



Некоммерческое  
акционерное  
общество

**АЛМАТИНСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ЭНЕРГЕТИКИ И  
СВЯЗИ**

Кафедра электрические машины  
и электропривод

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

1,2 часть

Методические указания к выполнению лабораторных работ для  
студентов специальности 5В071800

Алматы 2018

СОСТАВИТЕЛИ: П.И. Сагитов, Р.М. Шидерова, Ю.В. Кузьмин.  
Электрические машины. Методические указания к выполнению  
лабораторных работ для студентов специальности 5В071800. – Алматы:  
АУЭС, 2018. – 74с.

Методические указания содержат необходимые технические сведения о  
стендах, программу выполнения работ, методику подготовки, проведение  
экспериментов и анализа полученных результатов, контрольные вопросы.

Методические указания предназначены для студентов всех форм  
обучения специальности 5В071800 – Электроэнергетика.

Рецензент: Б.К. Курпенов

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества  
«Алматинский университет энергетики и связи» на 2018г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2018г.

## Содержание

1 Описание лабораторного стенда.....	4
2 Указание мер безопасности.....	7
3 Подготовка и порядок работы.....	7
4 Лабораторная работа №1. Исследование однофазного трансформатора..	9
5 Лабораторная работа №2. Опытное определение групп соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора.....	20
6 Лабораторная работа №3. Исследование параллельной работы трёхфазных двухобмоточных трансформаторов.....	33
7 Лабораторная работа №4. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	38
8 Лабораторная работа №5. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором.....	51
9 Лабораторная работа №6. Исследование способов пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	61
Список литературы.....	76

## 1 Описание лабораторного стенда

Лабораторный стенд (рисунок 1) предназначен для использования в качестве учебного оборудования для проведения лабораторно-практических занятий при исследовании трансформаторов, асинхронных и синхронных машин, а также машин постоянного тока.

### 1.1 Лабораторный стенд состоит

1.1.1 Инвертор. Предназначен для создания симметричной трехфазной сети. Осуществляет плавное регулирование частоты и напряжения. Задание напряжения может осуществляться независимо от задания частоты и в режиме  $U/f = \text{const}$ . Измеряет ток в звене постоянного тока, а также выходное линейное напряжение.

Силовая часть реализована на базе силового модуля Mitsubishi ASIPM PS11035 (для двигателей мощностью до 1,5 кВт; с номинальным током 7А).

Диапазон регулирования:

- 1) Диапазон задания частоты 0..163 Гц с дискретностью 0,63 Гц.
- 2) Диапазон задания линейного напряжения 0..220 В с дискретностью 1В.

1.1.2 Широтно-импульсные преобразователи. Осуществляют питание обмоток якоря и возбуждения ДПТ, а также обмотки возбуждения СД.

Состав.

Силовая часть.

Интеллектуальный силовой модуль ASIPM Mitsubishi PS11035, в состав которого входят следующие блоки:

- двухфазный мост на IGBT-транзисторах используется для питания обмотки якоря ДПТ;
- оставшийся полумост используется для питания обмотки возбуждения синхронной машины.

Полевой транзистор IRF840 - для питания обмотки возбуждения ДПТ.

Силовое питание преобразователей осуществляется от цепи постоянного тока частотного преобразователя, что позволяет осуществить рекуперацию энергии между двигателями переменного и постоянного токов.

Микроконтроллер ATmega16, осуществляющий:

- измерение и индикацию токов в обмотках возбуждения и якоря;
- измерение и индикацию скорости вращения двигателей;
- реализацию регулятора тока обмотки возбуждения ДПТ;
- реализацию следующих режимов работы ШИП якоря:
- одноконтурная система управления с обратной связью по току якоря используется при исследовании синхронного двигателя;

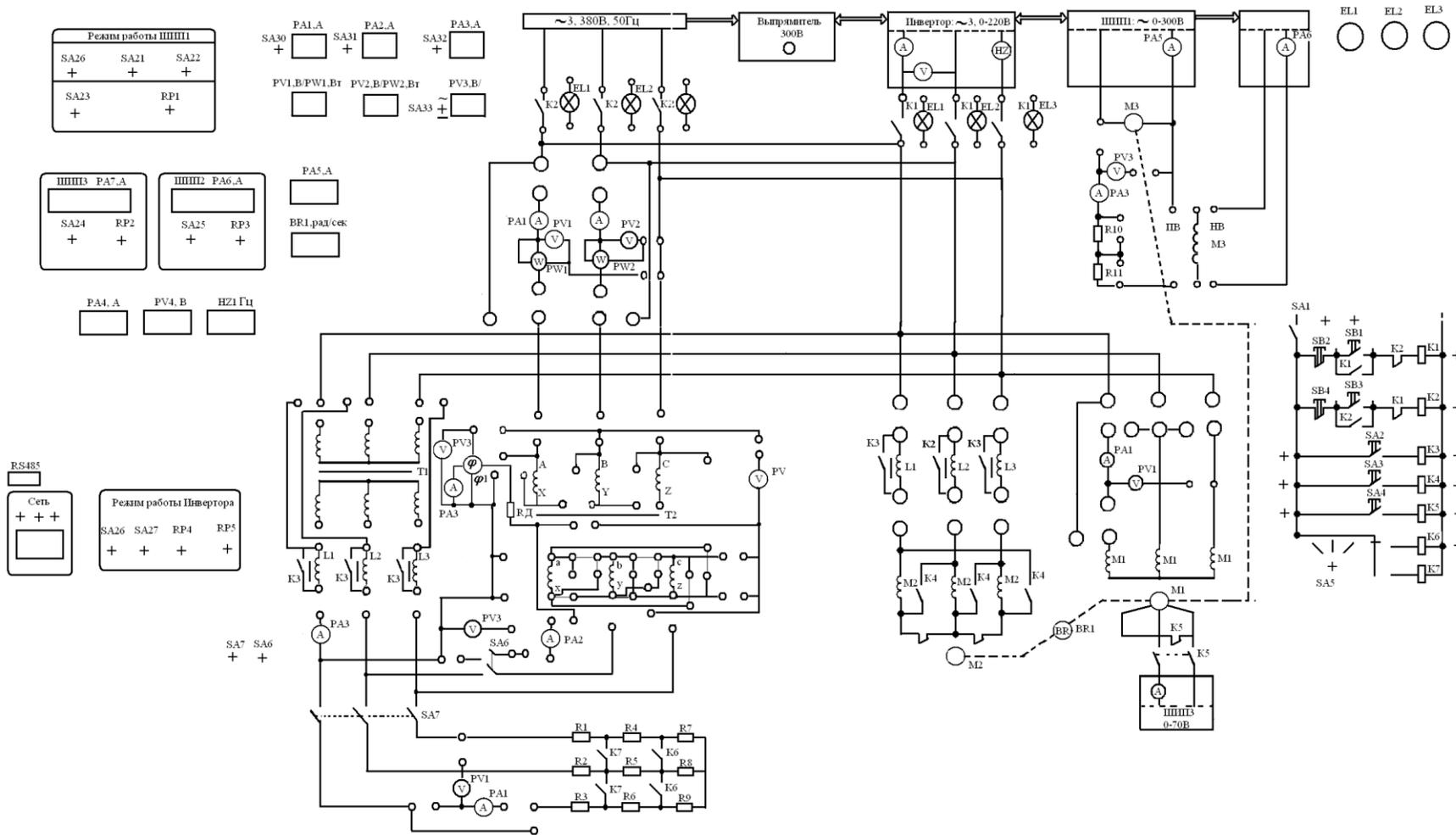


Рисунок 1.1

- двухконтурная система управления с обратными связями по току якоря и скорости вращения двигателя – используется при исследовании двигателей переменного тока;
- отключение замкнутой системы управления – используется при исследовании машины постоянного тока;
- опрос тумблеров и резисторов;
- связь с компьютером;
- шунты для измерения токов с платами гальванической развязки на основе изолирующего усилителя HCPL-788J.

1.1.3 Цифровые измерительные приборы. Каждый прибор может измерять ток и напряжение, кроме непосредственного измерения тока и напряжения, рассчитывает:

- действующее значение переменного тока и напряжения;
- угол сдвига между током и напряжением;
- активную мощность.

## 1.2 Особенности работы стенда

1.2.1 Индикация. Отображение измеренных величин производится в цифровом виде. Это ведет за собой следующую особенность: при незначительном изменении измеренной величины происходит изменение цифры младшего разряда. Реальные величины имеют колебания, вызванные помехами, что приводит к постоянному изменению цифр младших разрядов и совершенной нечитаемости индикатора. Для устранения этого недостатка числа перед индикацией проходят через фильтр, что, в свою очередь, замедляет реакцию индикации на быстрые изменения величин: пусковые токи, разгон/торможение двигателя, колебания тока возбуждения в синхронном двигателе и т.д. Поэтому методы проведения некоторых лабораторных работ отличаются от стандартных.

1.2.2 Включение стенда. Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей, находятся в положении «выключено».

После включения стенда происходит тест индикаторов. Если какой-либо из ШИПов включен, то после теста соответствующий индикатор выводит надпись «OOPS». После выключения тумблеров плата ШИПов переходит в нормальный режим работы.

1.2.3 Срабатывание защиты преобразователей. Силовая часть преобразователей построена на силовом модуле, который имеет встроенную защиту от токов короткого замыкания и от недостаточного напряжения в цепях управления (при напряжении меньше 13В).

При срабатывании защиты инвертора на индикаторах PA4, PV4, NZ1 моргает «OOPS».

При срабатывании защиты ШИП обмотки якоря ДПТ и обмотки возбуждения СД (питаются от силового модуля) на индикаторах PA5 и PA7 моргают последние измеренные значения.

При срабатывании защиты ШИП обмотки возбуждения ДПТ на индикаторе РА6 моргает последнее измеренное значение. При этом выключается питание обмотки возбуждения и питание обмотки якоря.

При срабатывании защиты необходимо выключить и включить преобразователь.

1.2.4 Цифровые приборы. Каждый прибор может измерять ток и напряжение. У каждого канала есть: один вывод вольтметра, один вывод амперметра и общая точка, которая связывает вторые выводы приборов. Поэтому включение, например, вольтметра в какую-либо цепь, автоматически подключает один вывод амперметра к этой же цепи.

