

Иванов А.С., Коробков С.А., Кузьмичев В.А.,  
Орешкин Д.Н., Ширинский С.В.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Практикум

по курсу «Электрические машины»  
для студентов, обучающихся по направлению  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

2022

### **СОДЕРЖАНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Лабораторная работа № 1 ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....	9
Лабораторная работа № 2 ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ .....	17
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА .....	27
Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРА .....	33

## ВВЕДЕНИЕ

Силовой трансформатор (трансформатор) – это электрическая машина (аппарат), который осуществляет преобразование тока одного уровня напряжения в ток другого уровня напряжения той же частоты с обязательным выделением тепла.

Трансформаторы являются наиболее распространенными и энергоэффективными электрическими машинами. В энергосистеме на один киловатт установленной мощности генераторов приходится порядка десяти киловольтампер установленной мощности трансформаторов. Коэффициент полезного действия мощных трансформаторов достигает 98 %.

Трансформаторы используются для питания механизмов собственных нужд электростанций и подстанций и передачи электрической энергии от электростанций к потребителям по магистральным (классы напряжения 110...750 кВ) и распределительным (классы напряжения 6...110 кВ) электрическим сетям. Единая национальная электрическая сеть и распределительные сети Единой энергосистемы России находятся под управлением и обслуживаются ПАО «Россети».

Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт трансформаторов, установленных на объектах ЕЭС России, осуществляется в соответствии с требованиями:

- Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (утверждены 19.06.2003 Приказом № 229 Минэнерго России);

- Правил организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики (утверждены 25.10.2017 Приказом №1013 Минэнерго России).

Одной из форм контроля технического состояния трансформаторов в соответствии с требованиями указанных выше документов, является периодическое определение их параметров и характеристик путем проведения эксплуатационных испытаний. Их объем и сроки определены руководящим документом РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования. В ПАО «Россети» действует стандарт организации СТО ПАО «Россети» 34.01-23.1-001-2017 Объем и нормы испытаний электрооборудования.

Основы методик проведения основных эксплуатационных испытаний трансформаторов рассмотрены в лабораторных работах настоящего сборника.

Для проведения лабораторных работ используются стенды типа ТТНиСФ-СК производства ООО «ЛАБСИС». Стенды питаются от трехфазной сети напряжением 380 В.

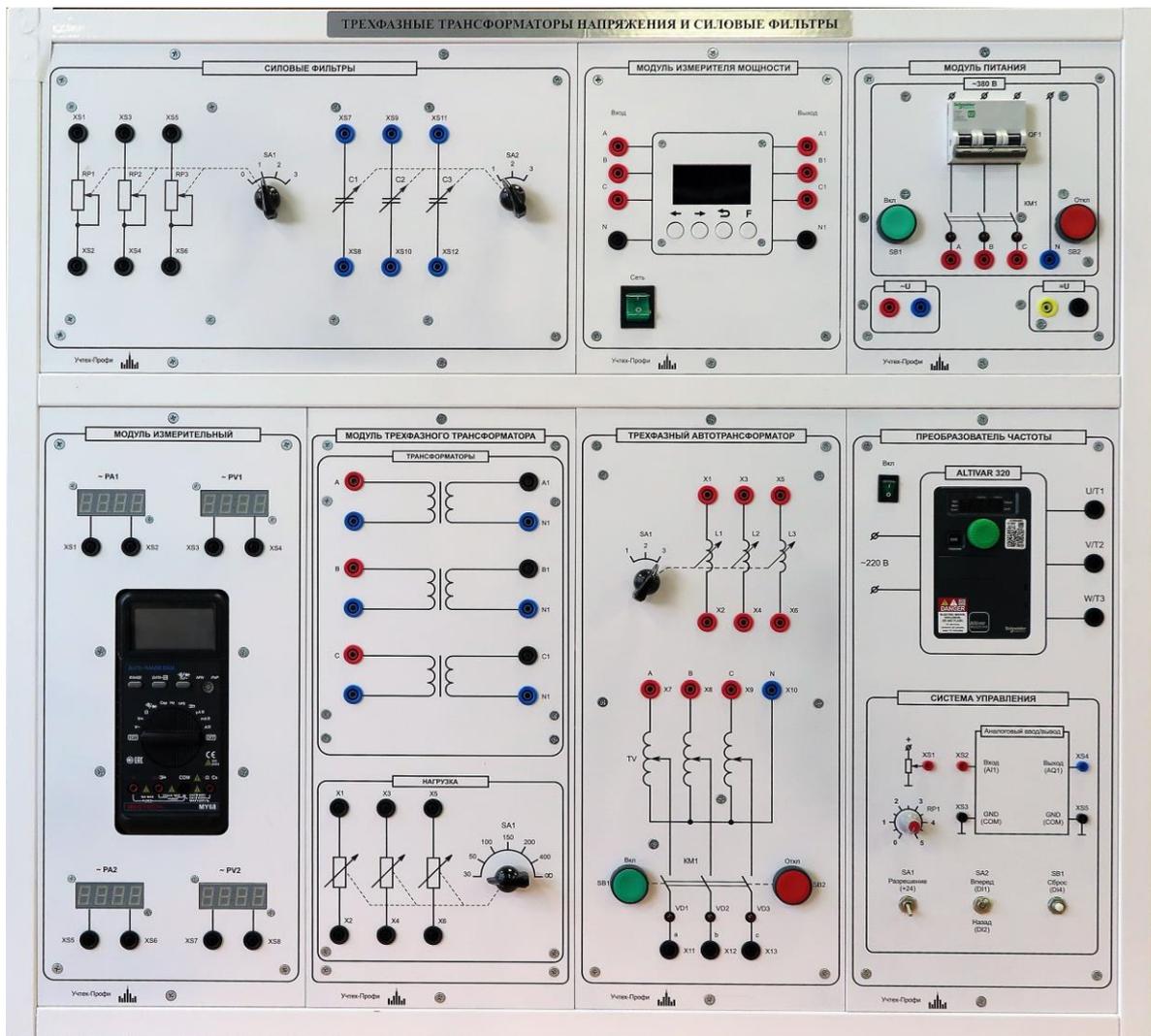


Рис. В.1. Общий вид лабораторного стенда

Объектами испытаний в лабораторных работах являются трехфазная группа однофазных трансформаторов типа ОСМ1-0,063-У3 и трехфазный автотрансформатор (ЛАТР) типа TSGC2-6. Номинальные данные однофазного трансформатора представлены в таблице В.1.

Таблица В.1 – Номинальные данные однофазных трансформаторов

Параметр	Трансформатор ОСМ1-0,063-У3
Мощность, ВА	63
Номинальное напряжение первичной обмотки, В	220
Номинальное напряжение вторичной обмотки, В	42
Активное сопротивление первичной обмотки $r_1$ при $t^\circ=20^\circ\text{C}$ , Ом	30,7

Активное сопротивление вторичной обмотки $r_2$ при $t^\circ=20^\circ\text{C}$ , Ом	2,2
---	-----

Автотрансформатор (ЛАТР) типа TSGC2-6 номинальной мощностью 6 кВА имеет номинальное входное напряжение 380 В, выходное напряжение меняется в диапазоне 0...430 В. Номинальный ток нагрузки 8 А.

В качестве нагрузки используются катушки индуктивности (дроссели) и активные сопротивления (резисторы). Их технические характеристики приведены в таблицах В.2, В.3.

Таблица В.2 – Технические характеристики катушек индуктивностей (дросселей)

Номинальный ток, А	1,4
Индуктивность, мГн	
- положение 1	80
- положение 2	160
- положение 3	240

Для измерения токов напряжений и мощностей используются Модуль измерения мощности, цифровой мультиметр МУ-68 и приборы индикации тока и напряжения. Их характеристики представлены в таблицах В4, В.5, В.6.

Таблица В.3 – Технические характеристики активных сопротивлений (резисторов)

Сопротивление, Ом	Допустимый продолжительный ток, А	Допустимый кратковременный ток, А
30	0,8	1,3
50	0,8	1,3
100	1,0	1,5
150	0,8	1,3
200	0,8	1,3
400	0,8	1,3

На цифровой экран модуля измерителя мощности могут быть выведены значения измеряемых первичных величин и вычисленные

значения связанных с ними параметров. Их список приведен в таблице В.7.

Таблица В.4 – Технические характеристики модуля измерителя мощности

Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность измерения. %
Напряжение	(30 ... 480) В	0,5
Ток	(0,05 ... 5) А	1,5
Частота	(45 ... 65) Гц	$\pm 0,1$ Гц
Активная мощность	(0 ... 2500) Вт	1,0
Полная мощность	(0 ... 2500) ВА	1,0
Реактивная мощность	(0 ... 2500) ВАр	1,0
Коэффициент мощности	(0 ... 1)	1,0

Таблица В.5 – Технические характеристики цифрового мультиметра МУ-68

Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность измерения. %
Напряжение постоянного тока	(0 ... 1000) В	$\pm 0,8$
Напряжение переменного тока	(0 ... 750) В	$\pm 1,5$
Постоянный ток	200 мА/400 мА 10 А	$\pm 1,2$ $\pm 2,0$
Переменный ток	200 мА/400 мА 10 А	$\pm 1,5$ $\pm 3,0$
Сопротивление	(0 ... 40) МОм	$\pm 3,0$

Таблица В.6 – Технические характеристики приборов индикации тока и напряжения

Прибор	Род тока	Диапазон измерений
PV1	переменный	(0 ... 500) В
PA1	переменный	(0 ... 5) А

PV2	переменный	(0 ... 500) В
PA2	переменный	(0 ... 5) А

Таблица В.7 – Список измеряемых первичных величин и параметров модуля измерителя мощности.

№	Обозначение	Измеряемая величина/ вычисляемый параметр	Единица измерения
0	$I_1$	Ток 1-го канала	А
1	$I_2$	Ток 2-го канала	
2	$I_3$	Ток 3-го канала	
3	$U_1$	Напряжение 1-го канала	В
4	$U_2$	Напряжение 2-го канала	
5	$U_3$	Напряжение 3-го канала	
6	$U_{12}$	Напряжение между каналами 1 и 2	
7	$U_{23}$	Напряжение между каналами 2 и 3	
8	$U_{31}$	Напряжение между каналами 3 и 1	
9	$P_1$	Активная мощность 1-го канала	Вт
10	$P_2$	Активная мощность 2-го канала	
11	$P_3$	Активная мощность 3-го канала	
12	$P$	Суммарная активная мощность	
13	$Q_1$	Реактивная мощность 1-го канала	ВАр
14	$Q_2$	Реактивная мощность 2-го канала	
15	$Q_3$	Реактивная мощность 3-го канала	
16	$Q$	Суммарная реактивная мощность	
17	$S_1$	Полная мощность 1-го канала	ВА
18	$S_2$	Полная мощность 2-го канала	
19	$S_3$	Полная мощность 3-го канала	
20	$S$	Суммарная полная мощность	

При выполнении лабораторных работ должны соблюдаться требования Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок (утв. Приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 15 декабря 2020 г. №903н).

