи.

Таблица 5 При активной нагрузке, разных $K1 \neq K2$ и $UK1 = UK2$

Данные измерений						Расчетные данные			
№ пп	$U_{1\Phi}$ (В)	I_{11} (А)	P_{11} (Вт)	I_{21} (А)	I_{2C} (А)	$U_{2\Phi}$ (Вт)	P_2 (Вт)	КРЗ	η (кпд)
		I_{12} (А)	P_{12} (Вт)	I_{22} (А)					
1									
2									
3									
4									
5									
6									

$КРЗ = P_{12} / P_{11}$, ($КРЗ \leq 1$), $\eta = P_2 / (P_{11} + P_{12})$ где $P_2 = U_{2\Phi} * I_{2C}$ активная мощность вторичной цепи.

3. Предварительная подготовка к лабораторной работе.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо:

- 1) ознакомиться с лабораторной установкой и полностью выписать паспортные данные;
- 2) изучить сведения из теории;

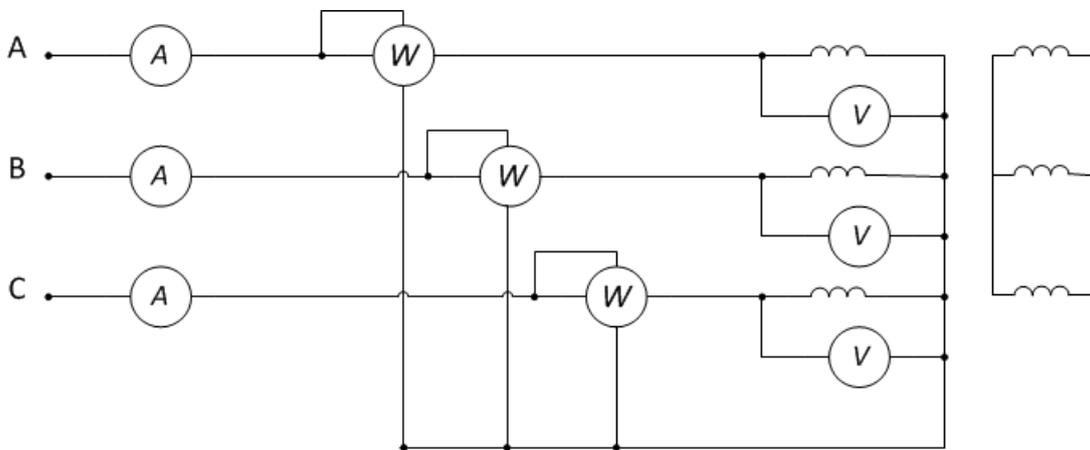


Рис. 3

3) выполнить необходимые расчеты в соответствии с заданием на аналитическое исследование;

4) ознакомиться с заданием на экспериментальное исследование и составить принципиальную схему для проведения экспериментов. Группа соединения трансформаторов первая, а схема – Δ/Y . На схеме указать номинальные значения амперметров и вольтметров;

5) для каждого опыта составить таблицу для занесения данных;

6) вначале занятий или на консультации представить преподавателю для проверки подготовленные материалы.

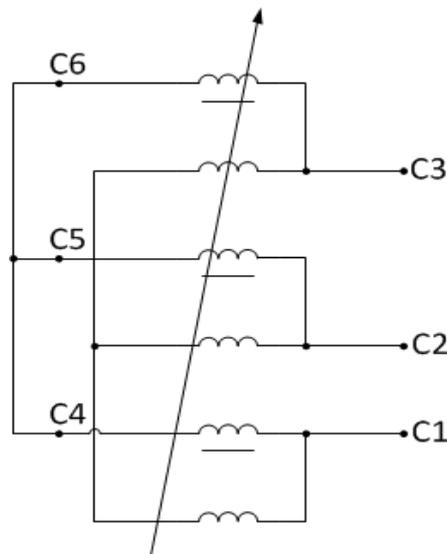


Рис. 4

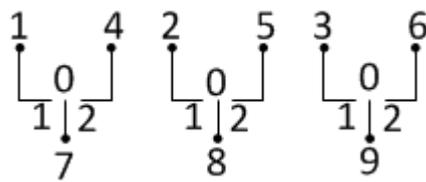


Рис.5

Цифры 0, 1, 2 около каждого контакта обозначают положение переключателя.

4. Задание на аналитическое исследование

4.1. По данным табл. 1 определить активное и реактивное сопротивления короткого замыкания.

4.2. Используя рекомендации, п. 1.2 вывести зависимость токов вторичных обмоток от напряжения U_2 .

4.3. По паспортным данным рассчитать фазный коэффициент трансформации K_1 и K_2 при подключении питания соответственно к выводам X_2, Y_2, Z_2 и X_3, Y_3, Z_3

4.4. По формуле, полученной в п. 4.3, определить при разных коэффициентах трансформации токи вторичных обмоток трансформаторов и построить зависимость I_{21} и $I_{22} = f(I)$. Расчёт провести для пяти– шести точек и окончить, если ток одного из трансформаторов превышает номинальное значение. Нагрузку принять чисто активной. Изменением напряжения U_2 при увеличении тока пренебречь. Начальное напряжение U_2 (при $I=0$) определить так. При токе I нагрузки, равном нулю из (6) определить токи I_{21} и I_{22} . Подставить полученные значения токов в (4) и определить U_2 .

4.5. Рассчитать и построить зависимость вторичных токов от тока нагрузки при одинаковых коэффициентах трансформации и разных значениях напряжения U_k . Нагрузку принять чисто активной.

5. Задание на экспериментальное исследование.

Произвести измерения:

1. При равных значениях напряжений короткого замыкания $U_{K1} = U_{K2}$ и коэффициентах трансформации $K_1 = K_2$, активной и индуктивной нагрузках (Таблицы 5.1, 5.2).
2. При разных напряжениях КЗ $U_{K1} \neq U_{K2}$ и равных коэффициентах трансформации $K_1 = K_2$ (Таблицы 5.3).
3. При равных $U_{K1} = U_{K2}$ и разных коэффициентах трансформации $K_1 \neq K_2$ (Таблицы 5.).

Построить графики равномерности загрузки $K_{P3} = P_{12} / P_{11}$, ($K_{P3} \leq 1$) и эквивалентного КПД от тока вторичной цепи I_{2C} при различных режимах параллельной работы трансформаторов.

6. Дополнительные требования к содержанию отчета

6.1. Привести паспортные данные трансформатора.

6.2. Привести таблицу с результатами расчета сопротивлений. В заголовке таблицы указать, к какой обмотке приведены сопротивления.

6.3. Привести все расчетные формулы и вывод формулы для определения токов по п. 4.2.

6.4. Привести таблицы распределения расчетных и экспериментальных зависимостей токов вторичных обмоток трансформатора от токов нагрузок.

6.5. Построить векторные диаграммы токов I , I_{21} , I_{22} и напряжения U_2 при неравенстве коэффициентов трансформации для двух значений токов нагрузки:

1) $I = 0$;

2) выбрать такое значение тока нагрузки, при котором вторичный ток одного из трансформаторов достигает приблизительно минимального значения.

3) На векторной диаграмме при $I \neq 0$ отдельно показать две составляющие тока каждого трансформатора.

6.6 Выводы по работе.

Вопросы для самоподготовки.

1. Какие условия необходимо выполнить для включения трансформаторов на параллельную работу?

2. К чему может привести несоблюдение условий, необходимых для включения трансформаторов на параллельную работу?

3. Как можно проверить правильность включения трехфазных трансформаторов на параллельную работу?

4. В каких случаях возникает уравнивающий ток?

5. Как можно получить формулу (6), выведенную в первом разделе?

6. Если два трансформатора разной мощности работают параллельно, то какое должно быть соотношение сопротивлений к.з.?

7. Объяснить, почему в опыте с различными коэффициентами трансформации с увеличением тока нагрузки вначале уменьшается ток одного из трансформаторов.

8. Какое допускается по ГОСТу неравенство коэффициентов трансформации? Оценить при допустимом неравенстве коэффициентов относительное значение уравнивающего тока для исследуемых трансформаторов.

9. Объяснить, почему при параллельной работе нескольких трансформаторов можно повысить КПД каждого из них.