Нельзя включать лабораторную работу «Параллельная работа трансформаторов», если остались переключки от работы «Определение групп соединения трансформаторов» или включены ваттметры на выходе инвертора.

## **2 Указание мер безопасности**

2.1 При эксплуатации изделия необходимо соблюдать «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

2.2 Изделие эксплуатировать в помещении без повышенной опасности по степени поражения электрическим током.

2.3 Включение питания изделия и выполнение работ производить только после разрешения преподавателя.

2.4 Сборку электрических схем для проведения лабораторной работы, техническое обслуживание производить при отключенном питании стенда.

2.5 Корпус стенда должен быть заземлен. Сопротивление контура заземления не более 4 Ом.

## **3 Подготовка и порядок работы**

3.1 Перед началом работы необходимо тщательно изучить настоящий паспорт и подробно ознакомиться со схемой предстоящей лабораторной работы.

3.2 Начертить принципиальную схему работы в тетради. Продумать, каким образом производить коммутацию между узлами схем, разобраться в их назначении, уяснить работу схемы и ее элементов. После этого вычертить монтажную схему с указанием мест подключения переключек или составить таблицу соединений, согласно которой будет производиться коммутация элементов аппаратов.

3.3 Сборку схемы производить только при отключенной питающей сети. После окончания сборки схемы тщательно проверить правильность соединений в соответствии с рисунками, прилагаемыми к лабораторным работам. Убедиться в отсутствии коротких замыканий в монтаже схемы.

После чего обратиться к преподавателю за разрешением на проведение лабораторной работы.

3.4 Приступая к работе, следует установить все тумблеры в нижнее положение, соответствующее их отключенному состоянию. При проведении работы следить за тем, чтобы величины измеряемых параметров не выходили за пределы их паспортных данных.

Параметры объектов исследования.

### 1. Трансформатор

Тип трансформатора	ОСМ1
Номинальное напряжение первичной обмотки	220 В
Номинальное напряжение вторичной обмотки	110 В
Номинальная мощность вторичной обмотки	0,100 кВ·А
Ток холостого тока	24%
Напряжение короткого замыкания	9%
К.П.Д.	87%

### 2. Электромашинный агрегат

ДПТ НВ	АД КЗ	АД ФР
Тип -2ПН901	Тип – АИР71В6	Тип –МТН-011
Номинальная мощность-0,55кВт	Номинальная мощность-0,55кВт	Номинальная мощность-1,4 кВт
Частота вращения-1500об/мин	Номинальное напряжение-380В	Номинальное напряжение-380В
Номинальный КПД-67,5%	Частота вращения- 1000 об/мин	Частота вращения-1000 об/мин
Номинальное напряжение-220В	Номинальный КПД-69%	Номинальный КПД-65%
Номинальный ток якоря-3,3А	Номинальное скольжение-8,5%	Номинальное скольжение-8,5%
Номинальный ток возбуждения-0,4А	$\cos\varphi=0,68$	$\cos\varphi=0,67$
	$I_{II} / I_H = 4,5; \quad M_{II} / M_H = 1,9;$ $M_{МАКА} / M_H = 2,2$	Номинальный ток ротора-8,8А

### 3. Нагрузочные сопротивления ( $R_1 \dots R_9$ )

	$R_1 \dots R_3$	$R_4 \dots R_9$
Тип	ПЭВ-100	ПЭВ-30
Номинальное сопротивление, Ом	51	22
Рассеиваемая мощность, Вт	100	30

### 4. Добавочные сопротивление ( $R_{10}, R_{11}$ )

	$R_{10}, R_{11}$
Тип	ПЭВ-100
Номинальное сопротивление, Ом	220
Рассеиваемая мощность, Вт	100

## 4 Лабораторная работа №1. Исследование однофазного трансформатора

*Цель работы:* Испытание однофазного трансформатора в различных режимах работы и приобретение практических навыков определения параметров эксплуатационных характеристик трансформатора по опытам холостого хода и короткого замыкания и проверка соответствия паспортным данным.

### 4.1 Общие сведения

Свойства любого трансформатора могут быть оценены по его параметрам и характеристикам. Исследование последних производится на основе схемы замещения, параметры которой могут быть определены расчетным путем на стадии проектирования, а если трансформатор изготовлен и эксплуатируется – экспериментально.

Одним из простых и достаточно точных способов определения параметров и характеристик в инженерной практике является проведение экспериментальных (испытательных) опытов холостого хода (х.х.) и короткого замыкания (к.з.). Режимы х.х. и к.з. – предельные режимы работы трансформаторов, в которых трансформатор не совершает полезной работы, т.к. при х.х ток нагрузке  $I_2=0$ , при к.з.  $U=0$ .

С помощью х.х. и к.з. можно рассчитать параметры и характеристики для любого эксплуатационного режима (нагрузочного) режима: работы трансформатора при любом характере нагрузки (активной, индуктивной, активно-индуктивной, активно-емкостной и др.).

## 4.2 Задание на выполнение лабораторной работы

4.2.1 Снятие характеристик холостого хода, короткого замыкания и нагрузочной характеристики.

4.2.2 Определение параметров схемы замещения трансформатора.

4.2.3 Построение внешней характеристики трансформатора.

4.2.4 Построение векторных диаграмм для различных режимов работы трансформатора.

## 4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1 Режим холостого хода. Режим холостого хода является таким предельным режимом, при котором вторичная обмотка разомкнута. Напряжение  $U_{20}$  на ее зажимах равно ЭДС  $E_2$ . При холостом ходе ток холостого хода, идущий на создание магнитного потока (намагничивающий ток), мал:

$$I_{10} = (3...10)\%I_{1H},$$

где  $I_{1H}$  - номинальный ток трансформатора.

Характеристика холостого хода:

$$I_{10}, P_0, \cos\varphi_0 = f(U_{20}) \text{ при } I_{20} = 0.$$

Порядок работы с лабораторной установкой при снятии характеристик холостого хода.

Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено»; все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении; все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

В схеме включения однофазного трансформатора при опыте х.х. для регулирования напряжения используется инвертор. В качестве первичной необходимо использовать обмотку низшего напряжения НН ( $b_1$ ).

1. Собрать схему, представленную на рисунке 4.1.

2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

3. Установить выключатель SA30 в положение «PVI», SA31 в положение «PW2».

4. Тумблером SA27 установить независимый режим управления *Инвертора*.

5. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

6. Подключить исследуемый трансформатор к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

7. Тумблером SA2 закоротить реакторы L1, L2, L3.

8. Тумблер SA33 установить в положение «~»

9. Включить тумблер SA6.

Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» Инвертора, плавно увеличивая напряжение инвертора от 0 до 130В (вольтметр PV4) через приблизительно равные промежутки для 5÷6 точек, снять показания приборов PV2, PW2, PA2, PV3. На первичной обмотке трансформатора (BY) напряжение контролировать по вольтметру PV3. Показания измерительных приборов занести в таблицу 4.1. Обязательной точкой при снятии х.х.х. является точка с номинальными параметрами сети ( $U_{10}=U_{1H}$ ,  $f_1=f_{1H}$ ), для которой замеряется номинальная мощность холостого хода  $P_{0H}$ .

10. Данные занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 - Данные опыта холостого хода

№	Измерения				Вычисления				
	$U_1$ , В (PV3)	$I_0$ , А (PA2)	$P_0$ , Вт (PW2)	$U_{20}$ , В (PV2)	$R_0$	$X_0$	$Z_0$	$\cos\varphi_0$	Коэффициент трансформации
1									
...									
6									

Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно вывести регулятор RP5 «Задание напряжения» в крайнее левое положение;

- выключить тумблер SA6;

- тумблером SA26 выключить Инвертор;

- отключить исследуемый трансформатор от выхода инвертора, нажав кнопку SB2;

- выключить автоматический выключатель «Сеть».

4.3.2 Режим короткого замыкания. Режим короткого замыкания является другим предельным режимом работы трансформатора, при котором вторичная обмотка замкнута накоротко.

Различают короткое замыкание в процессе эксплуатации трансформатора и опытный режим короткого замыкания. При эксплуатационном коротком замыкании к первичной обмотке приложено

полное напряжение сети и по обмоткам протекают токи значительно больше номинальных. В опытном режиме короткого замыкания на первичную обмотку подается такое пониженное напряжение короткого замыкания ( $U_{1К}$ ), при котором по вторичной обмотке протекает номинальный ток  $U_{1К} = (3...10)\%U_{1Н}$ .

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

Характеристика короткого замыкания:

$$I_K, P_K, \cos\varphi_K = f(U_K) \text{ при } U_2 = 0.$$

Порядок работы с лабораторной установкой при снятии характеристик короткого замыкания.

Ток статора первичной обмотки трансформатора не должен превышать  $1,2 \cdot I_H$ .

Продолжительность каждого отсчёта не должна превышать 10 с.

1. Собрать схему, представленную на рисунке 4.2.
2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено»; все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении; все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

3. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

4. Тумблером SA27 установить независимый режим управления инвертора.

5. Установить выключатель SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 в положение «PV3».

6. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

7. Подключить исследуемый трансформатор к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

8. Тумблером SA26 включить инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» инвертора плавно увеличивать напряжение на первичной обмотке трансформатора так, чтобы ток в первичной обмотке трансформатора не превышал 0,6А.

9. Уменьшая регулятором RP5 «Задание напряжения» напряжение на выходе инвертора через приблизительно равные промежутки тока ( $5 \div 6$

точек, одна из них должна соответствовать номинальному значению тока), снять показания приборов PW2, PV2, PA2. Данные занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Данные опыта короткого замыкания

Измерения			Вычисления					
№	$U_K, В$ PV2	$I_{IK}, А$ PA2	$P_K, Вт$ PW2	$U_{K.A}, \%$	$U_{K.P}, \%$	$R_K, Ом$	$X_K, Ом$	$Cos\varphi_K$
1								
...								
6								

Завершив эксперимент, необходимо:

- плавно вывести регулятор RP5 «Задание напряжения» в крайнее левое положение;
- тумблером SA26 выключить Инвертор;
- отключить исследуемый трансформатор от выхода инвертора, нажав кнопку SB2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

По данным таблицы построить характеристики к.з. (на общей координатной сетке  $I_{IK}, P_K, \cos\varphi_K$  функции  $U_K$ ). На характеристиках отметить точки  $U_{K.ном}, P_{K.ном}$  соответствующие току к.з.  $I_K = I_{I.ном}$ .