Лабораторная работа № 1  
ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО  
ЗАМЫКАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА

Целью работы являются изучение методики определения коэффициента трансформации и методик проведения опытов холостого хода и короткого замыкания трехфазного двухобмоточного трансформатора.

### **Общие сведения**

Проведение опытов холостого хода и короткого замыкания трансформаторов предусмотрено РД 34.45-51.300-97 Объем и нормы испытаний электрооборудования при вводе в эксплуатацию, проведении текущих и капитальных ремонтов. Данный руководящий документ предписывает определение коэффициента трансформации, потерь холостого хода и сопротивления короткого замыкания и сравнение полученных значений с заводскими данными.

Кроме того, по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания можно определить: параметры схемы замещения, ток холостого хода, напряжение и потери короткого замыкания трансформатора. Их знание важно для расчета эксплуатационных характеристик (зависимостей вторичного напряжения и КПД при изменении нагрузки), а также расчета режимов работы трансформатора. Знание параметров схемы замещения необходимо для проверки цепей тока и напряжения главной схемы электрических соединений электрических станций и подстанций в процессе наладки их устройств релейной защиты, сетевой и противоаварийной автоматики.

### **Программа работы**

#### *1. Экспериментальные исследования*

1. Провести опыт короткого замыкания.
2. Провести опыт холостого хода.

#### *2. Обработка результатов эксперимента*

1. Для всех точек опыта короткого замыкания рассчитать коэффициент мощности первичной обмотки  $\cos\varphi_{1к}$ .
2. Построить характеристики короткого замыкания.
3. Рассчитать полное, активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания. Рассчитать напряжение короткого замыкания и его активную и реактивную составляющие.

4. Для всех точек опыта холостого хода рассчитать коэффициент мощности первичной обмотки  $\cos\varphi_0$ .
5. Построить характеристики холостого хода.
6. Рассчитать коэффициент трансформации и относительное значение тока холостого хода трансформатора. Рассчитать полное, активное и индуктивное сопротивления холостого хода.
7. Определить параметры Т-образной схемы замещения трансформатора.

### Пояснения и указания к работе

Перед проведением каждого из опытов работы надо привести модули в исходное состояние. Для этого при выключенном автоматическом выключателе  $QF1$  модуля питания стенда ручку трехфазного автотрансформатора установить в нулевое– крайнее левое положение против часовой стрелки.

Для проведения данной работы на персональном компьютере должно быть запущено программное обеспечение *DeltaProfi* и выбрана соответствующая лабораторная работа.

**Опыт короткого замыкания** проводится при пониженном напряжении первичной обмотки и замкнутых накоротко вторичных обмотках трансформатора.

Схема для проведения опыта короткого замыкания представлена на рис. 1.1.

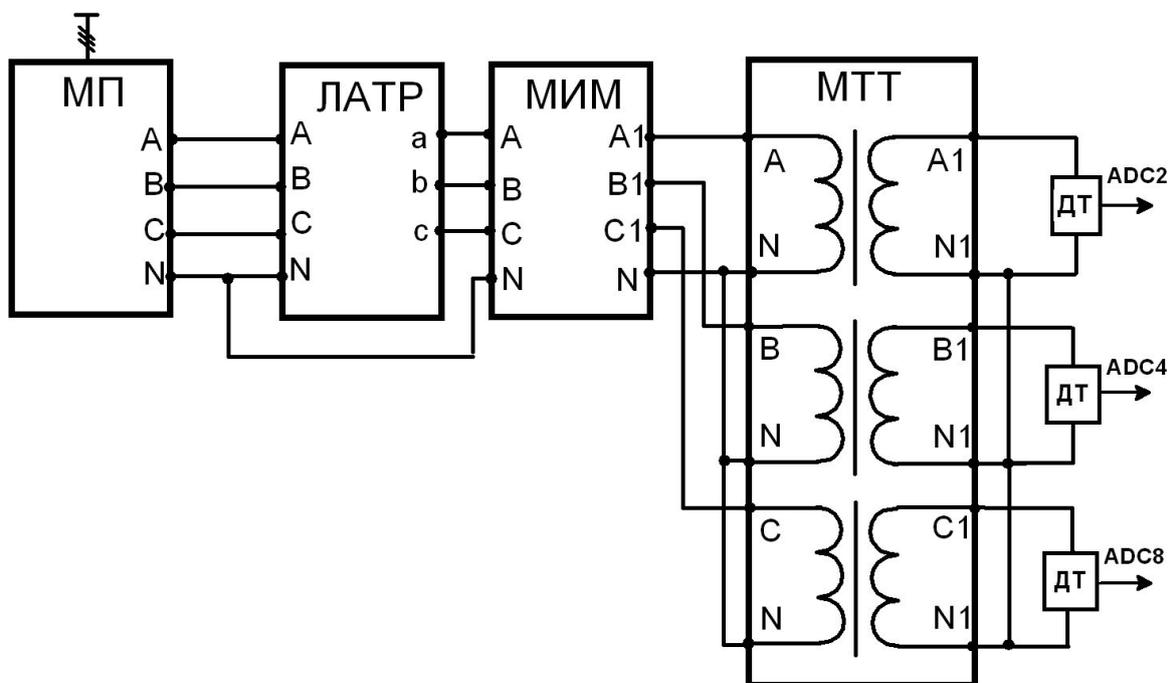


Рис.1.1. Схема проведения опыта короткого замыкания

Трехфазный групповой трансформатор собирается из трех трансформаторов модуля трехфазного трансформатора МТТ. Для этого объединяются выводы вторичных обмоток, обозначенные  $N_1$ . Первичная обмотка трехфазного трансформатора подключается через модуль измерителя мощности МИМ к выходам трехфазного автотрансформатора ЛАТР. Первичные обмотки трехфазного автотрансформатора подключаются к выводам трехфазного напряжения  $A, B, C, N$  модуля питания МП. Вторичные обмотки трансформатора замыкаются накоротко через датчики тока измерительного модуля.

Опыт короткого замыкания проводится в следующей последовательности:

- включить последовательно автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда и контактов  $KM1$  модуля питания;
- кнопкой  $SB1$  модуля трехфазного автотрансформатора включить контактор на выходе трехфазного автотрансформатора;
- поворотом ручки автотрансформатора установить такое напряжение, при котором ток первичной обмотки трансформатора примерно на 10...15% больше номинального тока первичной обмотки трансформатора;
- снять 7-10 точек характеристики короткого замыкания, постепенно уменьшая напряжение и фиксируя ток, напряжение и потребляемую мощность; среди прочего зафиксировать и точку с номинальным значением тока;
- данные опыта занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Данные опыта			Расчетные данные						
$U_{1фк}$	$I_{1фк}$	$P_{кф}$	$\cos\varphi_{1к}$	$z_k$	$r_k$	$x_k$	$u_k$	$u_{ка}$	$u_{кр}$
В	А	Вт		Ом	Ом	Ом	%	%	%

После проведения опыта выставить минимальное напряжение, повернув ручку автотрансформатора в крайнее левое положение против часовой стрелки, последовательно нажать кнопки «Откл.» модуля трехфазного автотрансформатора и модуля питания, отключить автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда.

В таблице 1.1 приняты следующие обозначения:

$U_{1фк}$  – фазное напряжение первичной обмотки при опыте КЗ, В;

$I_{1фк}$  – фазный ток первичной обмотки при опыте КЗ, А;

$P_{кф}$  – активная мощность, потребляемая одной фазой трансформатора при опыте КЗ, Вт.

Расчетные данные.

Коэффициент мощности при опыте короткого замыкания:

$$\cos \varphi_{1к} = \frac{P_{кф}}{U_{1фк} I_{1фк}}.$$

Полное, активное и индуктивное сопротивления трансформатора при опыте короткого замыкания (сопротивления должны быть приведены к температуре 75°):

$$z_k = \frac{U_{1фк}}{I_{1фк}}; r_k = \frac{P_{кф}}{I_{1фк}^2}; x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}.$$

Напряжение короткого замыкания в процентах и его активная и реактивная составляющие:

$$u_k = \frac{I_{1н} z_k}{U_{1н}} \cdot 100\%; u_{ка} = \frac{I_{1н} r_k}{U_{1н}} \cdot 100\%; u_{кр} = \frac{I_{1н} x_k}{U_{1н}} \cdot 100\%.$$

Параметры короткого замыкания и напряжение короткого замыкания рассчитываются один раз для точки, соответствующей номинальному значению тока.

Построить на одном графике характеристики короткого замыкания трансформатора  $U_{1фк} = f(I_{1фк})$ ,  $P_{кф} = f(I_{1фк})$ ,  $\cos \varphi_{1к} = f(I_{1фк})$ .

**Опыт холостого хода** проводится при номинальном напряжении первичной обмотки и разомкнутой вторичной обмотке трансформатора.

Схема для проведения опыта холостого хода представлена на рис. 1.2.