10. Как можно получить формулу (7) (показать)

Лабораторная работа 2.9. Исследование несимметричных режимов работы трехфазных трансформаторов

В практике эксплуатации трансформаторов часто встречаются случаи неравенства токов в его обмотках. Это возможно вследствие не симметрии нагрузки или аварийных режимов, возникающих при однофазных, двухфазных коротких замыканиях или при обрыве одной из питающих линий.

Возникающая при этом не симметрия напряжений неблагоприятно сказывается как на потребителях, так и на самом трансформаторе. В трансформаторе несимметричная нагрузка может вызвать перегрев отдельных обмоток, а также насыщение магнитопровода при чрезмерном повышении напряжения на фазах.

Поэтому исследование процессов, возникающих в трансформаторах, при несимметричной нагрузке, имеет важное практическое значение.

Цель работы

Изучить аналитические методы расчета несимметричных режимов и экспериментально исследовать влияние схем соединения и конструкции магнитной системы трансформаторов на его фазные токи и на искажение симметрии первичных и вторичных напряжений при несимметричной нагрузке.

1. Сведения из теории

При расчётах несимметричных режимов широко используется метод симметричных составляющих (9). Сущность этого метода состоит в том, что несимметричная система трехфазных токов и напряжений заменяется суммой трех симметричных систем прямой, обратной и нулевой последовательностей. Достоинство метода состоит в том, что каждую симметричную систему можно рассматривать независимо от остальных. Для любой из этих систем можно получить схемы замещения и дальнейший анализ, и расчет проводить для каждой последовательности отдельно. Действительные значения, например, для токов I_a , I_b , I_c определяют по формулам

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\ I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \end{aligned} \quad (1)$$

где I_{A1} , I_{B1} , I_{C1} – токи прямой последовательности, приведены на рис. 1а; I_{A2} , I_{B2} , I_{C2} – токи обратной последовательности, приведены на рис. 1б; I_{A0} , I_{B0} , I_{C0} – токи нулевой последовательности (рис. 1в).

Аналогичные формулы можно привести для симметричных составляющих несимметричной системы напряжений.

Так как составляющие нулевой последовательности для всех фаз равны по величине и совпадают по фазе, то для уменьшения числа неизвестных будем их обозначать одним индексом $I_{0п}$ или $I_{0п}$ например,

$$I_{0п} = I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} \quad (2)$$

$$U_{0п} = U_{a0} = U_{b0} = U_{c0}$$

1.1. Схема замещения и ее параметры для токов прямой и обратной последовательностей.

Режим работы трехфазного трансформатора не изменится, если поменять местами две фазы питающей сети. Подаваемые в этом случае напряжения отличаются только порядком чередования фаз, т.е. представляют собой последовательности при одном порядке чередования фаз и систему обратной последовательности при другом. Так как режим работы устройства не изменяется, то, следовательно, схемы замещения и сопротивления этих схем для токов прямой и обратной последовательности одинаковы.

Замечание

Учитывая это, при исследовании работы трансформатора в несимметричных режимах вместо отдельного рассмотрения составляющих прямой и обратной последовательностей рассматривается их геометрическая сумма.

Симметричные составляющие токов

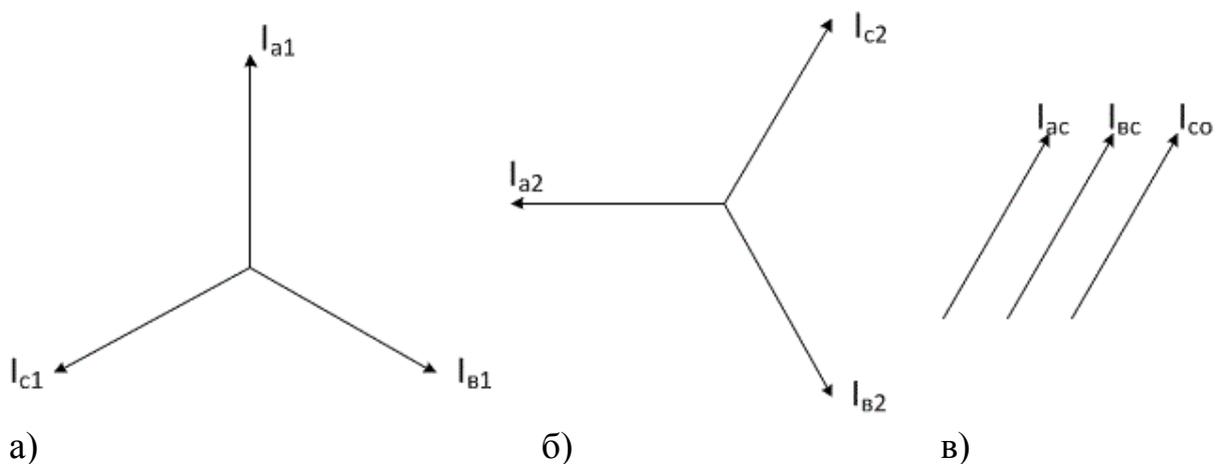


Рис.1

В этом случае уравнение (1) имеет вид

$$\begin{aligned} I_a &= I_{(a)} + I_{0п} \\ I_b &= I_{(b)} + I_{0п} \\ I_c &= I_{(c)} + I_{0п} \end{aligned} \quad (3)$$

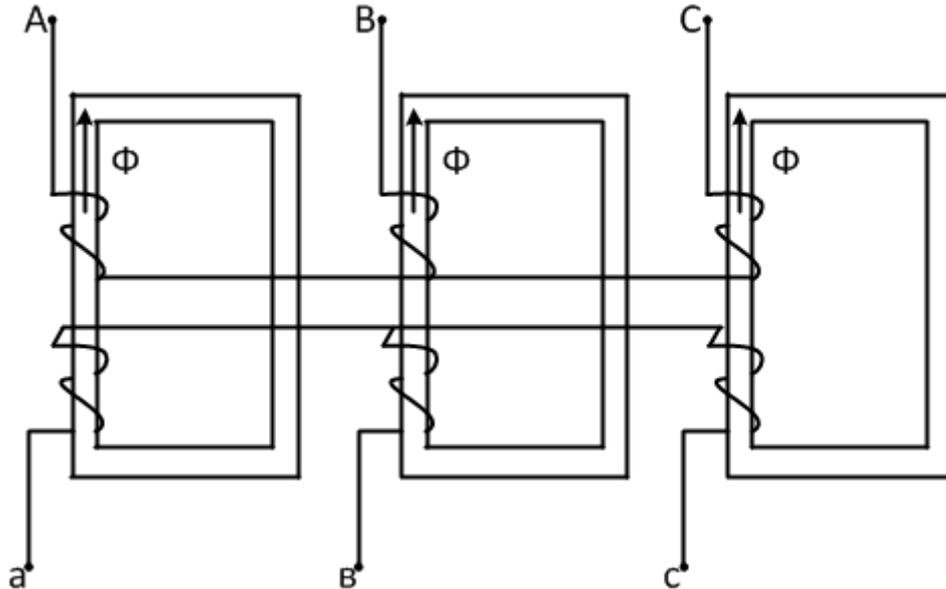
где $I_{(a)}$, $I_{(b)}$, $I_{(c)}$ – геометрическая сумма токов прямой и обратной последовательностей.

Таким образом при соединении обмоток по схемам Y/Δ , Δ/Y в обмотках высокого напряжения (ВН) и низкого напряжения (НН) токов нулевой последовательности нет.

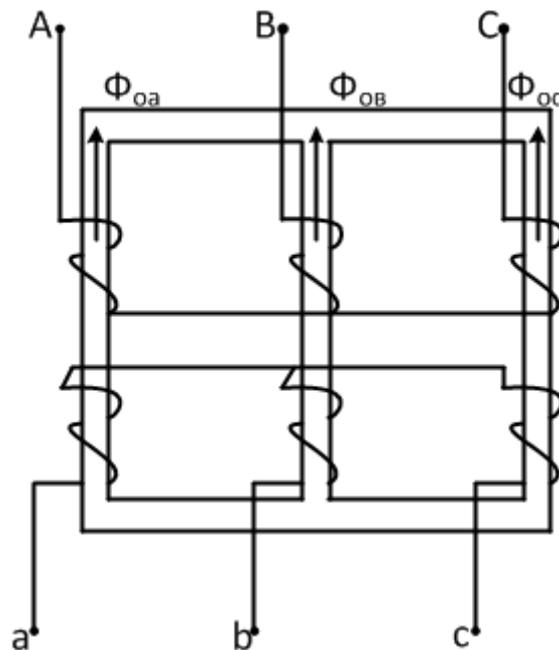
В обмотке, соединенной по схеме Y/Y_n , ток нулевой последовательности может протекать только в обмотке НН, а в трансформаторе с соединением по схеме Δ/Y_n токи будут протекать в обеих обмотках.