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

Порядок работы с лабораторной установкой при снятии режима нагрузки.

1. Собрать схему, представленную на рисунке 3.
2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда, – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено»; все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении; все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.
3. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.
4. Переключатель SA5 перевести в крайнее левое положение.
5. Установить выключатель SA30 - в положение «PV1», выключатель SA31 - в положение «PW2», выключатель SA32 - в положение «PV3».
6. Тумблером SA27 установить независимый режим управления инвертора.

7. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

8. Подключить исследуемый трансформатор к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.

9. Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» Инвертора установить номинальное напряжение на первичной обмотке трансформатора (контролировать по прибору PV2;  $U_{1H}=220\text{В}$ ).

10. Занести показания приборов PA2, PV2, PW2 (первичная цепь), PV1, PA1 (вторичная цепь) в таблицу 3.

11. Включить тумблер «SA7». Изменяя переключателем SA5 величину нагрузки, занести показания приборов PA2, PV2, PW2, PV1, PA1 в таблицу 3. При положении переключателя SA5 в крайнем левом положении сопротивление нагрузки  $R_H=R1+R4+R7+R9+R6+R3$  (номиналы взять из паспортных данных стенда либо измерить при отключенном стенде). При SA5 в среднем положении сопротивление нагрузки  $R_H=R1+R4+R6+R3$ . При SA5 в крайнем правом положении сопротивление нагрузки -  $R_H=R1+R3$ . Вывести SA5 в крайнее левое положение.

Включать тумблер SA7 необходимо на минимальное время измерения.

Таблица 4.3 - Рабочие характеристики

№	$R_H, \text{ Ом}$	Измерения				
		$U_1, \text{ В}$ PV2	$I_1, \text{ А}$ PA2	$P_1, \text{ Вт}$ PW2	$U_2, \text{ В}$ PV1	$I_2, \text{ А}$ PA1
1						
...						
6						

Завершив эксперимент, необходимо:

- переключатель SA5 перевести в крайнее левое положение;
- тумблером SA7 отключить нагрузку от вторичной обмотки трансформатора;
- регулятором RP5 уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить Инвертор;
- отключить первичную обмотку трансформатора от выхода Инвертора, нажав кнопку SB2.

#### 4.4 Программа обработки экспериментальных исследований

4.4.1 По опытам х.х. и к.з. и режиму нагрузки построить и рассчитать:

а) параметры  $R_0, X_0, Z_0, \cos\varphi_0, K, R_K, X_K, Z_K$  и относительные их значения. Величины, соответствующие номинальным, следует выделить,

например, подчеркнув их жирной линией. По данным таблиц построить характеристики х.х. и к.з. трансформатора;

б) напряжения к.з. и его составляющие в относительных единицах;

в) внешние характеристики;

г) для заданных преподавателем значений коэффициента мощности нагрузки ( $\cos\varphi_n=1$ ,  $\cos\varphi_n=0,8$ -индуктивный характер нагрузки,  $\cos\varphi_n=0,8$ -ёмкостной характер нагрузки), используя данные опыта к.з., рассчитать и построить внешние характеристики трансформатора  $U_2 = f(I_2)$ . Данные расчётов занести в таблицу 4.3. Для  $\cos\varphi_n=1$  снять внешнюю характеристику экспериментально;

д) зависимость КПД трансформатора от нагрузки:

для заданных преподавателем значений коэффициента мощности нагрузки ( $\cos\varphi_n=1$ ,  $\cos\varphi_n=0,8$  - индуктивный характер нагрузки), используя паспортные данные, данные опыта к.з. и х.х., рассчитать и построить зависимость  $\eta=f(\beta)$ . Данные расчётов занести в таблицу 4.4. Для  $\cos\varphi_n=1$  и значений сопротивлений нагрузки, установленных на стенде, определить  $\eta$  экспериментально. Процентное изменение вторичного напряжения при переменной нагрузке  $\Delta U_2$  определить по снятым характеристикам и рассчитать по формуле;

Таблица 4.3

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

Таблица 4.4

$\beta$		0,25	0,50	0,75	1,0	1,2
$\eta$	При $\cos\varphi_2=1$					
$\eta$	При $\cos\varphi_2=0,8$					

е) построить векторные диаграммы испытаний трансформатора в режиме холостого хода, короткого замыкания и нагруженного трансформатора с активной, активно-индуктивной и активно-ёмкостной.

## 4.5 Анализ результатов лабораторной работы

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

Ток х.х.  $I_{0\text{ном}}$  и мощность х.х.  $P_{0\text{ном}}$ , полученные опытным путем, сравнивают с их значениями по каталогу на исследуемый трансформатор. Значительное превышение опытных значений  $I_{0\text{ном}}$  и  $P_{0\text{ном}}$  над каталожными указывает на наличие дефектов в трансформаторе: к.з. между частью пластин в магнитопроводе или межвитковое к.з. в небольшой части витков какой-либо из обмоток.

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

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

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

## 4.6 Контрольные вопросы

4.6.1 Как устроен однофазный трансформатор?

4.6.2. От чего зависят э.д.с. обмоток трансформатора?

4.6.3. В каких случаях трансформатор называется повышающим и когда понижающим?

4.6.4 Что называется коэффициентом трансформации?

4.6.5 Как определить номинальные токи обмоток трансформатора, если известны его номинальная мощность и напряжения?

4.6.6 Что называется внешней характеристикой трансформатора?

4.6.7 Какие потери энергии имеют место в трансформаторе и от чего они зависят?

4.6.8 Что называют схемой замещения трансформатора и как определить её параметры?

4.6.9 Как выполняют опыты холостого хода и короткого замыкания?

4.6.10 Для чего магнитопровод трансформатора собирают из отдельных листов электротехнической стали?

4.6.11 Почему ваттметр в цепи первичной обмотки трансформатора при разомкнутой вторичной обмотке практически измеряет мощность магнитных потерь.

4.6.12 Почему в режиме холостого хода трансформатора его сердечник нагревается, а обмотки остаются холодными?

4.6.13 Почему в опыте короткого замыкания значительно снижают напряжение на первичной обмотке трансформатора?