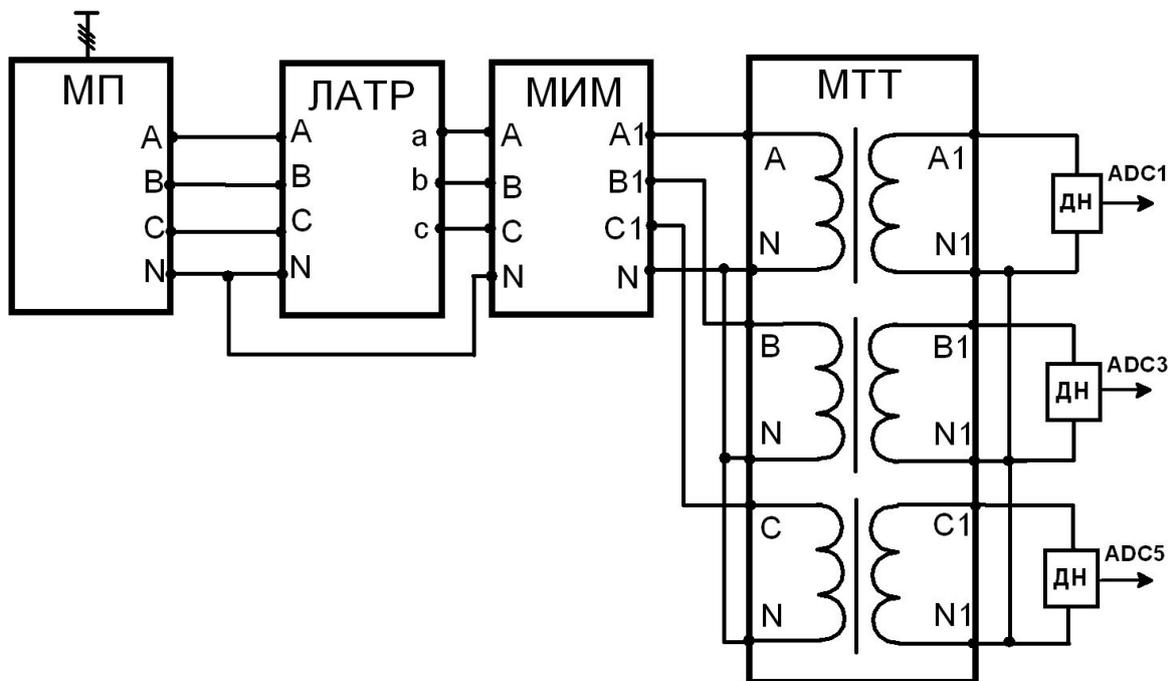


Рис.1.2. Схема проведения опыта холостого хода

Трехфазный трансформатор собирается из трех трансформаторов модуля трехфазного трансформатора МТТ. Для этого объединяются выводы вторичных обмоток, обозначенные  $N_1$ . Первичная обмотка трехфазного трансформатора подключается через модуль измерителя мощности МИМ к выходам трехфазного автотрансформатора ЛАТР. Первичные обмотки трехфазного автотрансформатора подключаются к выводам трехфазного напряжения  $A, B, C, N$  модуля питания МП.

Вторичные обмотки трансформатора остаются разомкнутыми. К выходам вторичных обмоток трехфазного трансформатора подключаются датчики напряжения модуля ввода-вывода.

Опыт холостого хода проводится в следующей последовательности:

- включить последовательно автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда и контактор  $KM1$  модуля питания;
- кнопкой  $SB1$  модуля трехфазного автотрансформатора включить контактор на выходе трехфазного автотрансформатора;
- рукояткой трехфазного автотрансформатора задать напряжение первичной обмотки на 10% больше номинального напряжения;
- снять 7-10 точек характеристики холостого хода, постепенно уменьшая напряжение и фиксируя ток, напряжения первичной и вторичной обмоток и потребляемую мощность; среди прочего зафиксировать и точку с номинальным значением напряжения;
- данные опыта занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2.

Данные опыта				Расчетные данные					
$U_{1\phi 0}$	$I_{1\phi 0}$	$P_{0\phi}$	$U_{2\phi 0}$	$\cos\varphi_0$	$k$	$z_0$	$r_0$	$x_0$	$I_0^*$
В	А	Вт	В			Ом	Ом	Ом	

После проведения опыта выставить минимальное напряжение, повернув ручку автотрансформатора в крайнее левое положение против часовой стрелки, последовательно нажать кнопки «Откл.» модуля трехфазного автотрансформатора и модуля питания, отключить автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда.

В таблице 1.2 приняты следующие обозначения:

$U_{1\phi 0}$  – первичное фазное напряжение холостого хода, В;

$I_{1\phi 0}$  – фазный ток холостого хода, А;

$P_{0\phi}$  – активная мощность, потребляемая одной фазой трансформатора при опыте холостого хода, Вт.

$U_{2\phi 0}$  – вторичное фазное напряжение на холостом ходу, В;

Расчетные данные.

Коэффициент трансформации трансформатора:

$$k = \frac{U_{1\phi 0}}{U_{2\phi 0}}.$$

Коэффициент мощности при опыте холостого хода трансформатора:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{0\phi}}{U_{1\phi 0} I_{1\phi 0}}.$$

Относительное значение тока холостого хода трансформатора (в долях от номинального тока первичной обмотки трансформатора):

$$I_0^* = \frac{I_0}{I_{1н}}.$$

Полное, активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания Т-образной схемы замещения трансформатора

$$z_0 = \frac{U_{1\phi 0}}{I_{1\phi 0}}; r_0 = \frac{P_{0\phi}}{I_{1\phi 0}^2}; x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Параметры холостого хода и относительное значение тока холостого хода рассчитываются один раз для точки, соответствующей номинальному значению напряжения.

Построить на одном графике характеристики холостого хода трансформатора  $I_{1\phi 0} = f(U_{1\phi 0})$ ,  $P_{0\phi} = f(U_{1\phi 0})$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_{1\phi 0})$ .

## Контрольные вопросы

Основные вопросы для защиты

1. Как определить коэффициент трансформации экспериментальным путем? Приведите схему опыта. Можно ли определять коэффициент трансформации при напряжении, отличающемся от номинального?

2. В чем заключается опыт холостого хода трансформатора? По какой схеме он проводится? Опишите порядок проведения опыта.

3. При проведении опыта холостого хода первичной является обмотка НН. Можно ли в качестве первичной использовать обмотку ВН? Как при этом изменяется напряжение, ток и мощность потерь холостого хода, если в том и другом случае подвести к трансформатору соответствующее номинальное напряжение?

4. Как определить ток холостого хода по показаниям трех амперметров для стержневого трансформатора с несимметричной магнитной системой? Почему могут отличаться фазные токи в этом случае?

5. Какой вид имеет схема замещения трансформатора для режима холостого хода? В чём её отличие от полной схемы замещения? Как определить параметры схемы замещения по данным опыта холостого хода?

6. В чем заключается опыт короткого замыкания трансформатора? По какой схеме он проводится? Опишите порядок проведения опыта.

7. В каких частях трансформатора возникают потери при опыте короткого замыкания? Какие из них составляют большую часть потерь короткого замыкания? Какие меры применяют в трансформаторах для уменьшения потерь короткого замыкания?

8. Какой вид имеет схема замещения трансформатора для режима короткого замыкания? В чём её отличие от полной схемы замещения? Как определить параметры схемы замещения по данным опыта короткого замыкания?

9. Как привести активную составляющую и полное сопротивление короткого замыкания к средней эксплуатационной температуре  $+75^{\circ}\text{C}$ ?

10. Опишите конструкцию трехфазного трансформатора? Объясните устройство магнитопровода. Какие бывают варианты конструкции магнитопроводов трёхфазных трансформаторов?

11. Как устроены однофазные трансформаторы стержневого и броневые типы?

12. Какие материалы используются для изготовления магнитопроводов трансформаторов? Какие требования предъявляются к этим материалам? Для чего магнитопроводы делают шихтованными?

Дополнительные вопросы для защиты

1. Что такое коэффициент трансформации?

2. Чем отличается фазный коэффициент трансформации от линейного?

3. Как определить фазный и линейный коэффициенты трансформации расчетным путем?

4. Что называется опытом холостого хода трансформатора?

5. Какие потери преобладают в режиме холостого хода?

6. Что называется током холостого хода трансформатора? В каких единицах он выражается?

7. Что называется потерями холостого хода трансформатора? В каких единицах они выражаются?

8. Изобразите схему замещения трансформатора, обозначьте элементы.

9. Что называется опытом короткого замыкания трансформатора?

10. Что называется напряжением короткого замыкания трансформатора? В каких единицах оно выражается?

11. Что называется сопротивлением короткого замыкания трансформатора?

12. Какие потери преобладают в режиме короткого замыкания?

13. При проведении опыта короткого замыкания фазный ток первичной обмотки равен номинальному. Что покажет амперметр,

включенный в фазу вторичной обмотки?

14. Что называется изменением напряжения двухобмоточного трансформатора? В каких единицах оно выражается?

15. Почему магнитопровод трансформатора выполняют шихтованным?

16. Почему магнитопровод трансформатора выполняют из листов электротехнической стали? Каковы ее свойства?

17. Из каких материалов изготавливаются обмотки трансформаторов? Каковы достоинства и недостатки применения каждого из них?

18. Какие виды потерь возникают в трансформаторе?

### **Литература**

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§§ 1.3; 1.4; 2.6; 2.7; 3.1; 3.2; 3.3; 3.4; 3.5; 3.6)

2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§§ 2.4; 2.5; 2.6; 2.10)

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2017. (§§ 5.1; 5.2; 6.1; 6.2; 6.3)

## Лабораторная работа № 2 ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Целями работы являются получение практических навыков определения групп соединения обмоток трехфазных трансформаторов и изучение условий их включения на параллельную работу.

### Общие сведения

При эксплуатации трансформаторов часто возникает необходимость в параллельном включении двух или нескольких из них.

Необходимость параллельной работы трансформаторов обусловлена следующими причинами:

- суточными и сезонными изменениями нагрузки;
- необходимостью обеспечения надежности питания потребителей при аварийных ситуациях и проведении регламентных ремонтов оборудования электрических станций и сетей;
- невозможностью изготовить и доставить на место установки трансформатор мощностью, которую необходимо передать потребителю.

При параллельной работе первичные обмотки трансформаторов подключаются к общим сборным шинам питающей сети, вторичные – к общим сборным шинам нагрузки.

Для включения на параллельную работу необходимо соблюдение следующих трех условий

- первичные и вторичные номинальные напряжения трансформаторов должны быть соответственно равны, что практически сводится к требованию равенства коэффициентов трансформации;
- трансформаторы должны иметь одну и ту же группу соединения;
- напряжения короткого замыкания трансформаторов должны быть одинаковы.

При их соблюдении у параллельно включенных трансформаторов нагрузка будет распределяться пропорционально их номинальным мощностям.

Если при включении на параллельную работу не соблюдены первое и второе условия, то в обмотках трансформаторов возникают уравнивающие токи, которые в отдельных случаях особенно при несовпадении групп могут достигать величины тока короткого замыкания.