Виды трёхфазных трансформаторов

а)



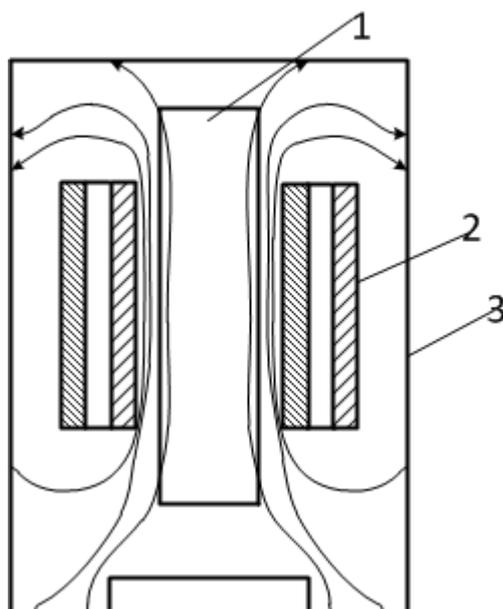
б)



а – групповой трансформатор;
 б –трехстержневой трансформатор

Рис. 3

Картина поля нулевой последовательности



- 1 – сердечник
2 – обмотка
3 – бак трансформатора

Рис. 4

1.2.2. Поток и ЭДС нулевой последовательности

Токи нулевой последовательности, протекая по катушкам, создают в каждом стержне, на который одета катушка, потоки равные по величине и одинаковые по направлению. В трехстержневом трансформаторе поток любого стержня не может замкнуться через другие, так как в каждом из них встречает ток, равный ему по значению, но направленный противоположно, как показано на рис. 3в. Поэтому поток каждого стержня замыкается от верхнего яра к нижнему через воздух, масло и бак трансформатора. Картина магнитного поля нулевой последовательности изображена на рис. 4. Магнитное сопротивление указанного пути большое, поэтому поток нулевой последовательности $\Phi_{0п}$ будет весьма мал.

Поток $\Phi_{0п}$, созданный током нулевой последовательности $I_{0п}$, наводит в первичной и вторичной обмотках каждой фазы ЭДС самоиндукции и взаимной индукции $E_{0п}$. ЭДС $E_{0п}$ записывают в следующем виде:

$$E_{0п} = Z_{m0} \cdot I_{0п}, \quad (4)$$

где

$$Z_{m0} = R_{m0} + jX_{m0} \quad (5)$$

сопротивление намагничивающей цепи нулевой последовательности.

У трехстержневого трансформатора Z_{m0} в десятки и сотни раз меньше сопротивления цепи намагничивания Z_m при симметричной нагрузке.

В трехфазной группе однофазных трансформаторов поток $\Phi_{0п}$ замыкается по замкнутым стальным магнитопроводам. Магнитное сопротивление для потоков мало и уже небольшие токи I_{0a} , I_{0b} , I_{0c} создают большие потоки. Сопротивление Z_{m0} в групповых трансформаторах практически не отличается от сопротивления намагничивающей цепи для токов прямой последовательности, так как путь замыкания потоков прямой и нулевой последовательностей совпадает.

1.2.3. Схемы замещения нулевой последовательности

Полные схемы замещения приведены на рис. 5в и 5г, а упрощенные на рис. 5д, е. Они, так же как и для токов прямой последовательности, составляются для приведенного трансформатора. Сопротивления

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 \\ Z_2 &= R_2' + jX_2' \end{aligned} \quad (6)$$

схем замещения на рис. 5 приведены к первичной обмотке и содержат активные R_1 , R_2' и индуктивные сопротивления X_1 , X_2' которые практически не отличаются от значения этих сопротивлений для токов прямой и обратной последовательностей. Порядок значений сопротивлений цепи намагничивания Z_{m0} приведен в разделе 3.2.

При соединении обмоток по схеме Y/Y_n токи нулевой последовательности не могут существовать в обмотке без нулевого провода, поэтому схема замещения со стороны первичной обмотки разомкнута. Однако напряжение на зажимах этой обмотки U_{a0} существует и индуцируется потоком $\Phi_{0п}$, создаваемым током нулевой последовательности обмотки.

Напряжение

$$U_{a0} = -E_{0п}' \quad (7)$$

У трансформатора с соединением обмоток Δ/Y_n токи нулевой последовательности существуют в обеих обмотках, причем токи в обмотке, соединенной в Δ , индуцируются обмоткой Y_n . Так как обмотка, соединенная треугольником, замкнута относительно этих токов накоротко, то со стороны вторичных зажимов это будет режим короткого замыкания. В режиме короткого замыкания намагничивающий ток составляет небольшую долю полного тока нулевой последовательности и им можно пренебречь. Поэтому в упрощенной схеме замещения на рис. 5е отсутствует цепь намагничивания.

1.2.4. Экспериментальное определение параметров схемы замещения нулевой последовательности

1.2.4.1. Схема соединений Y/Y_n

Для этой схемы необходимо последовательно соединить три фазы обмотки, включенной по схеме Y_n , а другую обмотку оставить разомкнутой.

Схема опыта приведена на рис. 6б. По показаниям приборов определяют

$$\begin{aligned} Z_{0п} &= \frac{U}{3 \cdot I} \\ R_{0п} &= \frac{P}{(3 \cdot I)^2} \\ X_{0п} &= \sqrt{Z_{0п}^2 - R_{0п}^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $Z_{0п}$, $R_{0п}$, $X_{0п}$ – соответственно полное, активное и индуктивное сопротивление нулевой последовательности. В опыте к источнику питания подключена обмотка НН. Схема замещения для одной фазы для такого опыта представлена на рис. 7а. Из схемы замещения следует

$$\begin{aligned} Z_{0п} &= Z_2 + Z_{m0} \\ R_{0п} &= R_2 + R_{m0} \\ X_{0п} &= X_2 + X_{m0} \end{aligned} \quad (9)$$

Зная R_2 и X_2 (например, из схемы замещения прямой последовательности) из (9) определяют сопротивления R_{m0} , X_{m0} .

1.2.4.2. Схема соединения обмоток Д/ Y_n

Схема опыта приведена на рис. 6г. Значения сопротивлений определяют по (8). Схема замещения одной фазы трансформатора для этого опыта представлена рис. 7б. На основании схемы замещения имеем

$$Z_{0п} = Z_2 + \left(\frac{Z_1 - Z_{m0}}{Z_1 + Z_{m0}} \right) = Z_2 + \frac{Z_1}{1 + \frac{Z_1}{Z_{m0}}} \quad (10)$$

Если $Z_{m0} \gg Z_1$ то с достаточной точностью можно принять

$$Z_{0п} = Z_1 + Z_2 \quad (11)$$

Принципиальные схемы соединения обмоток и схемы замещения нулевой последовательности