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

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

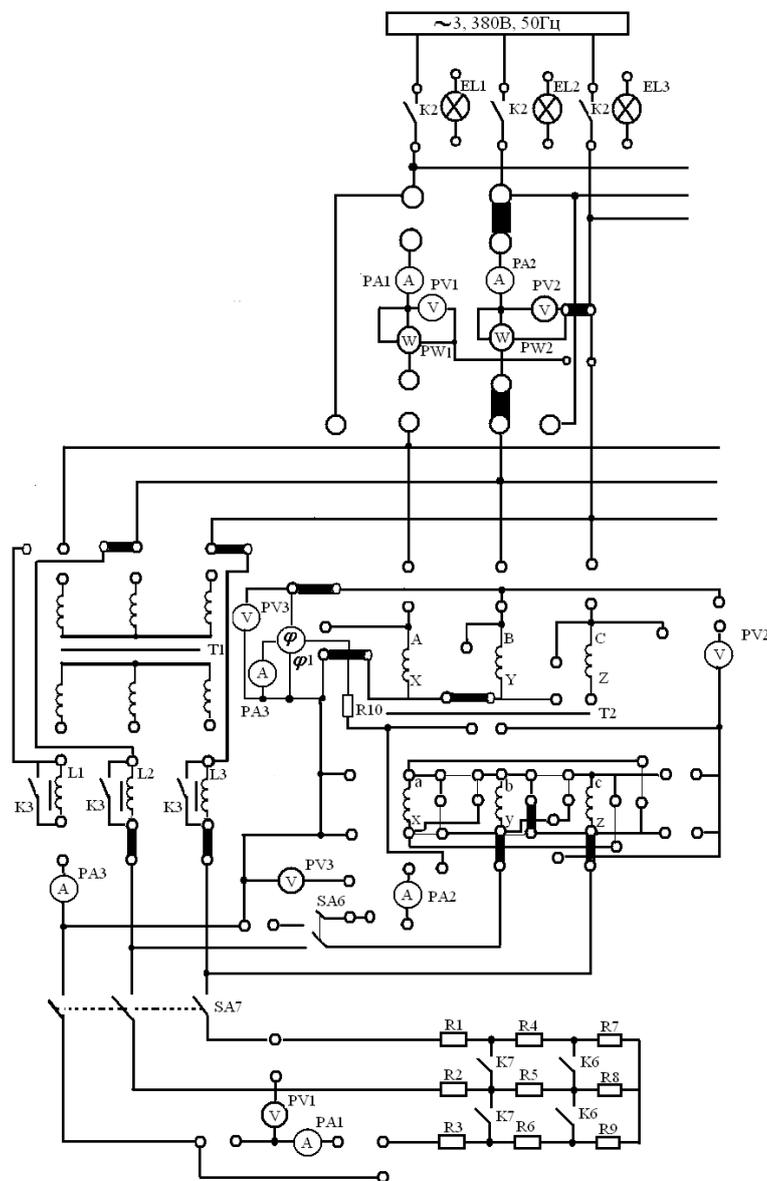


Рисунок 4.1 - Исследование однофазного трансформатора методом холостого хода

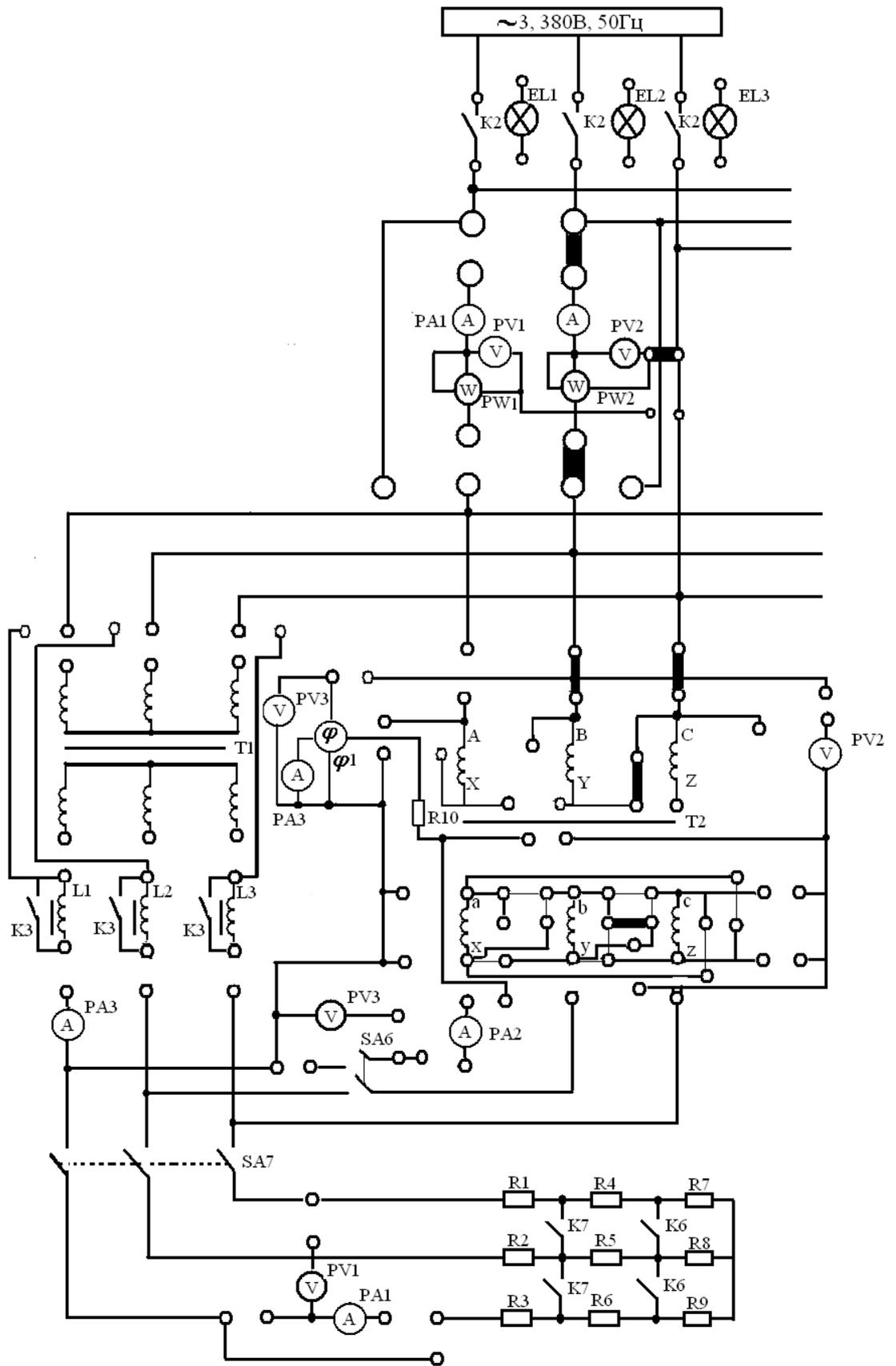


Рисунок 4.2 - Исследование однофазного трансформатора методом короткого замыкания

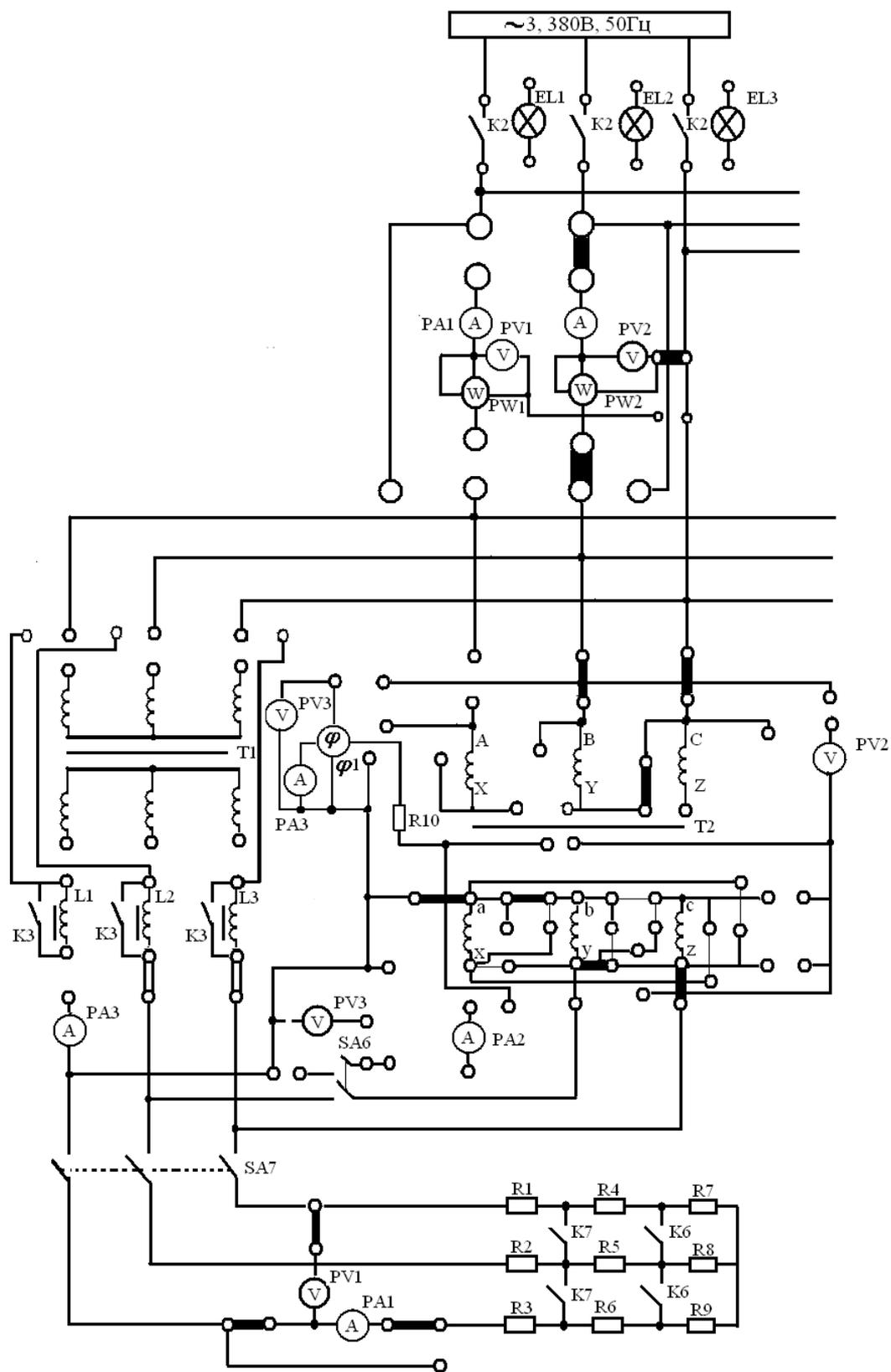


Рисунок 4.3 - Исследование рабочих характеристик однофазного трансформатора

## 5 Лабораторная работа №2. Опытное определение групп соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора

*Цель работы:*

1) Изучить различные группы соединений фазных обмоток трехфазных трансформаторов.

2) Экспериментально подтвердить теоретические сведения о группах соединения трансформаторов и приобрести практические навыки по опытному определению групп соединения трехфазных трансформаторов.

### 5.1 Основные теоретические положения

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

Сдвиг фаз между электродвижущими силами (ЭДС)  $E_{AX}$  и  $E_{ax}$  принято выражать *группой соединения*. Так как этот сдвиг фаз может изменяться от 0 до  $360^\circ$ , а кратность сдвига составляет  $30^\circ$ , то для обозначения группы соединения принят ряд чисел: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 и 0.

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

При одинаковых схемах соединения обмоток ВН и НН, например, Y/Y или  $\Delta/\Delta$ , получают четные группы соединения, а при неодинаковых схемах, например, Y/ $\Delta$  или  $\Delta/Y$  — нечетные.

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

### 5.2 Методы опытной проверки группы соединения

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

#### 5.3.1 Метод фазометра.

Основан на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями (ЭДС) обмоток ВН и НН с помощью фазометра  $\varphi$ , включенного по схеме, показанной на рисунке 5.1, а. Параллельную обмотку фазометра  $U$  подключают к стороне ВН, а последовательную обмотку  $I$  — к стороне НН. Для ограничения тока в последовательной обмотке ее включают через добавочное сопротивление  $r_{доб}$ .

Затем трансформатор включают в сеть с симметричным трехфазным напряжением. Для удобства измерений желательно, чтобы фазометр имел полную ( $360^\circ$ ) шкалу.

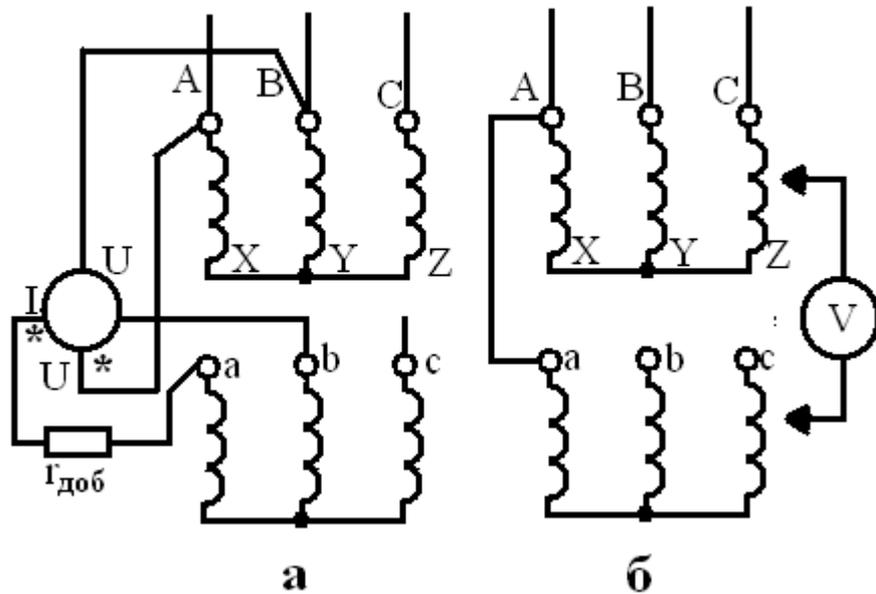


Рисунок 5.1- Проверка группы соединения Y/Y- 0 методами фазометра (а) и вольтметра (б)

5.2.2 Метод вольтметра. Непосредственного измерения угла фазового сдвига между линейными напряжениями (ЭДС) этот метод не дает. Это *косвенный* метод.