Несоблюдение третьего условия приводит к тому, что нагрузка распределяется между трансформаторами не пропорционально их номинальным мощностям. Поскольку нагрузка каждого из параллельно работающих трансформаторов не должна превышать его номинальную мощность, несоблюдение третьего условия приводит к снижению

суммарной допустимой мощности параллельно работающих трансформаторов против суммы их номинальных мощностей

## **Программа работы**

### ***1. Экспериментальные исследования***

1. Опытным путем определить коэффициент трансформации  $K_T$ .
2. Рассчитать междуфазные напряжения для различных групп соединения.
3. Провести опытное определение группы соединения методом вольтметра для следующих групп схемы «звезда/звезда»: 0, 2, 4, 6, 8, 10.
4. Провести опытное определение группы соединения методом вольтметра для следующих групп схемы «звезда/треугольник»: 1, 3, 5, 7, 9, 11.
5. Включить на параллельную работу два однофазных двухобмоточных трансформатора. Снять внешнюю характеристику параллельно работающих трансформаторов  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = \text{Const}$ ,  $\cos\varphi_2 = \text{Const}$  и распределение токов между трансформаторами.

### ***2. Обработка результатов эксперимента***

1. Построить в масштабе совмещенные диаграммы линейных напряжений обеих обмоток для схем и групп, указанных преподавателем.
2. Сравнить напряжения, полученные при опытном определении групп соединения, с расчетными значениями.
3. Построить внешнюю характеристику параллельно работающих трансформаторов  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = \text{Const}$ ,  $\cos\varphi_2 = \text{Const}$ .
4. Построить зависимости:  $U_2 = f(I_1)$ ,  $U_2 = f(I_{21})$ ,  $U_2 = f(I_{22})$  при  $U_1 = \text{Const}$ .

## **Пояснения и указания к работе**

В данной работе используется групповой трехфазный трансформатор на основе трех однофазных трансформаторов. Параметры трансформаторов приведены во введении.

### ***Опытное определение групп соединения обмоток трансформатора***

Группа соединения обмоток трансформатора определяется углом сдвига между одноименными линейными первичными и вторичными электродвижущими силами.

Группа соединений зависит от направления намотки обмоток трансформатора, маркировки его зажимов и схемы соединений обмоток. У трехфазных трансформаторов возможны 12 групп соединений обмоток: при одинаковых схемах соединений первичной и вторичной обмоток

имеют место четные группы, а при неодинаковых схемах соединений — нечетные группы.

Опытное определение группы соединений обмоток трансформатора можно осуществлять различными методами:

- методом гальванометра;
- методом фазометра;
- методом вольтметра.

В лабораторной работе будет использован метод вольтметра.

Сущность метода вольтметра заключается в том, что величины напряжений между первичными и вторичными зажимами трансформатора находятся в определенной зависимости от коэффициента трансформации линейных напряжений и групп соединений обмоток трансформатора.

***Опытное определение групп соединения обмоток трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда/звезда»***

Схема электрическая для определения групп соединений обмоток трансформатора представлена на рисунке 2.1.

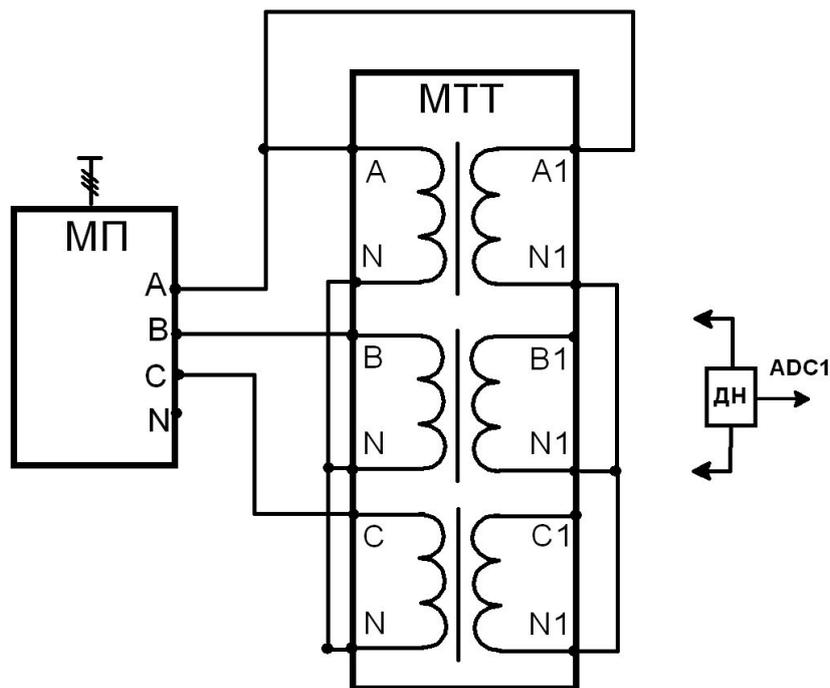


Рисунок 2.1 — Схема электрическая для определения групп соединений обмоток трансформатора

Опыт проводится в следующей последовательности:

- соединить трансформаторы по схеме «звезда/звезда», первичные обмотки подключить на сетевое напряжение модуля питания;

- соединить зажимы А и А1 первичной и вторичной обмоток.
- последовательно включить автоматический выключатель QF1 модуля питания стенда и кнопку «SB1» модуля питания;
- с помощью вольтметра измерить первичное и вторичное линейные напряжения. В качестве вольтметра используется датчик напряжения модуля ввода/вывода;
- определить коэффициент трансформации  $K_T$ :

$$K_T = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}}$$

где  $U_{1Л}$  - линейное напряжение первичной обмотки, В;

$U_{2Л}$  - линейное напряжение вторичной обмотки, В.

- измерить напряжения  $U_{B1B}$ ,  $U_{B1C}$ ,  $U_{C1B}$  и  $U_{C1C}$ .

Данные занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

	$U_{AB}$	$U_{A1B1}$	$K_T$	$U_{B1B}$	$U_{B1C}$	$U_{C1B}$	$U_{C1C}$	$U$
Опыт								
Расчет								
Группа соединения								

Измеренные напряжения в зависимости от групп соединения должны быть больше («Б»), равны («Р») или меньше («М») напряжения, определяемого по формуле:

$$U = U_{2Л} \cdot \sqrt{1 + K_T^2}$$

где  $U_{2Л}$  - вторичное линейное напряжение, В.

После сравнения измеренных напряжений с величиной  $U$  согласно указанным в таблице 2.2 соотношениям определяют группу соединений обмоток и проверяют результат по точным формулам, приведенных в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Группа	Фаза	Схемы соедин-я	$U_{B1B} \approx U_{C1C}$	$U_{B1C}$	$U_{C1B}$
1	30°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$< U_{2Л} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_T + K_T^2}$	$< U_{2Л} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_T + K_T^2}$	$= U_{2Л} \sqrt{1 + K_T^2}$
2	60°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$< U_{2Л} \sqrt{1 - K_T + K_T^2}$	$< U_{2Л} (K_T - 1)$	$> U_{2Л} \sqrt{1 + K_T + K_T^2}$
3	90°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$= U_{2Л} \sqrt{1 + K_T^2}$	$< U_{2Л} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_T + K_T^2}$	$> U_{2Л} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_T + K_T^2}$

4	120°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$> U_{2л} \sqrt{1 + K_T + K_T^2}$	$< U_{2л} \sqrt{1 - K_T + K_T^2}$	$> U_{2л} (K_T + 1)$
5	150°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$> U_{2л} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_T + K_T^2}$	$= U_{2л} \sqrt{1 + K_T^2}$	$> U_{2л} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_T + K_T^2}$
6	180°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$> U_{2л} (K_T + 1)$	$> U_{2л} \sqrt{1 + K_T + K_T^2}$	$> U_{2л} \sqrt{1 + K_T + K_T^2}$
7	210°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$> U_{2л} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_T + K_T^2}$	$> U_{2л} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_T + K_T^2}$	$= U_{2л} \sqrt{1 + K_T^2}$
8	240°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$> U_{2л} \sqrt{1 + K_T + K_T^2}$	$> U_{2л} (K_T + 1)$	$< U_{2л} \sqrt{1 - K_T + K_T^2}$
9	270°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$= U_{2л} \sqrt{1 + K_T^2}$	$> U_{2л} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_T + K_T^2}$	$< U_{2л} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_T + K_T^2}$
10	300°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$< U_{2л} \sqrt{1 - K_T + K_T^2}$	$= U_{2л} \sqrt{1 - K_T + K_T^2}$	$< U_{2л} (K_T - 1)$
11	330°	Y/Δ Δ/Y Y/Z	$< U_{2л} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_T + K_T^2}$	$= U_{2л} \sqrt{1 + K_T^2}$	$< U_{2л} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_T + K_T^2}$
0	0°	Y/Y Δ/Δ Δ/Z	$< U_{2л} (K_T - 1)$	$< U_{2л} \sqrt{1 - K_T + K_T^2}$	$< U_{2л} \sqrt{1 - K_T + K_T^2}$

После проведения опыта отключить модуль питания (кнопка «SB2») и автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда.

***Опытное определение групп соединения обмоток трансформатора при соединении обмоток по схеме «звезда/треугольник»***

Схема электрическая для определения групп соединений обмоток трансформатора представлена на рисунке 2.2.

Повторить опыт аналогично п. 1.2 данной лабораторной работы и заполнить таблицу, аналогичной таблице 2.1. После проведения опыта отключить модуль питания (кнопка «SB2») и автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда.

Определение групп соединений обмоток трансформаторов следует произвести у обоих модулей трехфазного трансформатора лабораторного стенда.