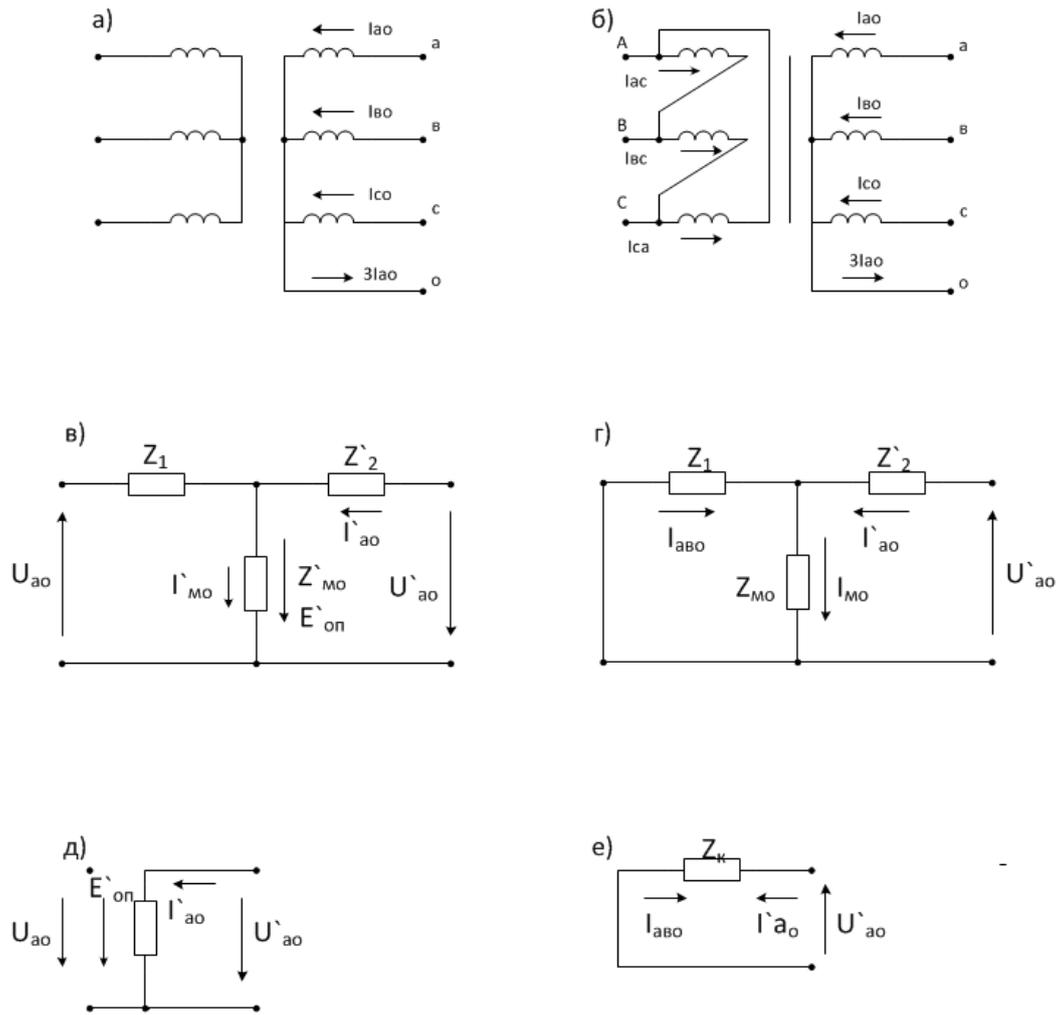


Рис. 5

Схемы экспериментального определения параметров обмотки для токов нулевой последовательности

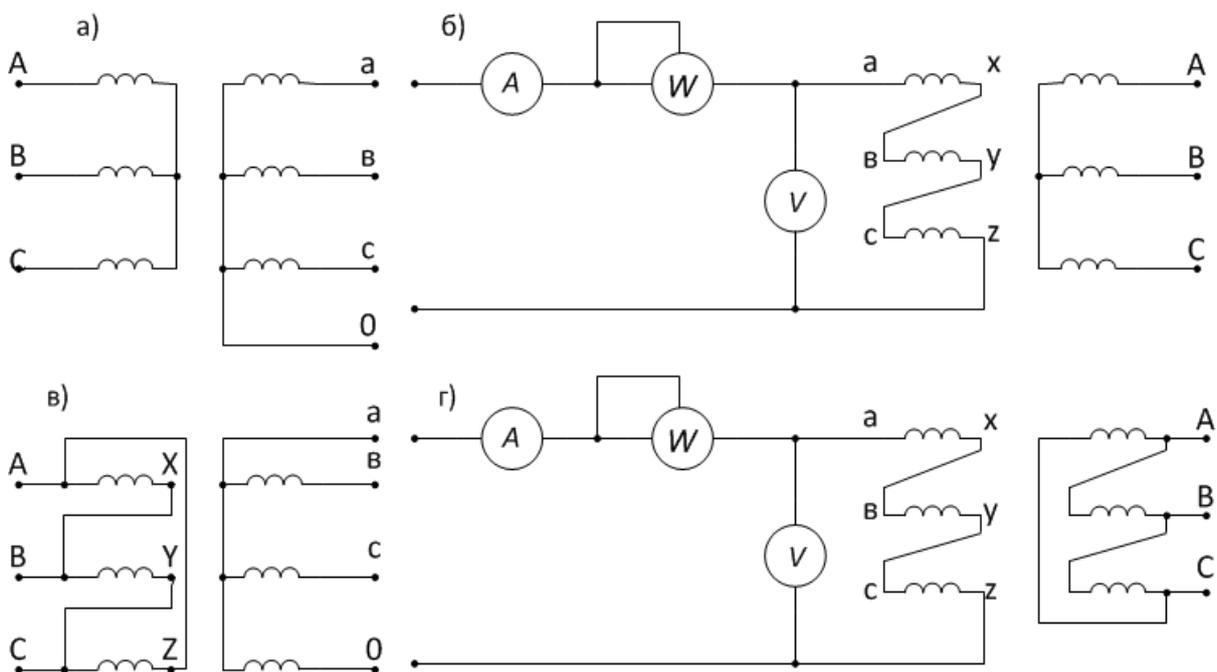
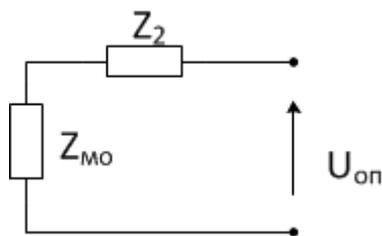


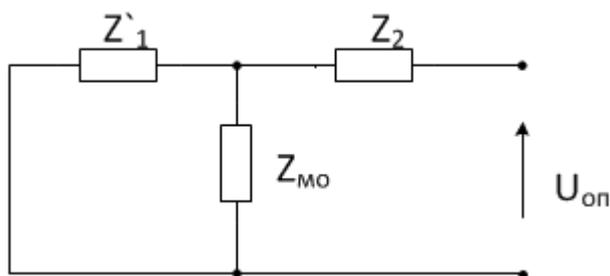
Рис. 6

1.3. Аналитическое исследование работы трансформатора при несимметричной нагрузке

Схемы замещения одной фазы трансформатора для токов нулевой последовательности:



а) при соединении обмоток по схеме Y/Y_н



б) при соединении обмоток по схеме Δ/Y

Рис.7

Задачей исследования является определение по заданным линейным первичным напряжениям и сопротивлениям нагрузки Z_a , Z_b , Z_c следующих величин:

1. Первичных фазных напряжений.
2. Первичных и вторичных токов.
3. Вторичных фазных и линейных напряжений.

С учетом замечания в п. 2 уравнения будем составлять для геометрической суммы токов и напряжений прямой и обратной последовательностей.

При исследовании пренебрегаем потерями в стали и намагничивающими токами, т.е. принимаем $I_0=0$. Здесь следует отметить, что при искажении фазных напряжений, особенно для групп однофазных трансформаторов, увеличивается насыщение магнитопроводов некоторых трансформаторов из группы и значительно возрастает намагничивающий ток. По этой причине в лабораторной работе возможно расхождение расчетных и экспериментальных данных.

Порядок составления уравнений для определения неизвестных токов и напряжений следующий:

- 1) для заданной схемы соединения обмоток трансформатора составляем схемы замещения прямой (обратной) и нулевой последовательностей.

Схема нулевой последовательности составляется тогда, когда хотя бы в одной обмотке имеются токи нулевой последовательности;

2) для каждой из схем замещения для всех фаз составляем по второму закону Кирхгофа уравнения электрического равновесия для первичной обмотки. Если ток нулевой последовательности протекает только по одной обмотке, как, например, в схеме Y/Y_n , то в первичной обмотке индуцируется ЭДС $E_{0п}$ (см. п. П 2,3), поэтому необходимо для этой обмотки составить дополнительные уравнения (см. уравнение 25);

3) если вторичная обмотка соединена треугольником, то выражаем линейные токи нагрузки через фазные токи вторичной обмотки;

4) записываем уравнения связи между фазными токами первичной и вторичной обмоток;

5) по исходной принципиальной схеме для каждой фазы записываем уравнения связи фазного напряжения вторичной обмотки, представляющего собой сумму симметричных составляющих, с падением напряжения в несимметричной нагрузке. Падение напряжения записываем как произведение суммы симметричных составляющих токов на сопротивление нагрузки;

6) решая полученную систему уравнений, определяем искомые неизвестные.