*1 способ.*

Он основан на измерении вольтметром напряжений (ЭДС) между одноименными выводами обмоток ВН и НН. Если проверяют группу соединения Y/Y- 0, то, соединив проводом выводы *A* и *a*, измеряют напряжение  $U_{bB}$  (между выводами *b* и *B*) и  $U_{cC}$  (между выводами *c* и *C*). Если предполагаемая группа соединения Y/Y—0 соответствует фактической, то напряжения:

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{ab} (K_l - 1), \quad (5.1)$$

где  $K_l = \frac{U_{AB}}{U_{ab}}$  — отношение линейных напряжений (ЭДС) обмоток ВН

и НН, т.е. коэффициент трансформации линейных напряжений (ЭДС).

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

- группа Y/Y- 6 
$$U_{yB} = U_{zC} = U_{xy} (K_l + 1); \quad (5.2)$$

- группа Y/A — 11 
$$U_{bB} = U_{cC} = U_{ab} \sqrt{1 - \sqrt{3}K_l + K_l^2}; \quad (5.3)$$

- группа Y/Д — 5 
$$U_{yB} = U_{zC} = U_{xy} \sqrt{1 + \sqrt{3}K_l + K_l^2}. \quad (5.4)$$

где  $U_{ab}$  и  $U_{xy}$  — линейные напряжения на выводах обмоток НН, В.

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

*2 способ.*

Соединив зажимы «А» и «а» перемычкой, измеряем напряжения между зажимами АВ, ВС, СА, вА, вВ, сА, сВ, сС. По полученным данным в произвольном масштабе строим равносторонний треугольник ABC первичных линейных напряжений. Так как точки «А» и «а» однопотенциальны, то вершина треугольника вторичных линейных напряжений «а» совпадает с вершиной треугольника первичных линейных напряжений «А». Вершину «в» треугольника вторичных линейных напряжений находим в точке пересечения трех отрезков: отрезка «вА», проведенного из вершины «А» треугольника ABC, отрезка «вВ», проведенного из вершины «В», отрезка «вС», проведенного из вершины «С». Вершину «с» треугольника вторичных линейных напряжений находим в точке пересечения трех отрезков «сА», «сВ», «сС».

### **5.3 Задание на выполнение лабораторной работы**

5.3.1 Используя данные опыта холостого хода лабораторной работы №1, рассчитайте  $K_L$  для 0,5,6 и 11 групп соединения.

5.3.2 Экспериментально проверить 0; 5; 6 и 11 группы соединения трехфазного трансформатора.

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

5.3.4 Составить отчет и сделать заключение о проделанной работе.

Порядок работы с лабораторной установкой.

*Все тумблеры на лицевой панели перед каждым опытом - в нижнем положении.*

1. Соединение вторичной обмотки в схему прямая звезда.

*Метод вольтметра.*

Собрать схему (рисунок 5.2). Вольтметр pV2 подсоединить к выводам трансформатора вВ. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2, контакты которой подключат испытуемый трансформатор к сети  $\sim 3, 380\text{В}, 50\text{Гц}$ . Записать показания приборов pV3 ( $U_{ab}$ ) и pV2 ( $U_{bB}$ ). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Вольтметр pV2 подсоединить к выводам сС (рисунок 5.2 – пунктирная линия). Кнопкой SB3 включить К2. Записать показание pV2 ( $U_{cC}$ ). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

*Метод фазометра.*

Собрать схему (рисунок 5.3). Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2. Записать

показания фазометра. Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

2. Соединение вторичной обмотки в схему «обратная звезда».

*Метод вольтметра.*

Собрать схему (рисунок 5.4). Вольтметр pV2 подсоединить к выводам трансформатора уВ. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2, контакты которой подключат испытуемый трансформатор к сети -3, 380 В, 50 Гц. Записать показания приборов pV3 ( $U_{xy}$ ) и pV2 ( $U_{yB}$ ). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Вольтметр pV2 подсоединить к выводам zC (рисунок 5.4 – пунктирная линия). Кнопкой SB3 включить К2. Записать показание pV2 ( $U_{zC}$ ). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

*Метод фазометра.*

Собрать схему (рисунок 5.5). Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2. Записать показания фазометра. Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

3. Соединение вторичной обмотки в схему прямой треугольник.

*Метод вольтметра.*

Собрать схему (рисунок 5.6). Вольтметр pV2 подсоединить к выводам трансформатора bB. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2, контакты которой подключат испытуемый трансформатор к сети -3, 380В, 50Гц. Записать показания приборов pV3 ( $U_{ab}$ ) и pV2 ( $U_{bB}$ ). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Вольтметр pV2 подсоединить к выводам сC (рисунок 5.6 – пунктирная линия). Кнопкой SB3 включить К2. Записать показание pV2 ( $U_{cC}$ ). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

*Метод фазометра.*

Собрать схему (рисунок 5.7). Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB1 подать питание на катушку пускателя К2. Записать показания фазометра. Кнопкой SB2 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

4. Соединение вторичной обмотки в схему обратный треугольник.

*Метод вольтметра.*

Собрать схему (рисунок 5.8). Вольтметр pV2 подсоединить к выводам трансформатора уВ. Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2, контакты которой подключат испытуемый трансформатор к сети -3, 380 В, 50 Гц. Записать показания приборов pV3 ( $U_{xy}$ ) и pV2 ( $U_{yB}$ ). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Вольтметр pV2 подсоединить к выводам zC (рисунок 5.8 – пунктирная линия). Кнопкой SB3 включить К2. Записать показание pV2 ( $U_{zC}$ ). Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

### *Метод фазометра.*

Собрать схему (рисунок 5.9). Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя К2. Записать показания фазометра. Кнопкой SB4 отключить пускатель К2. Выключить автоматический выключатель «Сеть».

## **5.4 Анализ результатов лабораторной работы**

При анализе результатов лабораторной работы необходимо иметь в виду следующее:

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

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

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

## **5.5 Контрольные вопросы**

5.5.1 Какие могут быть типы и группы соединения обмоток трехфазных трансформаторов?

5.5.2 Как определяют с помощью вольтметра группу соединения обмоток трехфазного трансформатора?

5.5.3 Чем определяется группа соединения трансформатора?

5.5.4 Какие группы соединения могут быть получены при одинаковой схеме соединения обмоток ВН и НН?

5.5.5 Какие группы соединения называют основными, а какие – производными?

5.5.6 Каким образом из основных групп соединения можно получить производные?

5.5.7 Перечислите группы соединения, предусмотренные ГОСТ, нарисуйте соответствующие им схемы соединения обмоток и топографические диаграммы.

5.5.8 В чем состоит метод фазометра при определении группы соединения трансформатора?

5.5.9 С какой целью при определении группы соединения по методу вольтметра соединяют выводы А-а (рисунок 5.1, а)?