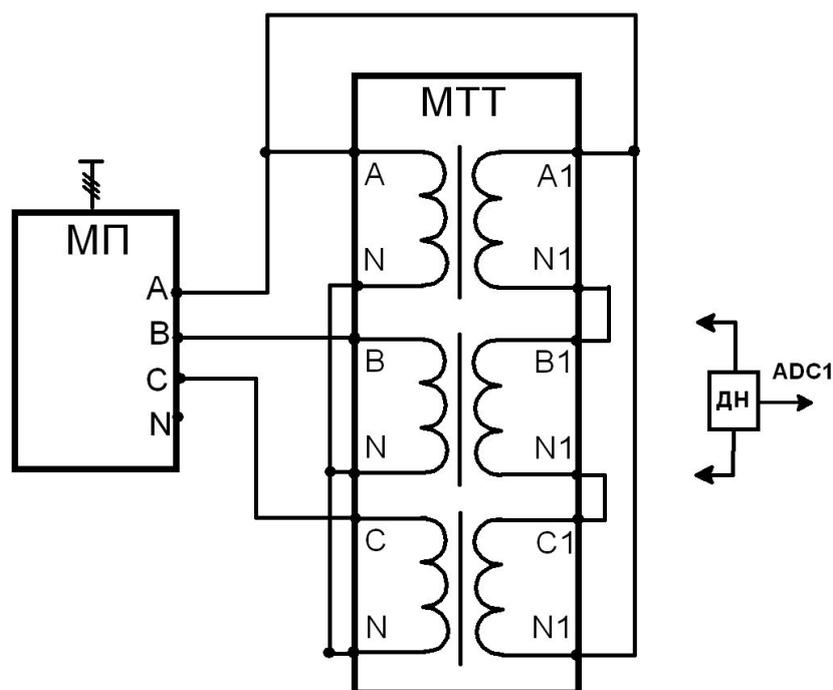


Рисунок 2.2 - Схема электрическая для определения групп соединений обмоток трансформатора

### ***Исследование параллельной работы двух однофазных двухобмоточных трансформаторов.***

Перед проведением каждого из опытов работы необходимо привести модули в исходное состояние. Для этого при выключенном автоматическом выключателе *QF1* модуля питания стенда:

- установить переключатель *SA1* модуля трехфазного трансформатора в положение «∞»;
- установить рукоятку трехфазного автотрансформатора в крайнее положение против часовой стрелки.

В работе используются однофазные двухобмоточные трансформаторы, паспортные данные которых приведены во Введении.

Для проведения данной работы удобно использовать компьютер, подключенный к стенду через модуль ввода-вывода. Для измерения токов и напряжений на компьютере должно быть запущено ПО *DeltaProfi* и выбрана соответствующая лабораторная работа.

Для достижения наилучших условий параллельной работы трансформаторов необходимо, чтобы общая нагрузка распределялась между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям. Такое распределение достигается при следующих условиях:

- равные первичные и вторичные номинальные напряжения;
- равные напряжения короткого замыкания.

Соблюдение первого условия означает, что вторичные напряжения параллельно включенных трансформаторов на холостом ходу будут равны по величине и по фазе, а также будет отсутствовать уравнивающий ток в обмотках. Соблюдение второго условия обеспечивает равномерное распределение нагрузки между трансформаторами.

В данной лабораторной работе соблюдаются оба условия параллельной работы.

Внешние характеристики представляют собой зависимости вторичного напряжения трансформатора от тока нагрузки  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = U_{1H} = \text{Const}$ ;  $\cos\varphi_2 = \text{Const}$ . Схема для исследования параллельной работы двух однофазных трансформаторов представлена на рис. 2.3.

Первичные обмотки двух однофазных трансформаторов модуля трехфазного трансформатора соединяются параллельно и подключаются через датчики тока и напряжения модуля ввода/вывода к регулируемому выходу переменного напряжения модуля трехфазного автотрансформатора, который, в свою очередь, запитывается от модуля питания нерегулируемым фазным напряжением 220В.

Вторичные обмотки однофазных трансформаторов соединяются параллельно, при этом для контроля токов в каждую обмотку включается датчик тока модуля ввода/вывода. Для контроля напряжения к включенным в параллель вторичным обмоткам подключается датчик напряжения модуля ввода/вывода.

Соединенные в параллель вторичные обмотки трансформаторов подключаются на регулируемые активные сопротивления модуля трехфазного трансформатора через измеритель мощности.

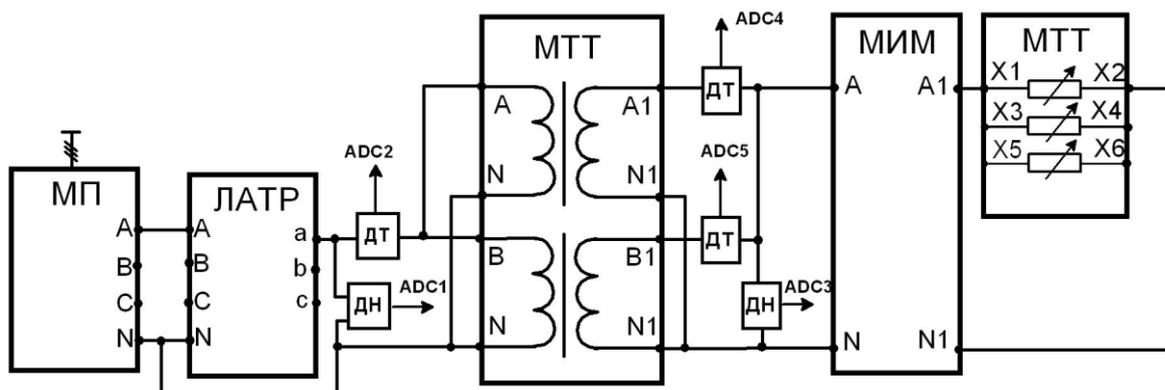


Рисунок 2.3 – Схема для исследования параллельной работы двух однофазных трансформаторов

Опыт проводится в следующей последовательности:

- переключатель *SA1* модуля трехфазного трансформатора установить в положение «∞»;

- включить последовательно автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда и контактор КМ1 модуля питания;
- кнопкой *SB1* модуля трехфазного автотрансформатора включить контактор на выходе автотрансформатора;
- рукояткой трехфазного автотрансформатора задать номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора;
- изменяя положение переключателя *SA1* модуля трехфазного трансформатора увеличивать нагрузку до тех пор, пока ток нагрузки приблизительно не будет равен номинальному току. В каждом из положений переключателя фиксируются показания измерительных приборов.

Данные опыта занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

$I_1$	$U_1$	$I_{21}$	$I_{22}$	$I_2$	$U_2$

После проведения опыта ручку автотрансформатора установить в крайнее положение против часовой стрелки, последовательно нажать кнопки «Откл» модуля трехфазного автотрансформатора и модуля питания, отключить автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда.

В табл. 2.3 приняты следующие обозначения:

$I_1$  - ток в первичной цепи, А;

$U_1$  - напряжение в первичной цепи, В;

$I_{21}$  - ток вторичной обмотки трансформатора 1, А;

$I_{22}$  - ток вторичной обмотки трансформатора 2, А;

$I_2$  - ток нагрузки, А;

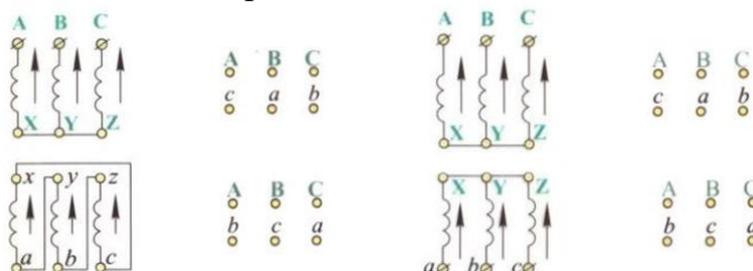
$U_2$  - напряжение на нагрузке, В.

По данным таблицы 2.3 построить следующие зависимости:  $U_2 = f(I_1)$ ,  $U_2 = f(I_{21})$ ,  $U_2 = f(I_{22})$  при  $U_1 = \text{Const}$ .

## Контрольные вопросы

### Основные вопросы для защиты

1. Определите группу соединения трёхфазного трансформатора по заданной преподавателем схеме соединения обмоток. Объясните порядок построения векторной диаграммы.



2. Как изменится напряжение короткого замыкания трёхобмоточного трансформатора, у которого на параллельную работу вместо обмотки НН включается обмотка СН?

3. Объясните почему при включении на параллельную работу трансформаторов с разными коэффициентами трансформации возникает уравнительный ток?

4. Объясните, возможно ли включение на параллельную работу трансформаторов с различными группами соединения обмоток? Почему, какие могут быть последствия?

5. Какое допускается различие в величине напряжений короткого замыкания и коэффициентов трансформации трансформаторов, включенных на параллельную работу? Что будет происходить при превышении допустимого различия?

6. Как опытным путем проверить схему и группу  $Y/Y-0$ ?

7. Как опытным путем проверить схему и группу  $Y/\Delta-11$ ?

8. Как в лабораторной работе проверяется выполнение условий включения трансформаторов на параллельную работу?

### Дополнительные вопросы для защиты

1. Когда используется параллельная работа трансформаторов?

2. Какие условия должны быть соблюдены при включении трансформаторов на параллельную работу?

3. Можно ли включать на параллельную работу трансформаторы с различными коэффициентами трансформации, если остальные условия соблюдаются?

4. Можно ли включать на параллельную работу трансформаторы с различными группами соединения обмоток?

5. Будет ли возникать уравнительный ток при включении на параллельную работу трансформаторов с разными коэффициентами

трансформации?

6. Можно ли включать на параллельную работу трансформаторы с разными напряжениями (сопротивлениями) короткого замыкания, если остальные условия включения соблюдаются?

7. Что понимается под группой соединения обмоток трансформатора?

8. Какими способами можно изменить группу соединения обмоток?

9. Сколько групп соединения имеет однофазный/трехфазный трансформатор?

10. Какие схемы и группы однофазного/трехфазного трансформатора являются стандартизированными?

11. Зачем при определении группы соединения обмоток трансформатора соединяются точки  $A—a$ ?

12. Как изменится группа соединения при перемаркировке начал и концов одной из обмоток трансформатора?

13. Как изменяется группа соединения при циклической перемаркировке фаз одной из обмоток?

### Литература

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§§ 4.1; 4.2)

2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§ 2.11)

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2017. (§§ 4.3; 12.1; 12.2; 12.3; 12.4)

Лабораторная работа № 3  
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКИ ТРЕХФАЗНОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА

Целью работы является исследование особенностей работы трансформаторов с разными схемами соединения обмоток при несимметричной нагрузке.

### **Общие сведения**

В эксплуатации трехфазные трансформаторы могут иметь нагрузку, при которой по отдельным фазам протекают отличные друг от друга токи, фазовый сдвиг между которыми не равен  $120^\circ$ , что связано с подключением к фазам трансформатора нагрузок различных по величине и характеру. Одним из вариантов несимметричной нагрузки является однофазная нагрузка.

Это приводит к нежелательным последствиям как для потребителей электроэнергии, так и для самого трансформатора.

При неравенстве токов в фазных обмотках трансформатора в нем возникают дополнительные явления, не имеющие место в симметричных режимах, отрицательно сказывающиеся на работе трансформатора, приводящее к искажению фазных напряжений, увеличению потерь в стали и элементах конструкции, значительные местные превышения температуры и т. д.