Уравнения по п. 3, 2, 4, 5 записываются для приведенного трансформатора.

Искомые неизвестные выражаются, как указывалось выше, по заданным линейным напряжениям или через фазные напряжения $U_{(a)}$, $U_{(b)}$, $U_{(c)}$, которые являются геометрической суммой фазных напряжений прямой и обратной последовательностей. Эти напряжения определяем по (3)

$$\begin{aligned}U_{(A)} &= \frac{U_{CA} - U_{AB}}{3} \\U_{(B)} &= \frac{U_{AB} - U_{BC}}{3} \\U_{(C)} &= \frac{U_{BC} - U_{CA}}{3}\end{aligned}\tag{12}$$

1.3.1. Соединение обмоток трансформатора по схеме Y/Д

Уравнения для получения расчетных формул составляем в соответствии с изложенной выше последовательностью.

1.3.1.1. По данной схеме соединения обмоток (рис. 8а) первичные и вторичные напряжения и токи не содержат нулевой последовательности, поэтому для расчета изображаем только лишь, — схему замещения прямой последовательности (рис. 8б).

1.3.1.2. Из схемы замещения на рис. 8б имеем

$$U_{(A)} = I_{(A)} \cdot Z_K - U_{(ab)}$$

$$U_{(B)} = I_{(B)} \cdot Z_K - U_{(bb)} \quad (13)$$

$$U_{(C)} = I_{(C)} \cdot Z_K - U_{(cb)}$$

1.3.1.3. Линейные токи в нагрузку выражаем через фазные по формулам

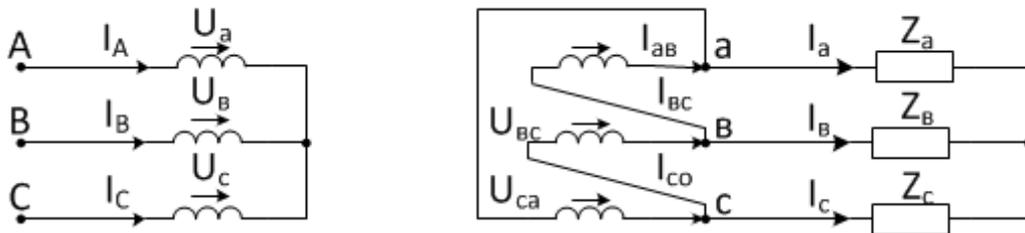
$$I_{(a)} = I_{(ab)} - I_{(ca)}$$

$$I_{(b)} = I_{(bc)} - I_{(ab)}$$

$$I_{(c)} = I_{(ca)} - I_{(bc)}$$
(14)

Схема соединения обмоток трансформатора и схема замещения

а)



б)

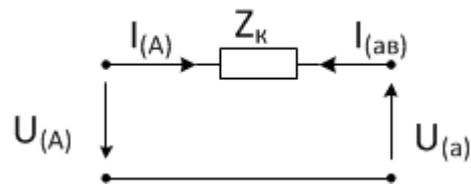
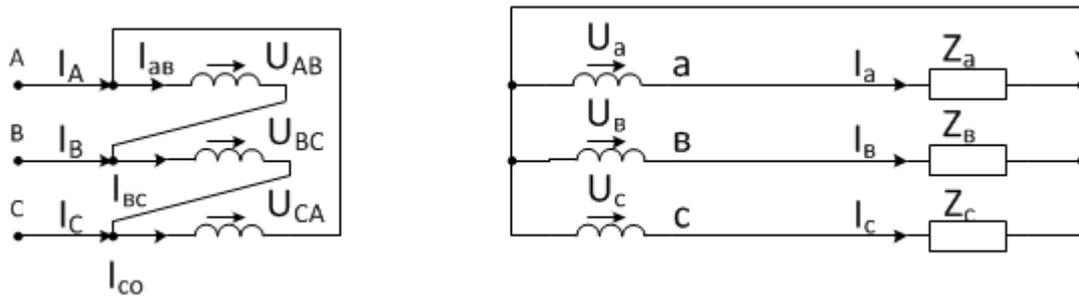


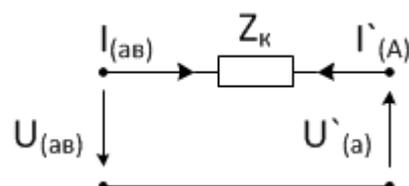
Рис.8

Схема соединения обмоток трансформатора Δ/Y_H и схемы замещения

а)



б)



в)

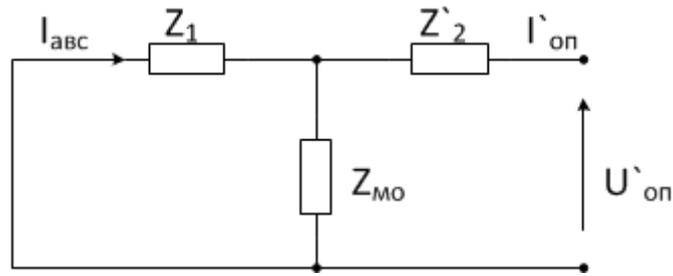
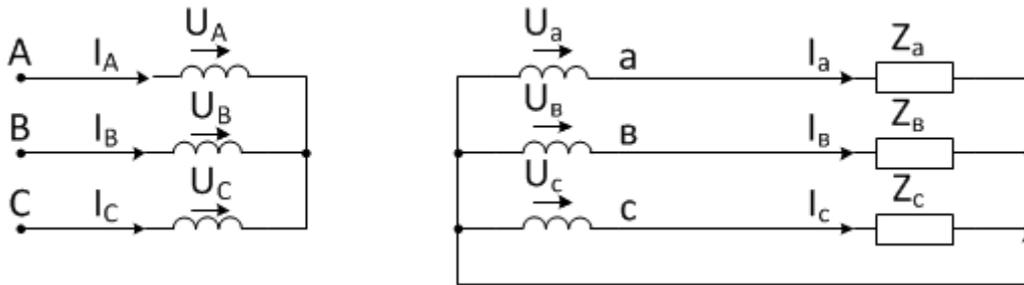


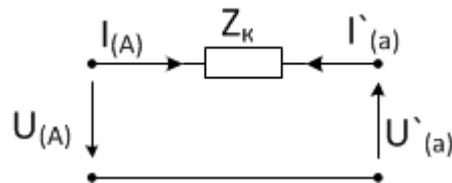
Рис.9

Схема соединения обмоток трансформатора Y/Y_н и схемы замещения

а)



б)



в)

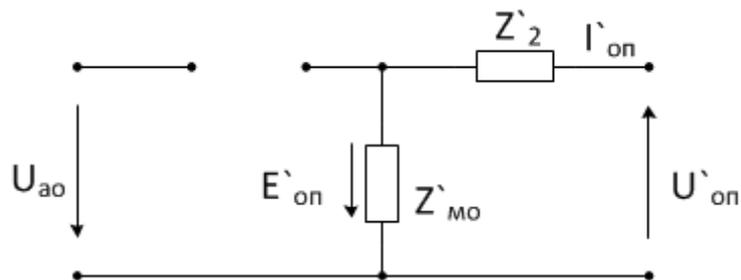


Рис. 10

1.3.1.4. Фазные напряжения вторичной обмотки в соответствии с рис. 8а равны

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_{(ab)} &= \dot{I}_{(a)} * \dot{Z}_a \\
 \dot{U}_{(bc)} &= \dot{I}_{(b)} * \dot{Z}_b \\
 \dot{U}_{(cb)} &= \dot{I}_{(c)} * \dot{Z}_c
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

1.3.1.5. Решая полученную систему уравнений относительно токов, получим

$$\begin{aligned}
I_{(A)} &= \frac{U_{(A)} * (Z_b' + 2 * Z_c' + Z_k) + U_{(B)} * (Z_b' - Z_a')}{\Delta} \\
I_{(B)} &= \frac{U_{(B)} * (Z_c' + 2 * Z_a' + Z_k) + U_C * (Z_c' - Z_b')}{\Delta} \\
I_{(C)} &= \frac{U_{(C)} * (Z_a' + 2 * Z_b' + Z_k) + U_A * (Z_a' - Z_c')}{\Delta},
\end{aligned} \tag{16}$$

где

$$\begin{aligned}
\Delta &= 3 * (Z_c' * Z_b' + Z_a' * Z_c' + Z_b' * Z_c') \\
&+ (Z_k * (Z_k + 2 * (Z_a' + Z_b' + Z_c')))
\end{aligned} \tag{17}$$

1.3.2. Соединение обмоток по схеме Δ/Y_n

1.3.2.1. Схема соединения обмоток приведена на рис. 9а, а схемы замещения на рис. 9б и 9в.