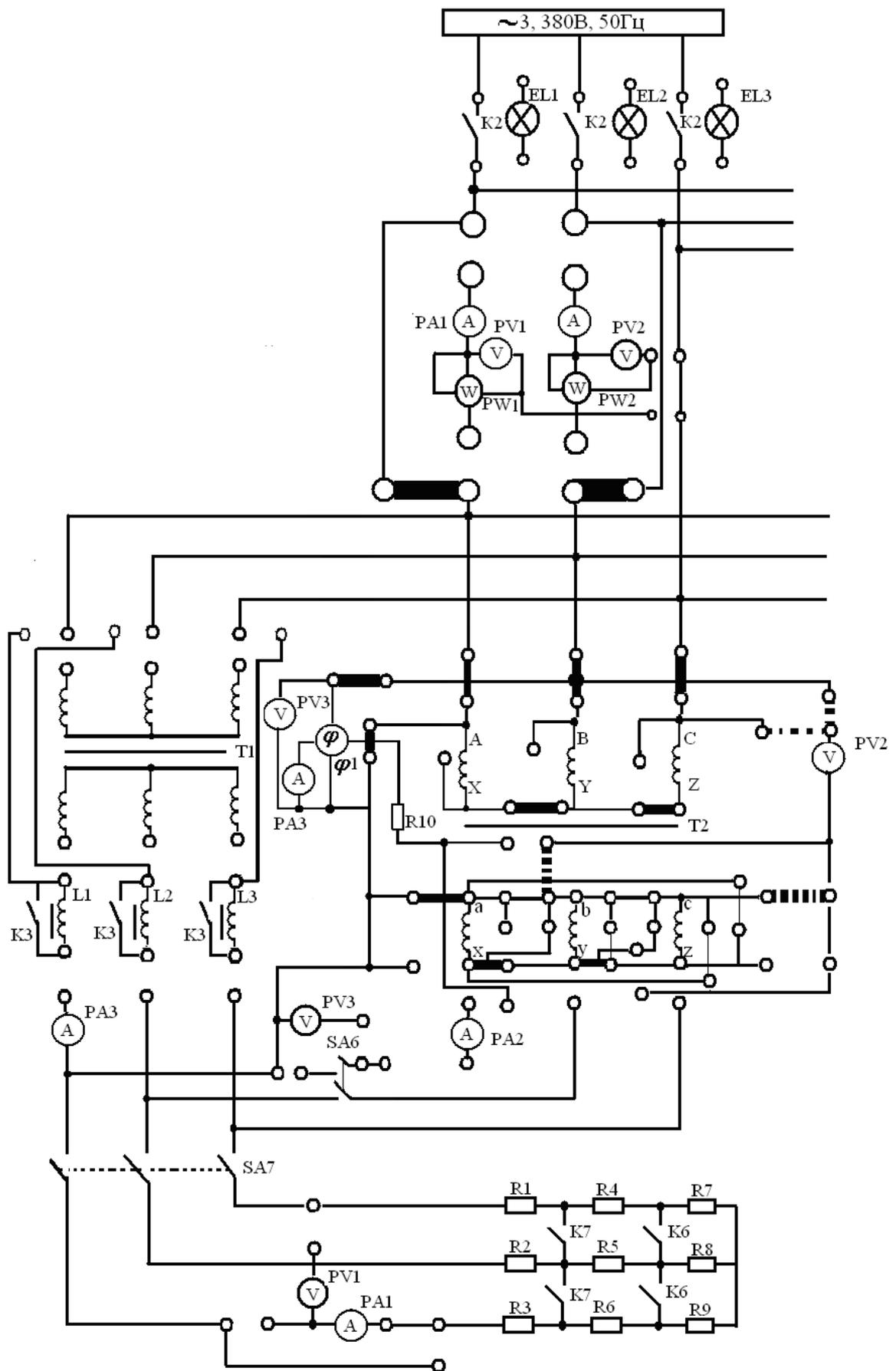


Рисунок 5.2 - Прямая звезда. Метод вольтметра



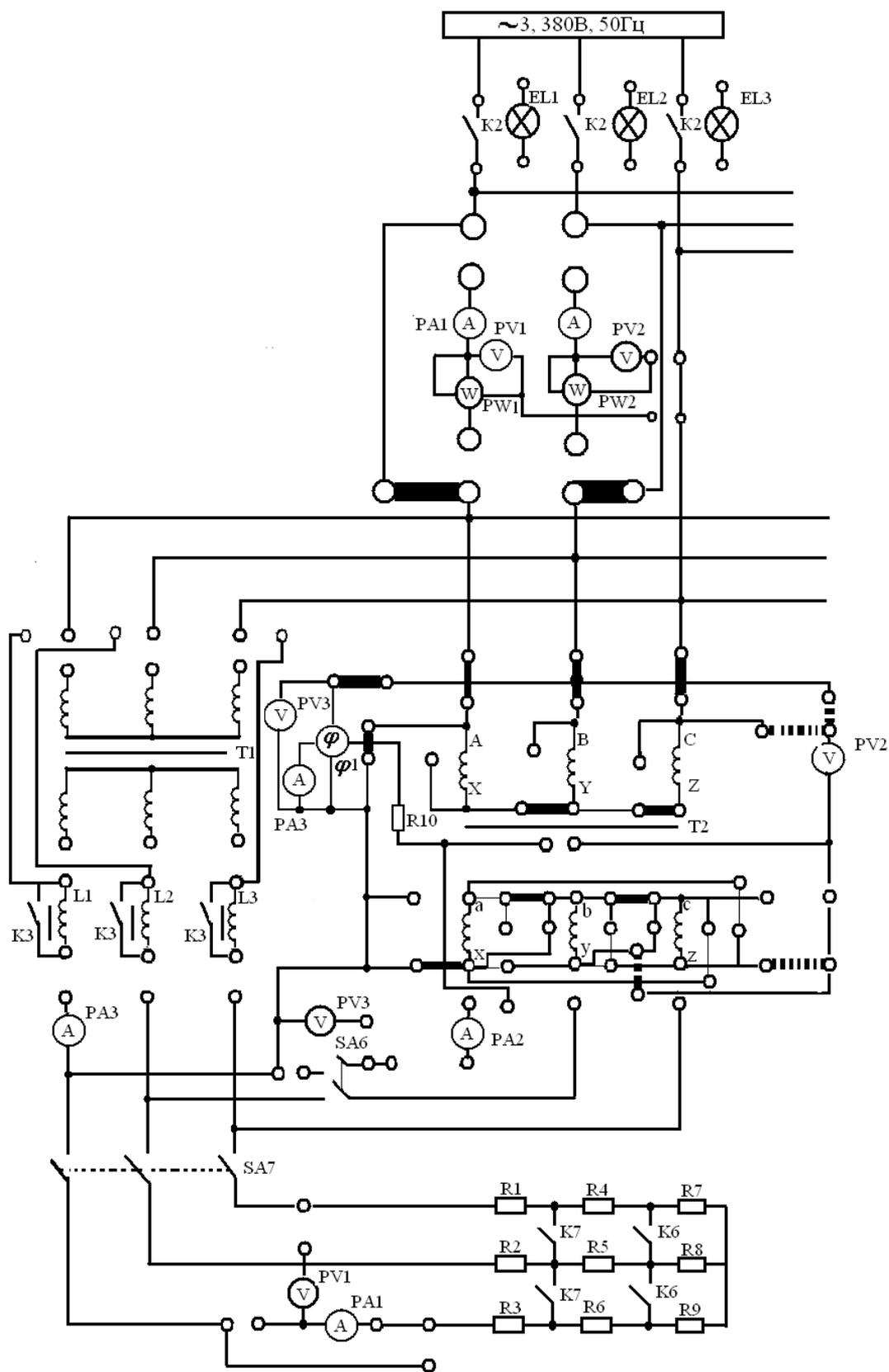


Рисунок 5.4 - Обратная звезда. Метод вольтметра

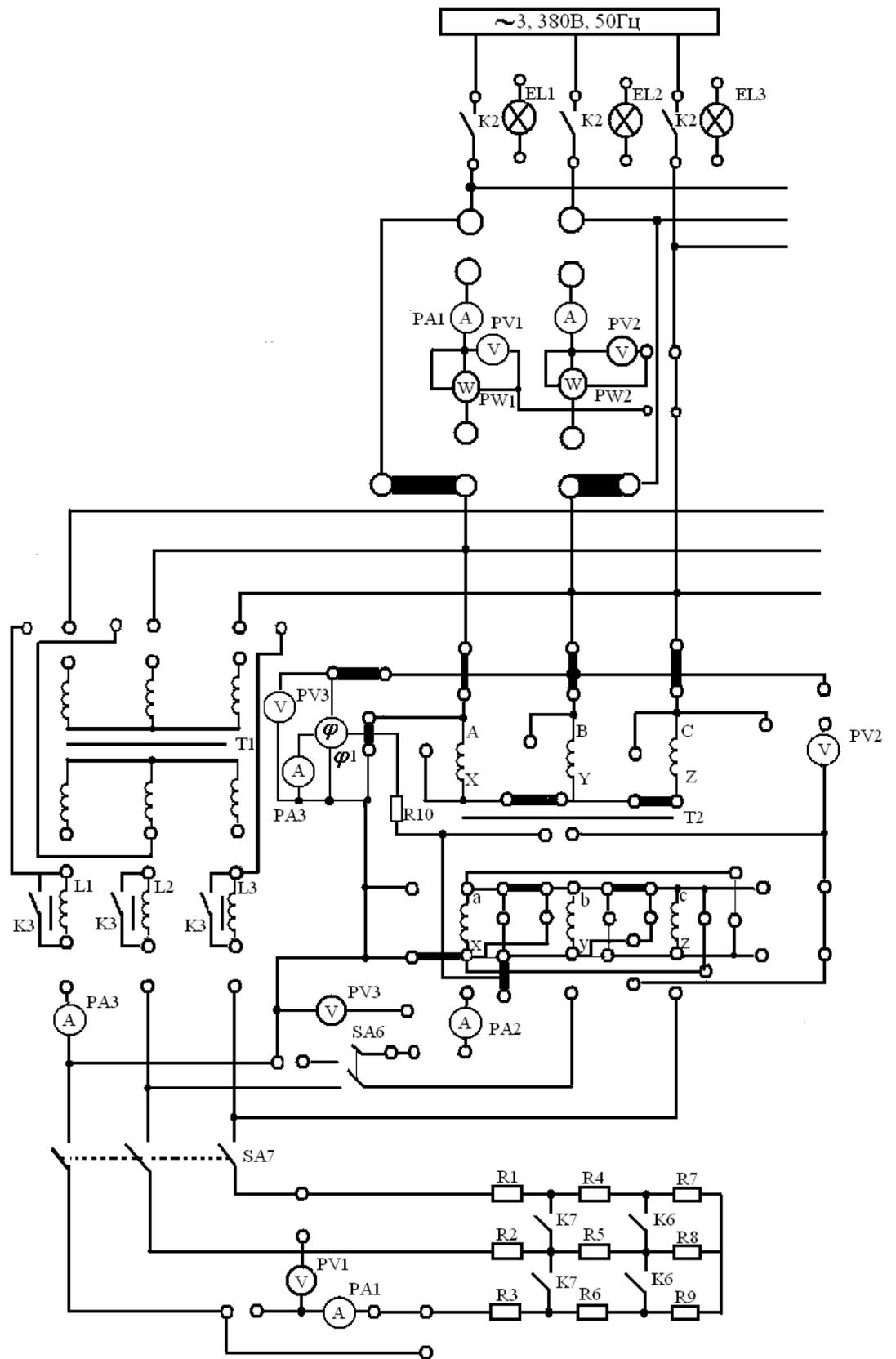


Рисунок 5.5 - Обратная звезда. Метод фазометра

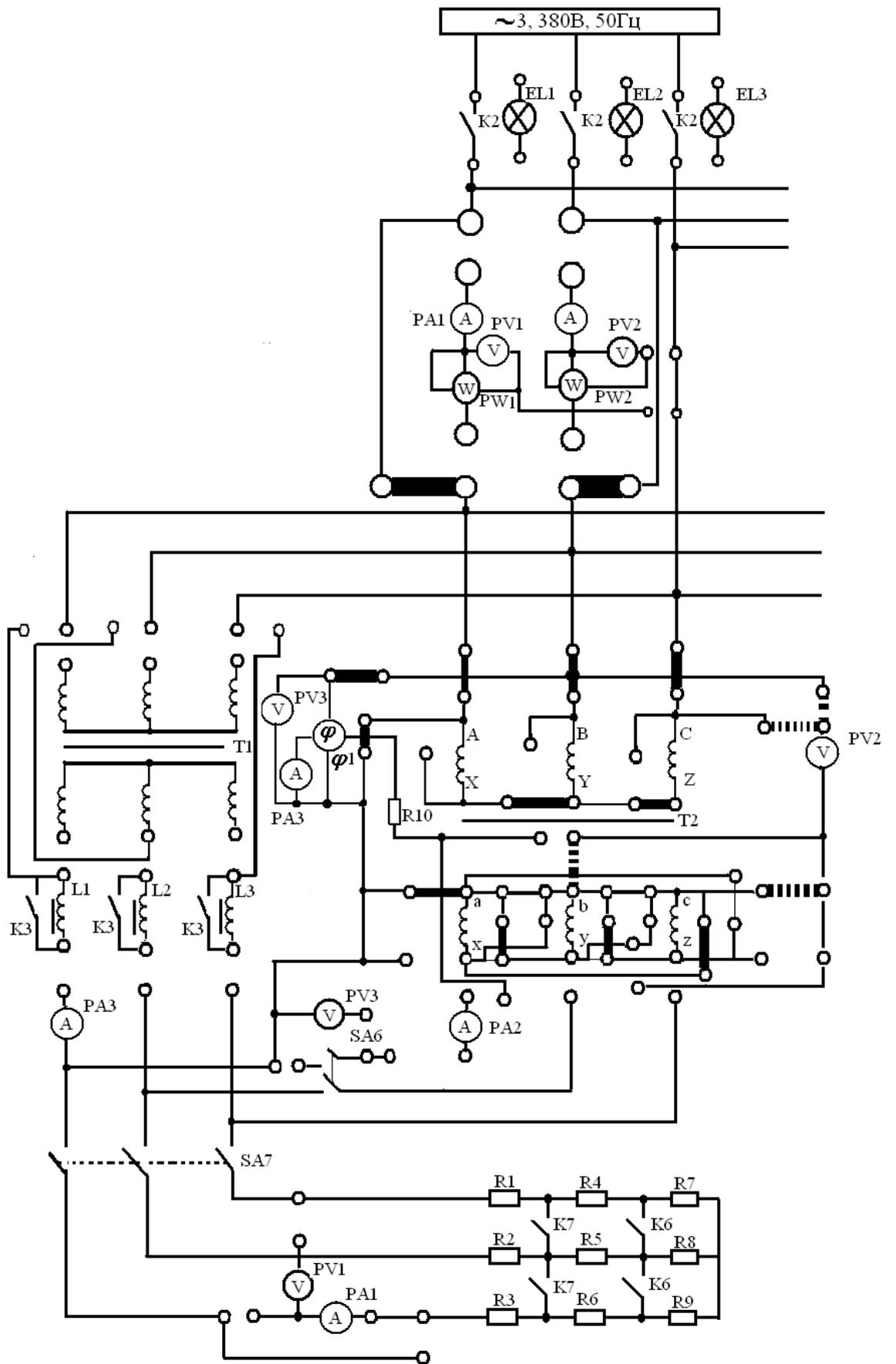


Рисунок 5.6 - Прямой треугольник. Метод вольтметра

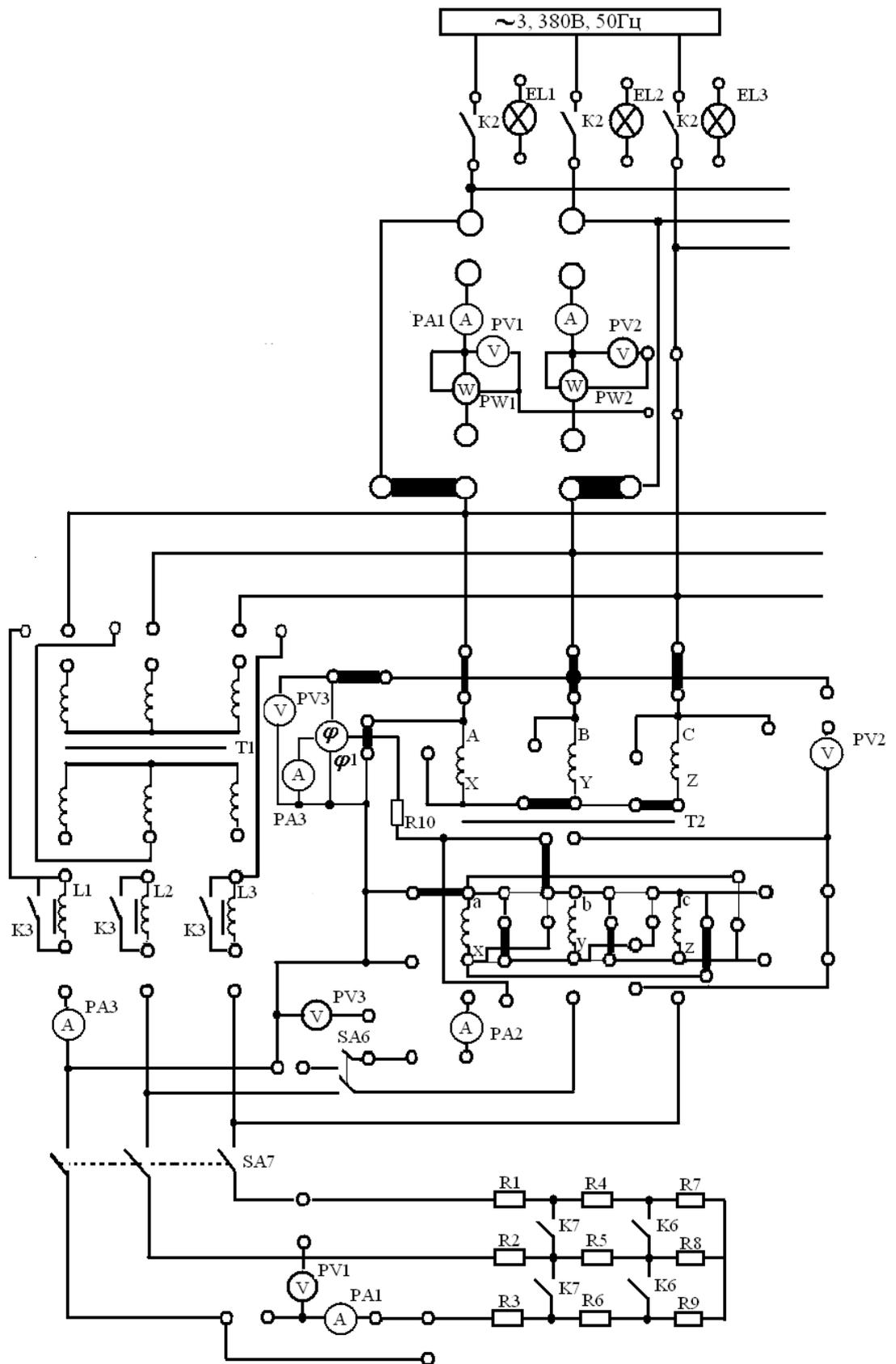


Рисунок 5.7 - Прямой треугольник. Метод фазометра

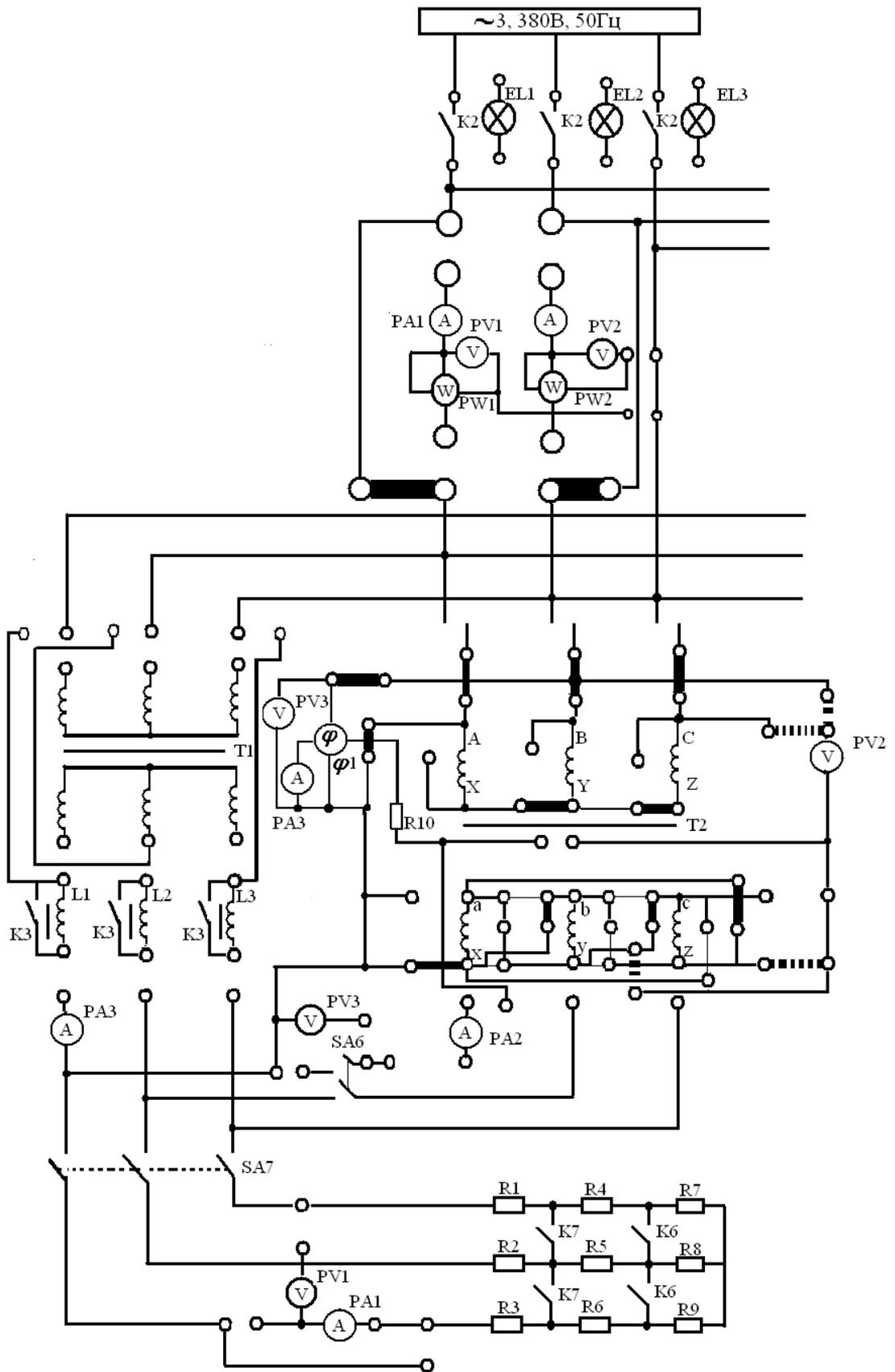


Рисунок 5.8 – Обратный треугольник. Метод вольтметр

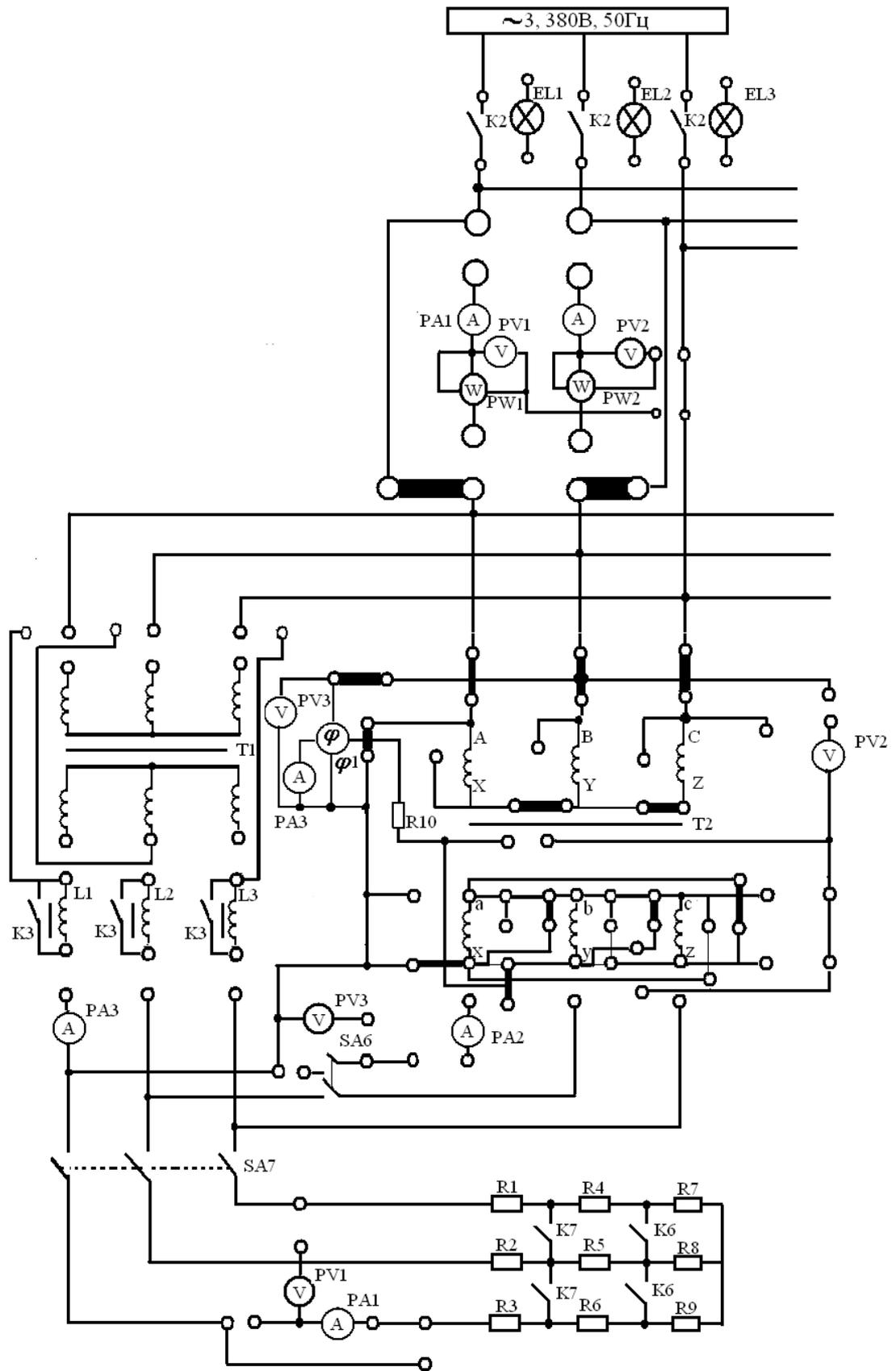


Рисунок 5.9 – Обратный треугольник. Метод фазометра

## **6 Лабораторная работа №3. Исследование параллельной работы трёхфазных двухобмоточных трансформаторов**

*Цель работы:*

1) Изучение условий включения трансформаторов на параллельную работу и принципа распределения нагрузки между параллельно работающими трансформаторами.

2) Приобретение практических навыков по включению трехфазных трансформаторов на параллельную работу.

### **6.1 Краткие теоретические сведения**

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

- трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации, т. е. при одинаковых первичных напряжениях вторичные напряжения трансформаторов должны быть равны;
- трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения;
- трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения к.з.;
- схема соединений при включении трансформаторов должна обеспечивать одинаковый порядок следования фаз как на стороне ВН, так и на стороне НН.

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

Нарушение первого и второго условий вызывает появление больших уравнительных токов между обмотками трансформаторов, что ведет к чрезмерному перегреву трансформаторов, т. е. делает их совместную работу невозможной. Что же касается третьего условия, то неравенство напряжений

к.з. трансформаторов более чем на 10% от их среднего значения ведет к тому, что распределение нагрузки между трансформаторами становится в значительной степени непропорциональной их номинальным мощностям.