У потребителей электроэнергии несимметрия напряжений приводит к уменьшению пусковых и максимальных моментов асинхронных двигателей и снижению их КПД, к быстрому перегоранию ламп накаливания в случае повышения напряжения или уменьшению световой отдаче при понижении напряжения в отдельных фазах.

Задачей настоящей работы является исследование несимметричных режимов работы трехфазного трехстержневого трансформатора при различных схемах соединения его обмоток.

### **Программа работы**

#### *1. Экспериментальные исследования*

1. Собрать схему  $Y/Y$  группового трехфазного трансформатора на основе трех однофазных трансформаторов.

2. Провести опыт нагрузки группового трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке при токах вторичной обмотки от 0 до  $I_{2н}$ . Определить изменение фазных напряжений и токов.

3. Собрать схему  $Y/Y_0$  группового трехфазного трансформатора на основе трех однофазных трансформаторов.

4. Провести опыт нагрузки группового трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке при токах вторичной обмотки от 0 до  $I_{2н}$ . Определить изменение фазных напряжений и токов.

### **2. Обработка результатов эксперимента**

1. По результатам опыта несимметричной нагрузки трехфазного трансформатора для схемы соединения обмоток  $Y/Y$  построить графики зависимостей фазных токов и напряжений от тока нагрузки (вторичного тока фазы А).

2. Для номинального значения вторичного тока фазы А построить векторные диаграммы токов и напряжений первичной и вторичной обмоток.

3. По результатам опыта несимметричной нагрузки трехфазного трансформатора для схемы соединения обмоток  $Y/Y_0$  построить графики зависимостей фазных токов и напряжений и тока  $I_0$  от тока нагрузки (вторичного тока фазы А).

4. Для номинального значения вторичного тока фазы А построить векторные диаграммы токов и напряжений первичной и вторичной обмоток.

### **Пояснения и указания к работе**

Перед проведением каждого из опытов работы необходимо привести модули в исходное состояние. Для этого при выключенном автоматическом выключателе  $QF1$  модуля питания стенда установить переключатель  $SA1$  модуля трехфазного трансформатора в положение «∞».

Для проведения данной работы на персональном компьютере должно быть запущено ПО *DeltaProfi* и выбрана соответствующая лабораторная работа.

### **Опыт несимметричной нагрузки трансформатора без нулевого провода**

Схема для исследования представлена на рис. 3.1.

Трехфазный трансформатор собирается из трех однофазных трансформаторов модуля трехфазного трансформатора. Вторичная обмотка трансформатора собирается в «звезду». Первичная обмотка трехфазного трансформатора подключается к выходам трехфазного автотрансформатора. Первичные обмотки трехфазного автотрансформатора подключаются к выводам трехфазного напряжения А, В, С, N модуля питания.

Для создания нагрузки во вторичную цепь трансформатора включается регулируемое сопротивление модуля трехфазного трансформатора. Для создания несимметричной нагрузки в одну из фаз

вторичной обмотки трансформатора включается регулируемое активное сопротивление второго модуля трехфазного трансформатора. Контроль параметров в первичных обмотках осуществляется с помощью датчиков тока и напряжения модуля ввода-вывода. Параметры вторичной цепи контролируются с помощью измерителя мощности.

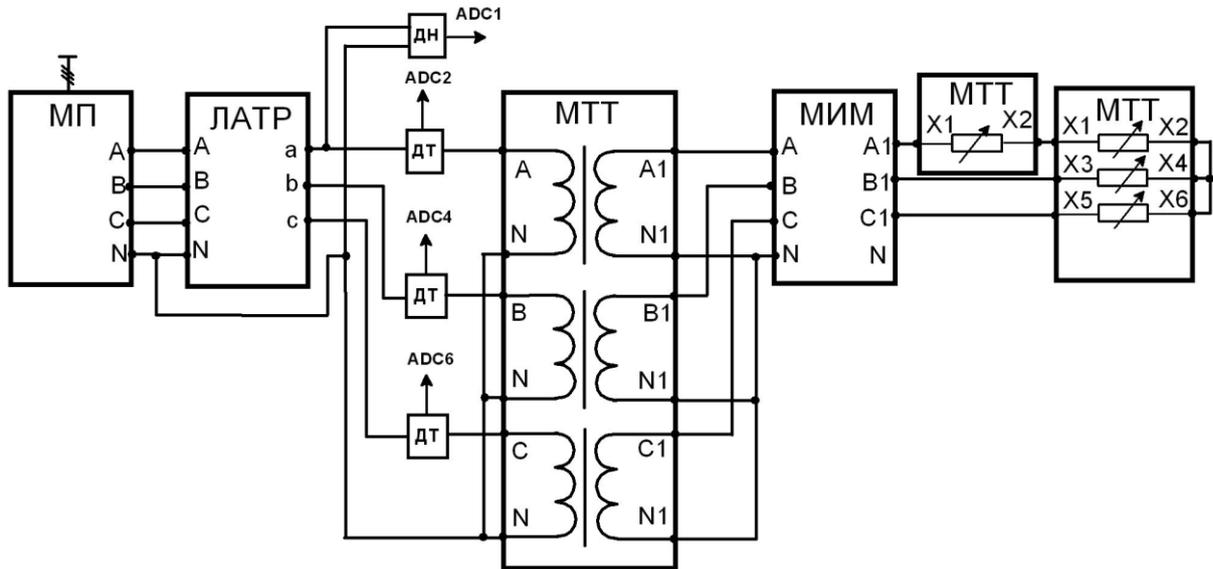


Рисунок 3.1. Схема для исследования трансформатора при несимметричной нагрузке без нулевого провода

Опыт проводится в следующей последовательности:

- переключатель *SA1* модуля трехфазного трансформатора установить в положение «∞», что соответствует режиму холостого хода трансформатора;
- включить последовательно автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда и контактор *KM1* модуля питания;
- кнопкой *SB1* модуля трехфазного автотрансформатора включить контактор на выходе трехфазного автотрансформатора;
- рукояткой трехфазного автотрансформатора задать номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора;
- изменением положения переключателя *SA1* модуля трехфазного трансформатора увеличивать нагрузку до тех пор, пока ток вторичной обмотки приблизительно не будет равен номинальному току. Данные опыта занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$U_1$	$I_{1A}$	$I_{1B}$	$I_{1C}$	$U_{2A}$	$U_{2B}$	$U_{2C}$	$I_{2A}$	$I_{2B}$	$I_{2C}$

После проведения опыта ручку автотрансформатора установить в крайнее положение против часовой стрелки, последовательно нажать кнопку «Откл» модуля трехфазного автотрансформатора, кнопку «Откл» модуля питания, отключить автоматический выключатель *QF1*.

***Опыт несимметричной нагрузки трансформатора с нулевым проводом***

Схема для исследования трансформатора при несимметричной нагрузке с нулевым проводом представлена на рис. 3.2.

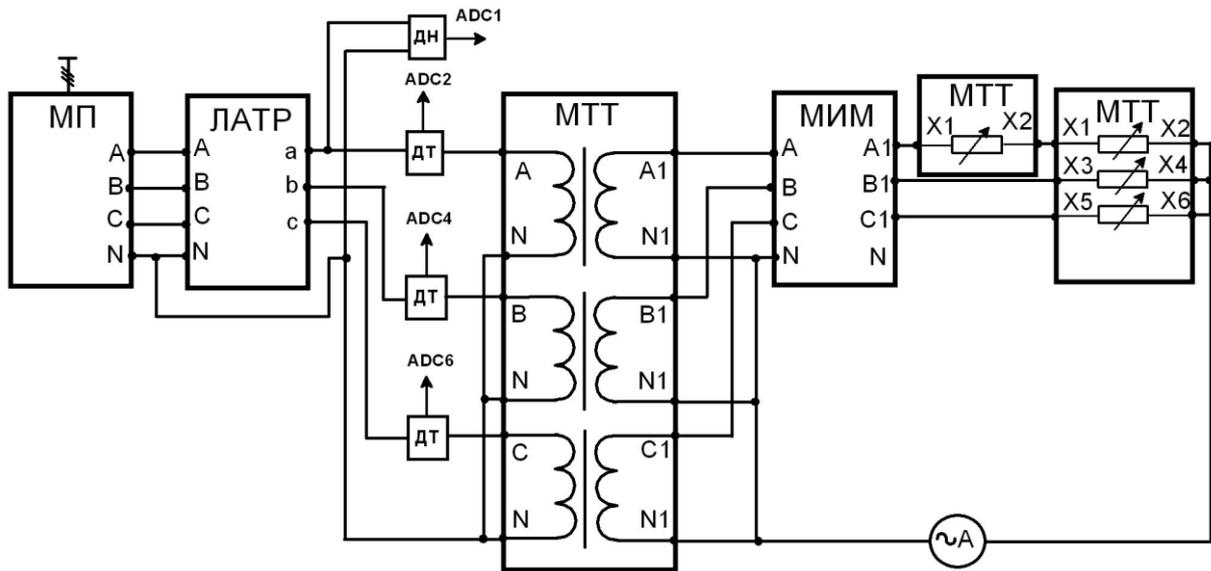


Рисунок 3.2. Схема для исследования трансформатора при несимметричной нагрузке с нулевым проводом

Вторичная обмотка трансформатора собирается в «звезду». Первичная обмотка трехфазного трансформатора подключается к выходам трехфазного автотрансформатора. Первичные обмотки трехфазного автотрансформатора подключаются к выводам трехфазного напряжения А, В, С, N модуля питания.

Для создания нагрузки во вторичную цепь трансформатора включается регулируемое сопротивление модуля трехфазного трансформатора. Для создания несимметричной нагрузки в одну из фаз вторичной обмотки трансформатора включается регулируемое активное сопротивление второго модуля трехфазного трансформатора. Общая точка нагрузочных сопротивлений подключается к общей точке вторичных обмоток трансформаторов.

Контроль параметров в первичных обмотках осуществляется с помощью датчиков тока и напряжения модуля ввода-вывода. Параметры вторичной цепи контролируются с помощью измерителя мощности.

Контроль тока в нулевом проводе вторичной цепи трехфазного трансформатора осуществляется с помощью цифрового индикатора переменного тока модуля измерительного.