1.3.2.2. Из схемы замещения для прямой и обратной последовательностей

$$\begin{aligned}
U_{(AB)} &= I_{(AB)} * Z_k - U_{(a)}' \\
U_{(BC)} &= I_{(BC)} * Z_k - U_{(b)}' \\
U_{(CA)} &= I_{(CA)} * Z_k - U_{(c)}'
\end{aligned} \tag{18}$$

Из схемы замещения нулевой последовательности, если считать $Z_{m0} \gg Z_1$, имеем

$$\begin{aligned}
0 &= I_{ABC} * Z_k - U_{0п}' \\
0 &= I_{BC0} * Z_k - U_{0п}' \\
0 &= I_{CA0} * Z_k - U_{0п}'
\end{aligned} \tag{19}$$

1.3.2.3. Уравнения связи между токами первичной и вторичной обмоток

$$\begin{aligned}
I_{(AB)} &= -I_{(a)}' \\
I_{(BC)} &= -I_{(b)}' \\
I_{(CA)} &= -I_{(c)}'
\end{aligned} \tag{20}$$

1.3.2.4. Для схемы на рис. 9а приведенные фазные напряжения U_a' , U_b' , U_c' , представляющие геометрическую сумму напряжений всех последовательностей, определяются по формулам:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_a + \dot{U}_{0п} &= (\dot{I}_a + \dot{I}_{0п}) * \dot{Z}_a \\
 \dot{U}_b + \dot{U}_{0п} &= (\dot{I}_b + \dot{I}_{0п}) * \dot{Z}_b \\
 \dot{U}_c + \dot{U}_{0п} &= (\dot{I}_c + \dot{I}_{0п}) * \dot{Z}_c
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

1.3.2.5. Учитывая, что

$$\begin{aligned}
 I_{AB} &= I_{(AB)} + I_{ABC} \\
 I_{BC} &= I_{(BC)} + I_{BC0} \\
 I_{CA} &= I_{(CA)} + I_{CA0}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

а также то, что линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} содержат нулевой последовательности, т.е.

$$\begin{aligned}
 U_{AB} &= U_{(AB)} \\
 U_{BC} &= U_{(BC)} \\
 U_{CA} &= U_{(CA)}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

получим систему уравнений для определения фазных токов первичной обмотки. Решая систему уравнений (18–23) получим

$$\begin{aligned}
 I_{AB} &= \frac{U_{AB}}{\dot{Z}_a + Z_k} \\
 I_{BC} &= \frac{U_{BC}}{\dot{Z}_b + Z_k} \\
 I_{CA} &= \frac{U_{CA}}{\dot{Z}_c + Z_k}
 \end{aligned}
 \tag{24}$$

1.3.3. Соединение обмоток трансформатора по схеме Y/Y_n

1.3.3.1. Схема соединения обмоток приведена на рис. 10а, а схемы замещения на рис. 10б и 10в.

1.3.3.2. Из схем замещения имеем

$$\begin{aligned}
 U_A &= U_{(A)} - \dot{E}_{0п} \\
 U_B &= U_{(B)} - \dot{E}_{0п} \\
 U_C &= U_{(C)} - \dot{E}_{0п}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
 U_{(A)} &= I_{(A)} \cdot Z_k - \dot{U}_{(a)} \\
 U_{(B)} &= I_{(B)} \cdot Z_k - \dot{U}_{(b)} \\
 U_{(C)} &= I_{(C)} \cdot Z_k - \dot{U}_{(c)}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

$$\dot{E}_{0п} = \dot{U}_{0п} + \dot{I}_{0п} \cdot \dot{Z}_2
 \tag{27}$$

ЭДС нулевой последовательности определяем по (4).

1.3.3.3. Уравнение связи между токами первичной и вторичной обмоток:

$$\begin{aligned} I_A &= -\dot{I}_{(a)} \\ I_B &= -\dot{I}_{(b)} \\ I_C &= -\dot{I}_{(c)} \end{aligned} \quad (28)$$

1.3.3.4. Приведенные фазные напряжения вторичной обмотки в соответствии с рис. 10а:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{(a)} + \dot{U}_{0п} &= (\dot{I}_{(a)} + \dot{I}_{0п}) \cdot \dot{Z}_a \\ \dot{U}_{(b)} + \dot{U}_{0п} &= (\dot{I}_{(b)} + \dot{I}_{0п}) \cdot \dot{Z}_b \\ \dot{U}_{(c)} + \dot{U}_{0п} &= (\dot{I}_{(c)} + \dot{I}_{0п}) \cdot \dot{Z}_c \end{aligned} \quad (30)$$

1.3.3.5. Для решения систем уравнений (25–29) необходимо записать дополнительное уравнение, так как число неизвестных на единицу больше, чем уравнений. По первому закону Кирхгофа для первичной обмотки имеем

$$I_{(A)} + I_{(B)} + I_{(C)} = 0 \quad (31)$$

2.3.3.6. Решая уравнения (4, 25–30) относительно фазных токов первичной обмотки получим

$$\begin{aligned} I_{(A)} &= \frac{U_{(A)} + I_{0п} \cdot (Z_{0п} + Z_a)}{Z_a + Z_k} \\ I_{(B)} &= \frac{U_{(B)} + I_{0п} \cdot (Z_{0п} + Z_b)}{Z_b + Z_k} \\ I_{(C)} &= \frac{U_{(C)} + I_{0п} \cdot (Z_{0п} + Z_c)}{Z_c + Z_k} \end{aligned} \quad (32)$$

В (32) проводимости Y_A , Y_B , Y_C определяют по формулам

$$\begin{aligned} Y_A &= \frac{1}{Z_k + Z_a} \\ Y_B &= \frac{1}{Z_k + Z_b} \\ Y_C &= \frac{1}{Z_k + Z_c} \end{aligned} \quad (33)$$

Сопротивление $Z_{0п}$ определяем по формуле (9).

Примечание.

При проведении расчетов по формулам, приведенным в п. 1.4, необходимо иметь в виду следующее. Все формулы в п. 1.4 записаны в предположении, что к сети подключалась обмотка высокого напряжения (ВН) с индексами А, В, С. В лабораторных исследованиях к источнику питания будет подключаться как обмотка ВН, так и НН. Поэтому при аналитическом исследовании следует внимательно следить за приведением сопротивлений Z_k и $Z_{0п}$.

2. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе исследуются два типа генераторов:

1) трехфазный трехстержневой трансформатор типа ТСВМ–4–740М5;

2) трехфазная группа, состоит из трёх однофазных трансформаторов типа ОСМ–0,25УЗ.

Нерегулируемое линейное напряжение на стенде равно $220 \pm 5\% В$.

Для получения регулируемого трехфазного напряжения применяется индукционный регулятор, трехфазное первичное напряжение регулятора равно 220 В. Выходное напряжение регулятора изменяется в пределах от нуля до 220 В.

Измерение первичных фазных токов следует производить измерительным комплектом К505. Линейные напряжения, ток нагрузки и фазные напряжения на вторичной обмотке измерять щитовыми приборами. Номинальные значения этих измерительных приборов следует выбирать в зависимости от паспортных данных исследуемых трансформаторов. Эти данные приведены на заводских бирках, укрепленных на трансформаторах.