Равенство коэффициентов трансформации и напряжений к.з. обеспечивается подбором трансформаторов по их паспортным данным. Коэффициенты трансформации  $n_1$  и  $n_2$  не должны различаться более чем на  $\pm 0,5\%$  от их среднего значения:

$$\Delta K = \frac{K_1 - K_2}{K} \cdot 100 \leq \pm 0.5\% , \quad (6.1)$$

где  $K = \sqrt{K_1 \cdot K_2}$  - среднее геометрическое значение коэффициентов трансформации.

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

$$\Delta u_k = \frac{u_{k1} - u_{k2}}{u_k} \cdot 100 \leq \pm 10\% , \quad (6.2)$$

где  $u_k = \frac{u_{k1} + u_{k2}}{2}$  - среднее арифметическое значение напряжений

к.з.

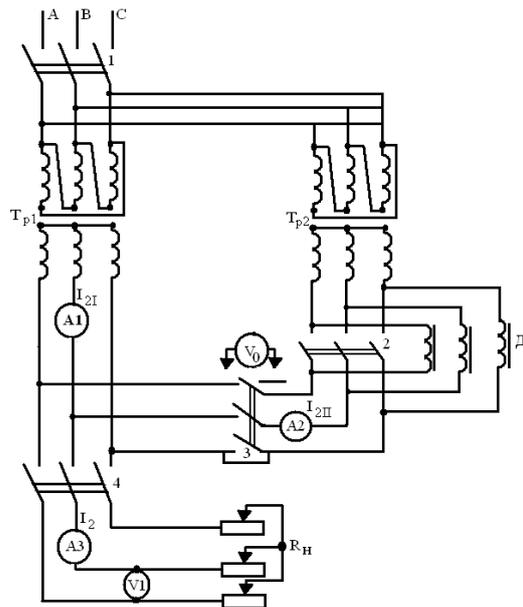


Рисунок 6.1 - Схема включения трехфазных двухобмоточных трансформаторов на параллельную работу

Прежде чем подключить трансформаторы на параллельную работу, т. е. включить рубильник 3, при замкнутом рубильнике 1 (рисунок 6.1) необходимо провести фазировку трансформаторов, т.е. проверку соответствия фаз вторичных ЭДС трансформаторов  $T_{p1}$  и  $T_{p2}$ . Для этого соединяют проводом одну пару противоположащих клемм рубильника 3 и вольтметром  $V_0$  измеряют напряжение между двумя несоединенными парами противоположащих клемм рубильника 3. Если вторичные напряжения трансформаторов равны, их

группы соединения одинаковы и порядок следования фаз у них один и тот же, то показания вольтметра  $V_0$  равны нулю. В этом случае рубильник 3 можно замкнуть, т. е. включить трансформаторы на параллельную работу. Если же вольтметр  $V_0$  показывает некоторое напряжение, то необходимо выяснить, какое из условий параллельной работы нарушено (обычно это нарушение одинакового порядка следования фаз), устранить его и вновь провести фазировку трансформаторов.

## 6.2 Задание на выполнение лабораторной работы

6.2.1 Произведите фазировку трансформаторов.

6.2.2 Снимите данные и постройте внешнюю характеристику при  $u_{к1}=u_{к2}$ .

6.2.3 Снимите данные и постройте внешнюю характеристику при  $u_{к1}>u_{к2}$ .