Опыт проводится в следующей последовательности:

- переключатель *SA1* модуля трехфазного трансформатора установить в положение «∞», что соответствует режиму холостого хода трансформатора;
- включить последовательно автоматический выключатель *QF1* модуля питания стенда и контактор КМ1 модуля питания;
- кнопкой *SB1* модуля трехфазного автотрансформатора включить контактор на выходе трехфазного автотрансформатора;
- рукояткой трехфазного автотрансформатора задать номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора;
- изменением положения переключателя *SA1* модуля трехфазного трансформатора увеличивать нагрузку до тех пор, пока ток вторичной обмотки приблизительно не будет равен номинальному току. Данные опыта занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

$U_1$	$I_{1A}$	$I_{1B}$	$I_{1C}$	$U_{2A}$	$U_{2B}$	$U_{2C}$	$I_{2A}$	$I_{2B}$	$I_{2C}$	$I_0$

После проведения опыта ручку автотрансформатора установить в крайнее положение против часовой стрелки, последовательно нажать кнопку «Откл» модуля трехфазного автотрансформатора, кнопку «Откл» модуля питания, отключить автоматический выключатель *QF1*.

### Контрольные вопросы

Основные вопросы для защиты

1. По каким путям замыкаются силовые линии потока нулевой последовательности в трехстержневом трансформаторе, в групповом трансформаторе? Чем пути силовых линий потока нулевой последовательности отличаются от путей замыкания линий основного магнитного потока?

2. Как влияет обмотка, соединенная в треугольник, на смещение нулевой точки звезды фазных напряжений из центра тяжести треугольника линейных напряжений?

3. Как определяется сопротивление нулевой последовательности трансформатора в лабораторной работе?

4. Как найти токи фаз первичной цепи трансформатора при разных схемах соединения обмоток, если известны токи нагрузки?

5. В каком трансформаторе со схемой обмоток  $Y/Y_n$  будет больше

«смещение нулевой точки» при несимметричной нагрузке: в трансформаторе, помещенном в стальной бак, или в трансформаторе без бака? Почему?

6. В каком трансформаторе со схемой обмоток  $Y/Y_n$  будет больше «смещение нулевой точки» при несимметричной нагрузке: в трансформаторе трехстержневом или групповом? Почему?

7. По какой схеме надо соединять первичную обмотку группового трансформатора, если вторичная обмотка соединена в  $Y_n$ ? Почему?

8. Поясните, в каких случаях несимметричной нагрузки трансформатора имеет место искажение звезды фазных напряжений?

Дополнительные вопросы для защиты

1. Приведите примеры несимметричной нагрузки трансформаторов.

2. К чему приводит несимметричная нагрузка трансформаторов?

3. К каким последствиям в эксплуатации трехфазных линий приводит несимметрия фазных напряжений?

4. В каких случаях при несимметричной нагрузке появляется ток нулевой последовательности?

5. В каких случаях ток нулевой последовательности, протекающий по вторичной обмотке, является намагничивающим током, создающим магнитный поток нулевой последовательности?

6. Какой метод применяется для исследования несимметричной нагрузки? Поясните суть метода.

7. В каких схемах ток нулевой последовательности не трансформируется в первичную цепь?

## Литература

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§ 4.3)

2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§ 2.16)

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2017. (§§ 13.1; 13.2; 13.3; 13.4; 13.5; 13.6; 13.7)

Лабораторная работа № 4  
ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРА

Целью работы является изучение характеристик и особенностей работы автотрансформаторов.

**Общие сведения**

Автотрансформатором называется трансформатор, в котором энергия из первичной обмотки передается во вторичную электромагнитным и электрическим путем, то есть обмотки имеют и магнитную и электрическую связь. В понижающем автотрансформаторе (рис. 4.1) первичное напряжение подводится к соединенным согласно-последовательно обмоткам  $W_1$  и  $W_2$ , а нагрузка подключается к обмотке  $W_1$ . В повышающем автотрансформаторе (рис. 4.2) первичное напряжение подводится к обмотке  $W_1$ , а нагрузка подключается к соединенным согласно-последовательно обмоткам  $W_1$  и  $W_2$ .

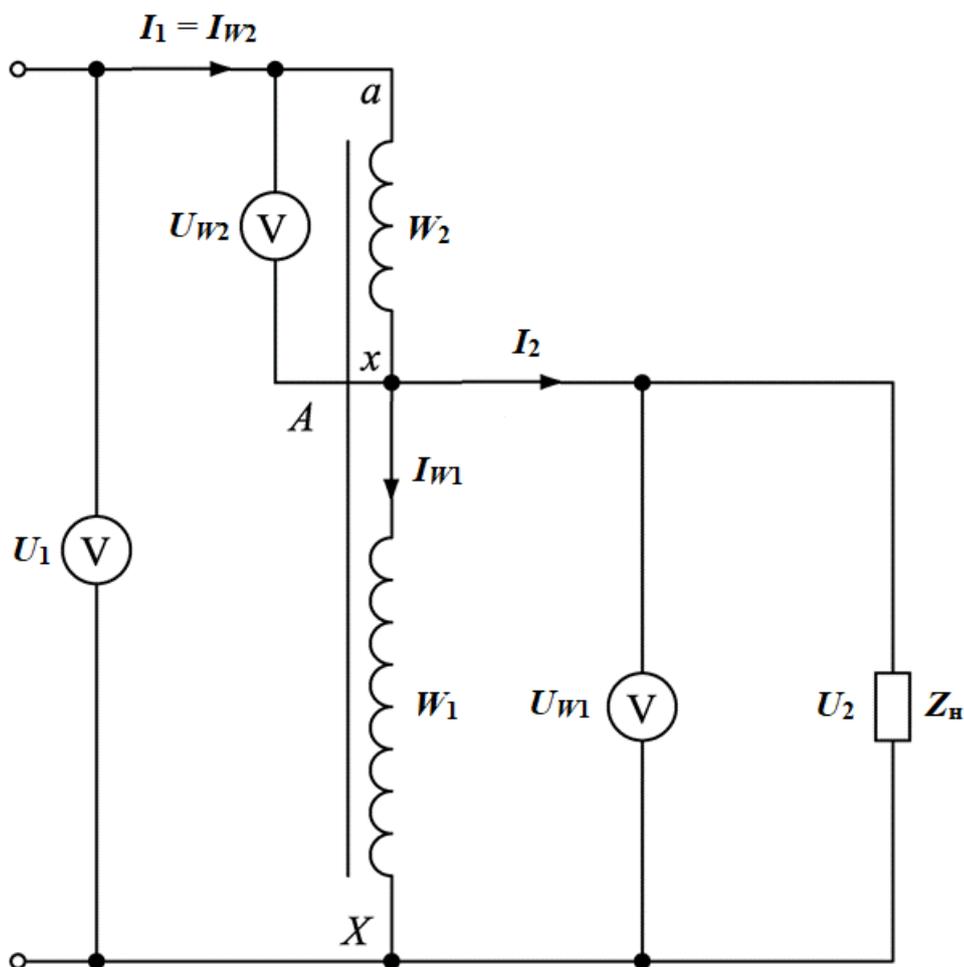


Рис. 4.1. Схема соединения понижающего автотрансформатора

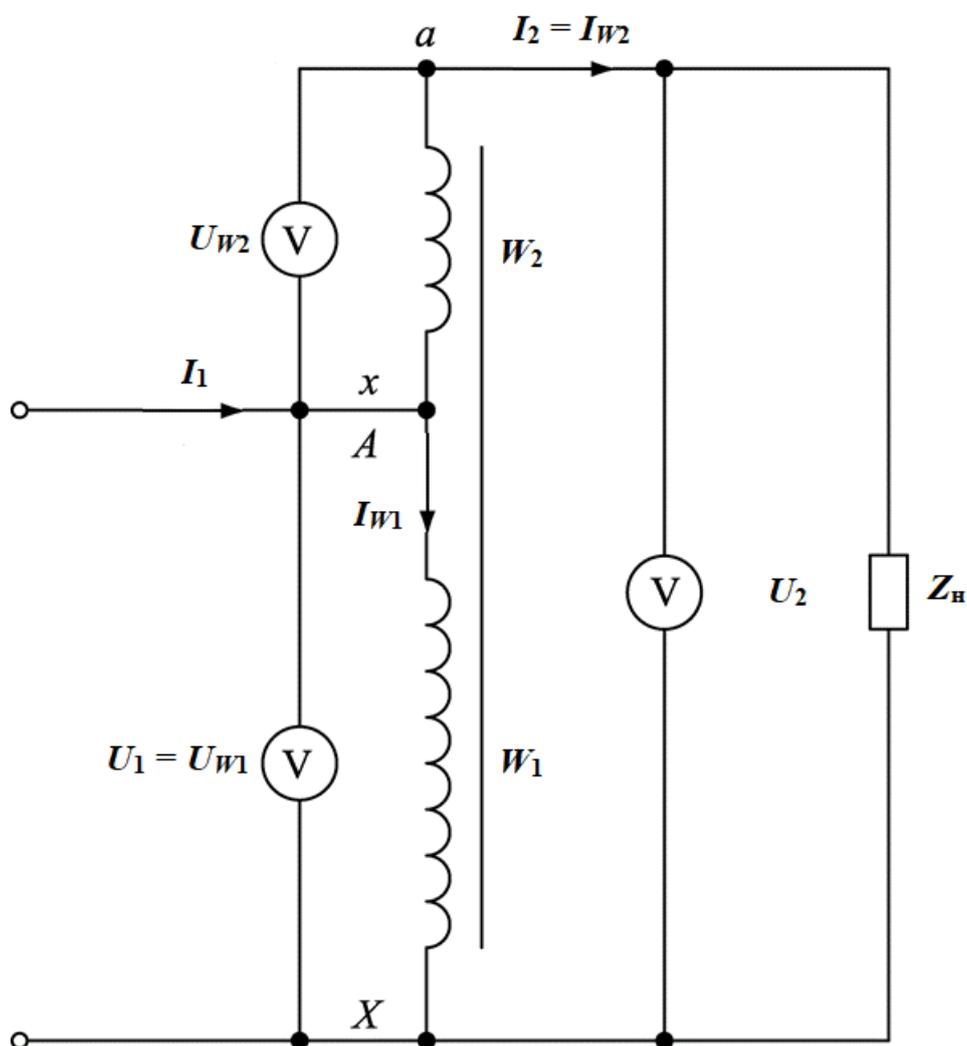


Рис. 4.2. Схема соединения повышающего автотрансформатора

В автотрансформаторе благодаря электрической связи между первичной и вторичной сетью мощность из первичной сети во вторичную передается не только посредством электромагнитного поля, но и непосредственно электрическим путем.