Дополнительные данные для расчетов следует определить из опытов холостого хода и короткого замыкания, которые проводились при температуре обмоток $t=20^\circ С$. В опыте холостого хода к источнику подключалась обмотка НН, а в опыте короткого замыкания ВН. В обоих случаях трансформаторы подключались по схеме Y/Y . Данные опытов приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Данные опытов холостого хода

Тип трансфор.	$U_{ав}$	$U_{вс}$	$U_{са}$	I_a	I_b	I_c	P_a	P_b	P_c
	В	В	В	А	А	А	Вт	Вт	Вт
ТСВМ	230	226	230	0,56	0,48	0,53	13	9	20
ОСМ	73	73	1,74	1,15	1,12	1,15	7,25	6	6,9

Данные опытов короткого замыкания

Тип трансфор.	U _{ав}	U _{вс}	U _{са}	I _а	I _в	I _с	P _а	P _в	P _с
	В	В	В	А	А	А	Вт	Вт	Вт
ТСВМ	9,8	9,8	10,2	6,1	6,9	6,3	31	30	34
ОСМ	16,8	17,5	17,5	1,1	1,05	1,17	10	10	11

В качестве нагрузки используются нагрузочные реостаты стенда для всех схем соединения обоих трансформаторов, за исключением схем Y/Y_n и Y/Δ группового трансформатора. В этом случае используются дополнительно два реостата $R=200$ Ом с допустимым током $I=1$ А.

Так как в лаборатории отсутствует сеть с линейным напряжением 380 В, то при проведении экспериментов для того, чтобы обеспечить номинальные напряжения на обмотках следует подключать к источнику, в зависимости от схемы соединения, обмотку ВН или НН. Так, например, для трансформатора ТСВМ при схеме соединения Δ/Y_n к источнику следует подключить обмотку ВН, а при схеме Y/Y_n обмотку НН. В обоих случаях фазное напряжение на обмотках в режиме холостого хода будет равно номинальному значению.

3. Предварительная подготовка к лабораторной работе

При выполнении лабораторной работы необходимо:

- 1) ознакомиться с лабораторной установкой и выписать паспортные данные трансформаторов;
- 2) изучить «сведения из теории»;
- 3) выполнить п. 4.1, 4.2;
- 4) используя данные расчета по п. 4.2, определить, какая из фаз наиболее перегружена по напряжению;
- 5) ознакомиться с заданием на экспериментальное исследование и составить принципиальные схемы для проведения экспериментов, для измерения фазных токов первичной обмотки использовать измерительный комплект К505. На схемах указать, какие обмотки ВН или НН подключены к источнику питания;
- 6) для каждого опыта составить таблицы для занесения данных;
- 7) в начале занятий или на консультации представить преподавателю для проверки подготовленные материалы.

Задание на аналитическое исследование

4.1. По данным табл. 2 определить Z_k , приведенное к обмоткам ВН и НН.

4.2. Для группового трансформатора при схеме соединения Y/Y_n , где к источнику подключена обмотка НН рассчитать фазные напряжения первичной обмотки в режиме однофазной нагрузки. Сопротивление нагрузки

R включить в фазу А и принять равным 500 Ом. Линейные напряжения на первичной обмотке номинальные. Сопротивление $Z_{0п}$ принять равным сопротивлению намагничивания прямой последовательности Z_m . Это сопротивление определить по данным табл. 1.

5. Задание на экспериментальное исследование

5.1. Собрать схемы и снять экспериментальные данные для определения сопротивления нулевой последовательности $Z_{0п}$ обоих трансформаторов при схемах соединения обмоток Y/Y_n и Δ/Y_n .

Для того, чтобы обеспечить номинальное насыщение магнитопроводов сердечников, у группового трансформатора к источнику подключить обмотку НН. Необходимо значение напряжения установить трехфазным регулятором. Произвести измерение.

5.2. Для трехстержневого и группового трансформаторов при соединении обмоток Y/Y_n , Δ/Y_n , Y/Δ и несимметричной нагрузке измерить фазные токи и линейные напряжения первичной обмотки, фазные напряжения на вторичной обмотке и ток нагрузки.

Нагрузку при соединении вторичной обмотки по схеме Y_n включить между фазой и нейтралью, а при соединении $-\Delta$ между двумя фазами.

Величина сопротивления нагрузки для группового трансформатора при соединении обмоток по схеме Y/Y_n должна быть такой, чтобы напряжение на фазе, которая определена в п. 3, не превышало номинального значения более, чем на 30%.

Для всех остальных случаев величину нагрузки выбрать такой, чтобы ток в обмотках был близок к номинальному, но не превышал его.

Дополнительные требования к содержанию отчета

1. Привести паспортные данные трансформаторов.
2. Записать основные расчетные формулы.
3. Привести данные аналитического исследования трансформаторов.
4. Нарисовать схемы замещения токов для прямой и нулевой последовательности.
5. По экспериментальным данным для схем построить диаграммы токов и напряжений.
6. В выводах по работе объяснить:
 - 1) почему отличаются сопротивления контура намагничивания трансформаторов ТР1 и ТР2
 - 2) для какой конструкции магнитопровода трансформатора недопустима схема соединений обмоток Y/Y_n и почему.

Вопросы для самопроверки.

1. Определить симметричные составляющие для заданной преподавателем несимметричной системы трехфазных, напряжений или токов.

2. Объясните; как определить параметры схемы замещения для токов прямой и обратной последовательностей. Привести формулы для расчета сопротивлений при соединении первичной обмотки в звезду и треугольник.

3. Составить систему уравнений для расчета токов и напряжений при соединении обмоток по схеме Y/Y_n .

4. Можно ли применять схемы соединений Y/Y_n – для трехфазной группы однофазных трансформаторов.

5. Чем обусловлено насыщение магнитопровода при несимметричной нагрузке и как оно отражается на работе потребителей при соединении обмоток трансформатора по схеме Y/Y_n .

6. Объяснить полную и упрощенную схемы замещения нулевой последовательности.

7. В мощных высоковольтных трансформаторах часто применяется схема соединения Y/Y_n . Какие конструктивные меры применяют для уменьшения искажений фазных напряжений (8)?

Лабораторная работа 2.10. Испытание автотрансформаторов

Автотрансформатором называют трансформатор, в котором кроме магнитной имеется электрическая связь между первичной и вторичной обмотками.

Автотрансформаторы получили широкое применение в высоковольтных сетях для связи между системами с близкими уровнями напряжения: ПО и 220; 220 и 500; 330 и 750 кВ.

Цель работы

Провести испытания однофазного и трехфазного автотрансформаторов.

Ознакомиться с особенностями их конструкции и эксплуатации.

Сведения из теории

В тех случаях, когда по условиям эксплуатации требуется передача электрической энергии с незначительным изменением напряжения и тока, экономичней применять автотрансформатор, у которого в отличие от обычного трансформатора обмотки связаны между собой не только магнитно, но и электрически. Автотрансформатор, как и трансформатор может быть понижающим (рис. 1а) и повышающим (рис. 1б). Если число витков между А и Х обозначить через W_1 , а число витков между А и Х – через W_2 , то в автотрансформаторе соотношение между напряжениями и токами получаются такими же, как в обычном трансформаторе

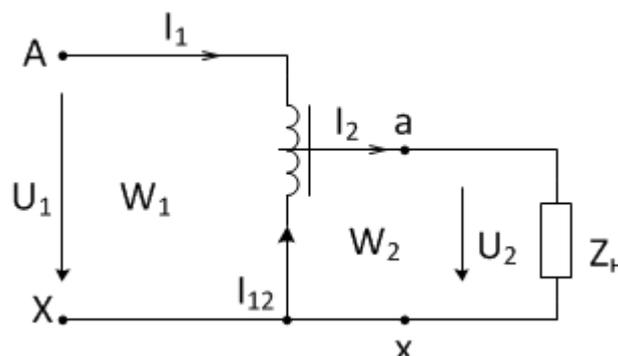
$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \approx \frac{W_1}{W_2} = K$$

По сравнению с трансформатором автотрансформатор имеет ряд особенностей, для выявления которых обратимся к рис. 1. Ток I_{12} , протекающий по обмотке а–х, равен геометрической сумме первичного и вторичного токов

$$I_{12} = -I_1 + I_2 \quad (2)$$

Однофазные автотрансформаторы

а) Понижающий



б) Повышающий

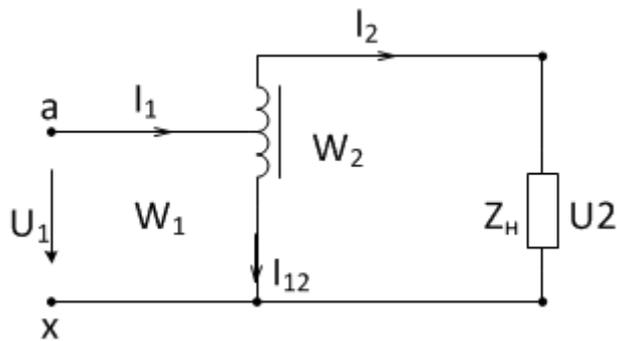
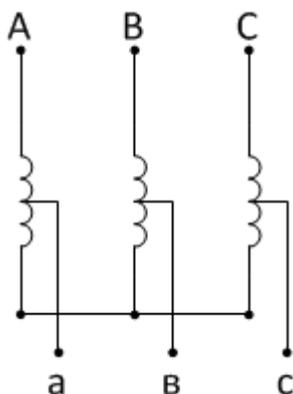