Автотрансформаторы находят широкое применение для соединения высоковольтных электрических сетей, могут использоваться для пуска двигателей переменного тока большой мощности, в электронных схемах, радиотехнических устройствах, схемах автоматики и т. д.

Чем бóльшая часть мощности передается электрическим путем, тем экономичнее автотрансформатор в работе и требует для изготовления меньше материалов по сравнению с обычным двухобмоточным трансформатором, имеющим ту же номинальную мощность.

Применение автотрансформатора наиболее целесообразно, когда имеет место небольшое отличие величин входного и выходного напряжений и их отношение находится в пределах от 0,5 до 2.

Экономичность автотрансформатора по сравнению с обычным двухобмоточным трансформатором оценивается по его относительной расчетной мощности – расчетной мощности, отнесенной к полной проходной мощности, где полная мощность соответствует мощности нагрузки

$$S_{\pi} = U_2 I_2 \approx U_1 I_1,$$

а расчетная мощность, определяющая электромагнитную мощность, передаваемую магнитным полем, соответствует произведению напряжений на обмотках  $W_1$  и  $W_2$  и токов этих обмоток, реально нагружающих обмотки

$$S_p = S_{\text{эм}} \approx U_{W1} I_{W1} \approx U_{W2} I_{W2}.$$

Практически снижение расчетной мощности в автотрансформаторе получается за счет того, что в понижающем автотрансформаторе (рис. 4.1) обмотка, обтекаемая током первичной сети, а в повышающем автотрансформаторе (рис. 4.2) обмотка, обтекаемая током вторичной сети, рассчитывается на разностное напряжение первичной и вторичной сети, а не на полное напряжение, как в обычном трансформаторе. Соответственно обмотка, к которой приложено входное или выходное напряжение, обтекается разностным током первичной и вторичной сети, а не полным током, как в обычном трансформаторе.

Для понижающего автотрансформатора (рис. 4.1) справедливы соотношения

$$S_p^* = \frac{S_p}{S_{\pi}} = \frac{U_{W2} I_{W2}}{U_1 I_1} = \frac{U_{W2}}{U_1} = \frac{w_2}{w_2 + w_1} = \frac{1}{1 + k_{12}}.$$

Для повышающего автотрансформатора (рис. 4.2) справедливы соотношения

$$S_p^* = \frac{S_p}{S_{\pi}} = \frac{U_{W2} I_{W2}}{U_2 I_2} = \frac{U_{W2}}{U_2} = \frac{w_2}{w_2 + w_1} = \frac{1}{1 + k_{12}}.$$

где  $k_{12} = w_1/w_2$ .

Т. е. формулы относительной расчетной мощности одинаковы для понижающего и повышающего автотрансформаторов при согласном включении первичной и вторичной обмоток.

## Программа работы

### 1. Экспериментальные исследования

1. Снять нагрузочную характеристику автотрансформатора.
2. Снять регулировочную характеристику автотрансформатора.

## 2. Обработка результатов эксперимента

1. Для каждой точки нагрузочной характеристики рассчитать мощность, передаваемую электромагнитным путем, и мощность, передаваемую электрическим путем.
2. Построить нагрузочную характеристику автотрансформатора.
3. Построить регулировочную характеристику автотрансформатора.

### Пояснения и указания к работе

Перед проведением каждого опыта необходимо привести модули в исходное состояние. Для этого при выключенном автоматическом выключателе  $QF1$  модуля питания стенда:

- переключатель  $SA1$  модуля трёхфазного трансформатора установить в положение «∞»;
- установить рукоятку трехфазного автотрансформатора в крайнее левое положение против часовой стрелки.

### Нагрузочная характеристика автотрансформатора

Нагрузочная характеристика автотрансформатора представляет собой зависимость напряжения вторичной обмотки автотрансформатора от тока вторичной обмотки. Схема для проведения опыта представлена на рис. 4.1.

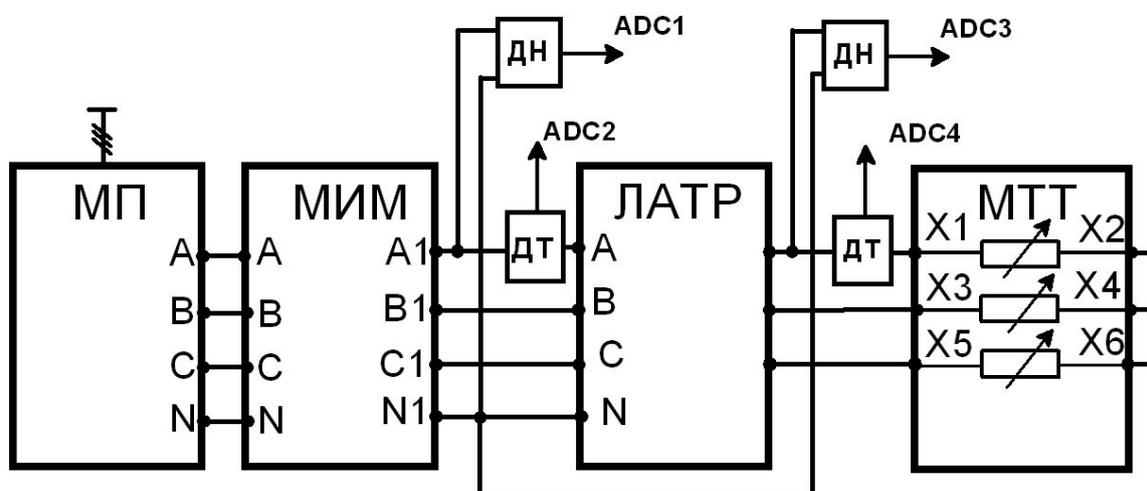


Рис. 4.1. Схема опыта

Первичная обмотка автотрансформатора запитывается от клемм трехфазного напряжения А, В, С, N модуля питания МП через модуль измерителя мощности МИМ. К выходам вторичной обмотки автотрансформатора подключается регулируемое сопротивление модуля трехфазного автотрансформатора МТТ.

Для контроля величины и формы тока и напряжения в первичной и вторичной обмотках автотрансформатора используются датчики тока и

напряжения модуля ввода/вывода.

Опыт проводится в следующей последовательности:

- включить автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда и нажать кнопку «Вкл.» модуля питания;
- кнопкой  $SB1$  модуля трехфазного автотрансформатора включить контактор на выходе автотрансформатора;
- плавным поворотом рукоятки автотрансформатора установить фазное напряжение на выходе автотрансформатора, заданное преподавателем, но не более 50В;
- с помощью переключателя  $SA1$  модуля трехфазного трансформатора последовательно выводить сопротивление из вторичной обмотки, фиксируя показания приборов в табл. 4.1.

После проведения опыта ручку автотрансформатора установить в крайнее левое положение против часовой стрелки, последовательно нажать кнопки «Откл.» модуля трехфазного автотрансформатора и модуля питания, отключить автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда.

Внимание: во избежание перегрева сопротивлений модуля трехфазного трансформатора опыт необходимо производить максимально быстро, не превышая эксплуатационных характеристик модуля.

Таблица 4.1.

$I_1, A$				
$U_1, B$				
$P_1, BT$				
$I_2, A$				
$U_2, B$				
$P_m, BT$				
$P_3, BT$				

В таблице 4.1. приняты следующие обозначения:

$I_1$  – ток в первичной обмотке автотрансформатора, А;

$U_1$  – напряжение первичной обмотки автотрансформатора, В;

$P_1$  – активная мощность первичной обмотки автотрансформатора, Вт;

$I_2$  – ток во вторичной обмотке автотрансформатора, А;

$U_2$  – напряжение вторичной обмотки автотрансформатора, В.

Расчетные данные:

Мощность, передаваемая электромагнитным путем в автотрансформаторе

$$P_m = 3(U_1 - U_2)I_1.$$

Мощность, передаваемая электрическим путем в автотрансформаторе

$$P_3 = P_1 - P_m.$$

Построить нагрузочную характеристику автотрансформатора  $U_2 = f(I_2)$  при  $U_1 = \text{Const}$  и изменении нагрузки.

### Регулировочная характеристика автотрансформатора

Регулировочная характеристика автотрансформатора представляет зависимость тока в обмотках автотрансформатора от напряжения вторичной обмотки при фиксированном значении нагрузочного сопротивления во вторичной обмотке. Схема для проведения опыта представлена на рис. 4.1.

Опыт проводится в следующем порядке:

- включить автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда и нажать кнопку «Вкл.» модуля питания;

- кнопкой  $SB1$  модуля трехфазного автотрансформатора включить контактор на выходе автотрансформатора;

- для фиксированной нагрузки ручкой автотрансформатора плавно изменять напряжение на выходе автотрансформатора, фиксируя показания приборов в таблице, аналогичной табл. 4.1; при проведении опыта не повышать выходное напряжение автотрансформатора выше 50 В.

После проведения опыта ручку автотрансформатора установить в крайнее левое положение против часовой стрелки, последовательно нажать кнопки «Откл.» модуля трехфазного автотрансформатора и модуля питания, отключить автоматический выключатель  $QF1$  модуля питания стенда.

Построить регулировочную характеристику автотрансформатора  $I_1$ ,  $I_2 = f(U_2)$  при  $Z_H = \text{Const}$ .

## Контрольные вопросы

Основные вопросы для защиты

1. Каковы преимущества и недостатки автотрансформатора по сравнению обычным трансформатором?

2. От чего зависит большая или меньшая выгодность применения автотрансформатора?

3. Запишите уравнения токов для понижающего автотрансформатора, пренебрегая током холостого хода. Постройте по ним векторную диаграмму.

4. Запишите уравнения токов для повышающего автотрансформатора, пренебрегая током холостого хода. Постройте по

ним векторную диаграмму.

5. При каких коэффициентах трансформации выгодно применение автотрансформатора и почему?

Дополнительные вопросы для защиты

1. Чем отличается по устройству и конструкции автотрансформатор от двухобмоточного трансформатора?

2. Каким путем в автотрансформаторе происходит передача мощности из первичной сети во вторичную?

3. Какой мощностью определяются размеры и масса автотрансформатора? Почему?

4. Можно ли повышающий автотрансформатор сделать понижающим?

5. Можно ли общую часть обмотки автотрансформатора намотать проводом с меньшей толщиной изоляции, чем у остальной части обмотки?

### Литература

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Академия, 2013. (§ 5.2)

2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов. 5-е изд., стер., – М.: Высшая школа, 2006. (§ 2.13)

3. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1. – М.: Издательство МЭИ, 2017. (§§ 11.1; 11.2)