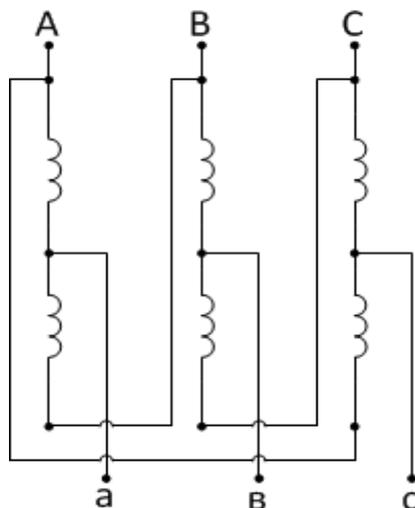
Рис.1

Трёхфазные автотрансформаторы

а) Соединение Y



б) Соединение Δ



Пренебрегая током холостого хода, можно считать, что токи I_1 и I_2 находятся в противофазе, и их геометрическая сумма равна арифметической разности. В понижающем автотрансформаторе $I_2 > I_1$ и

$$I_{12} = I_2 - I_1 \quad (3)$$

В повышающем $I_1 > I_2$ (рис. 1б) и

$$I_{12} = I_1 - I_2 \quad (4)$$

Дальнейший анализ будем проводить для понижающего автотрансформатора.

в) Соединение Δ с продолженными сторонами

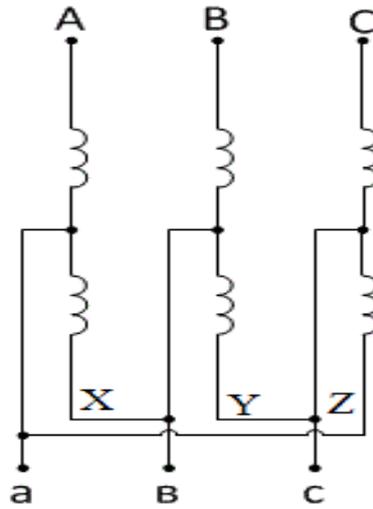


Рис. 2

Учитывая, что при допущении

$$I_0 = 0$$

$$I_1 = -I_2 \cdot \left(\frac{W_2}{W_1} \right)$$

получим

$$I_{12} = I_2 \cdot \left(1 - \left(\frac{W_2}{W_1} \right) \right) = I_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K} \right) \quad (5)$$

В автотрансформаторах обмотки А–а и а–х магнито уравновешены, т.е. их МДС равны и противоположно направлены, что видно из следующего:

$$I_{12} \cdot W_2 = I_2 \cdot \left(1 - \frac{W_2}{W_1} \right) \cdot W_2 = -I_1 \cdot (W_1 - W_2) \quad (6)$$

Решив уравнение (3) относительно I_2 и умножив полученное выражение на U_2 получим

$$I_2 \cdot U_2 = I_1 \cdot U_2 + I_{12} \cdot U_2 = I_1 \cdot U_2 + I_2 \cdot U_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K} \right) \quad (7)$$

или

$$S_2 = S_{эл} + S_{эм}, \quad (8)$$

где

S_2 – полная (номинальная) мощность автотрансформатора, поступающая из первичной сети во вторичную, и получившая название проходной мощности;

$S_{эл}$ – электрическая мощность автотрансформатора, поступающая из первичной сети во вторичную электрическим путем (передается по проводам);

$S_{эм}$ – электромагнитная мощность автотрансформатора, поступающая

из первичной сети во вторичную электромагнитным путем и получившая название расчетной мощности.

Таким образом, в автотрансформаторе часть мощности из первичной ВД вторичную цепь передается электрическим путем, часть электромагнитным.

Размеры автотрансформатора определяются мощностью, которая передается электромагнитным путем.

$$S_{эм} = S_2 - S_{эл} = S_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{K}\right) \quad (9)$$

Рассмотрим снижение расчетной мощности в автотрансформаторе по сравнению с двухобмоточным на примере понижающего автотрансформатора (рис. 1а). Обмотку, обтекаемую током первичной сети, рассчитывают на разностное напряжение первичной и вторичной сети, а не на полное напряжение, как в обычном трансформаторе. Соответственно обмотка, к которой приложено выходное напряжение, обтекается разностным током первичной и вторичной сети, а не полным током, как в обычном трансформаторе. Автотрансформаторы находят широкое применение для соединения высоковольтных электрических сетей для пуска двигателей переменного тока большой мощности, в схемах автоматики и т.д.

В автотрансформаторах за счёт уменьшения массы металла обмоток и стали магнитопровода по сравнению с трансформатором такой же номинальной мощности потери и изменение напряжения меньше, а КПД выше.

В то же время автотрансформатор по сравнению с трансформатором имеет ряд недостатков. Так напряжение к.з. автотрансформатора U_k авто меньше U_k обычного трансформатора поэтому ток к.з. автотрансформатора превышает во столько же раз ток к.з. трансформатора

$$\frac{U_{кавто}}{U_k} = \frac{1}{1 - \frac{1}{K}} \quad (10)$$

При использовании трехфазных автотрансформаторов его обмотки могут иметь те же соединения, что и трехфазные трансформаторы (рис. 2).

Наиболее распространенной схемой соединения обмоток трехфазных автотрансформаторов является звезда (рис. 2а). При этом для устранения третьих гармоник в потоках и Э.Д.С. фаз применяется третичная обмотка малой мощности с соединением в треугольник. Если при соединении обмоток треугольником требуется большее значение линейного коэффициента трансформации, то рекомендуют использовать схему треугольника с продолженными сторонами (рис. 2в).

Описание лабораторной установки

В работе проводилось исследование однофазного трансформатора (табл. 1) и трехфазного, в качестве которого использовался стандартный двухобмоточный трансформатор (табл. 2), соединенный по схеме автотрансформатора.

3. С учетом формул 1–7 по рассчитанным данным, приведенным в табл. 3 рассчитать коэффициент трансформации, полную S_2 , электрическую $S_{эл}$ и электромагнитную $S_{эм}$ мощности однофазного автотрансформатора.

Построить на графике 1 зависимости

$$\begin{aligned}S_2 &= f(K) \\S_{эл} &= f(K) \\S_{эм} &= f(K)\end{aligned}$$

4. По данным холостого хода ($I_2 = 0$) трехфазного автотрансформатора (табл. 4) рассчитать коэффициент трансформации и величину $U_{вс}$.

5. Рассчитать падение напряжения ΔU автотрансформатора при работе его под нагрузкой и построить график $\Delta U\% = f(U_2)$ Определить $U_{кавто}$ и сравнить его с паспортным значением двухобмоточного трансформатора.

6. Для схем соединений трехфазного автотрансформатора Y/Y . (рис. 2а и 3) и Δ/Δ (рис. 2б) построить диаграмму – напряжений и определить угол сдвига между одноименными линейными напряжениями высокой и низкой обмоток автотрансформатора.

Вопросы для самопроверки

1. Объяснить область применения автотрансформаторов
2. Что такое полная (проходная), электрическая и электромагнитная мощности автотрансформатора? Выведите формулу, устанавливающую связь между этими мощностями.
3. Почему автотрансформатор, имеющий точно такую же мощность, что и обычный трансформатор, имеет меньшую массу, меньшие потери и изменения напряжения, а КПД выше?
4. Во сколько раз электромагнитная (расчетная) мощность автотрансформатора меньше такой же мощности двухобмоточного трансформатора?
5. Почему при коротком замыкании обмотки (а–х) или (А–Х) (рис. 1а) наблюдается значительное перенасыщение магнитопровода автотрансформатора и увеличение его тока холостого хода?
6. Почему изоляция сети низкого напряжения автотрансформатора должна быть такой же, как и высокой?