## 6.3 Порядок работы с лабораторной установкой

6.3.1 Фазировка. Собрать схему (рисунок 6.2). Включить автоматический выключатель «Сеть». Кнопкой SB3 подать питание на катушку пускателя K2, контакты которой подключают испытуемые трансформаторы к сети - 3, 380В, 50Гц. Включить SA2 - контакты пускателя K3 зашунтируют дроссели L1-L3. При выключенном SA6 вольтметр pV3 должен показывать 0. Перейти к выполнению пункта 6.3.2.

6.3.2 Снятие внешней характеристики при  $u_{к1} = u_{к2}$

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

Завершив эксперимент, необходимо:

- перевести переключатель SA5 в крайнее левое положение;
- тумблером SA5 отключить нагрузку от выходов трансформаторов;
- тумблером SA6 отключить параллельную работу трансформаторов;
- отключить исследуемые трансформаторы от питающей сети, нажав кнопку SB4;

- выключить автоматический выключатель «Сеть» и перейти к выполнению п.6.3.3.

6.3.3 Снятие внешней характеристики при  $u_{к1}>u_{к2}$ .

Переключателем SA2 обесточить катушку пускателя K3 – дроссели L1÷L3 введены. Снять показания приборов pV1, pA1. Установить

переключатель SA5 в среднее положение. Нагрузка в этом случае симметрична и равна  $R_1+R_4 = R_2+R_5 = R_3+R_6$ . Снять показания приборов pV1, pA1. Установить переключатель SA5 в крайнее правое положение. Нагрузка в этом случае симметрична и равна  $R_1 = R_2 = R_3$ . Снять показания приборов pV1, pA1. Перевести переключатель SA5 в крайнее левое положение. Выключить SA7, SA6, кнопкой SB4 обесточить K2, выключить автоматический выключатель «Сеть».

#### **6.4 Контрольные вопросы**

6.4.1 С какой целью применяют параллельную работу трансформаторов?

6.4.2. Каковы условия включения трансформаторов на параллельную работу?

6.4.3 Почему не допускается включение на параллельную работу трансформаторов с разными группами соединения, даже при одинаковых вторичных напряжениях?

6.4.4 Каковы допуски на различие коэффициентов трансформации и напряжений к.з. для трансформаторов, включаемых на параллельную работу?

6.4.5 Что такое фазировка трансформаторов, для чего и как она выполняется?

6.4.6 От чего зависит распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами?

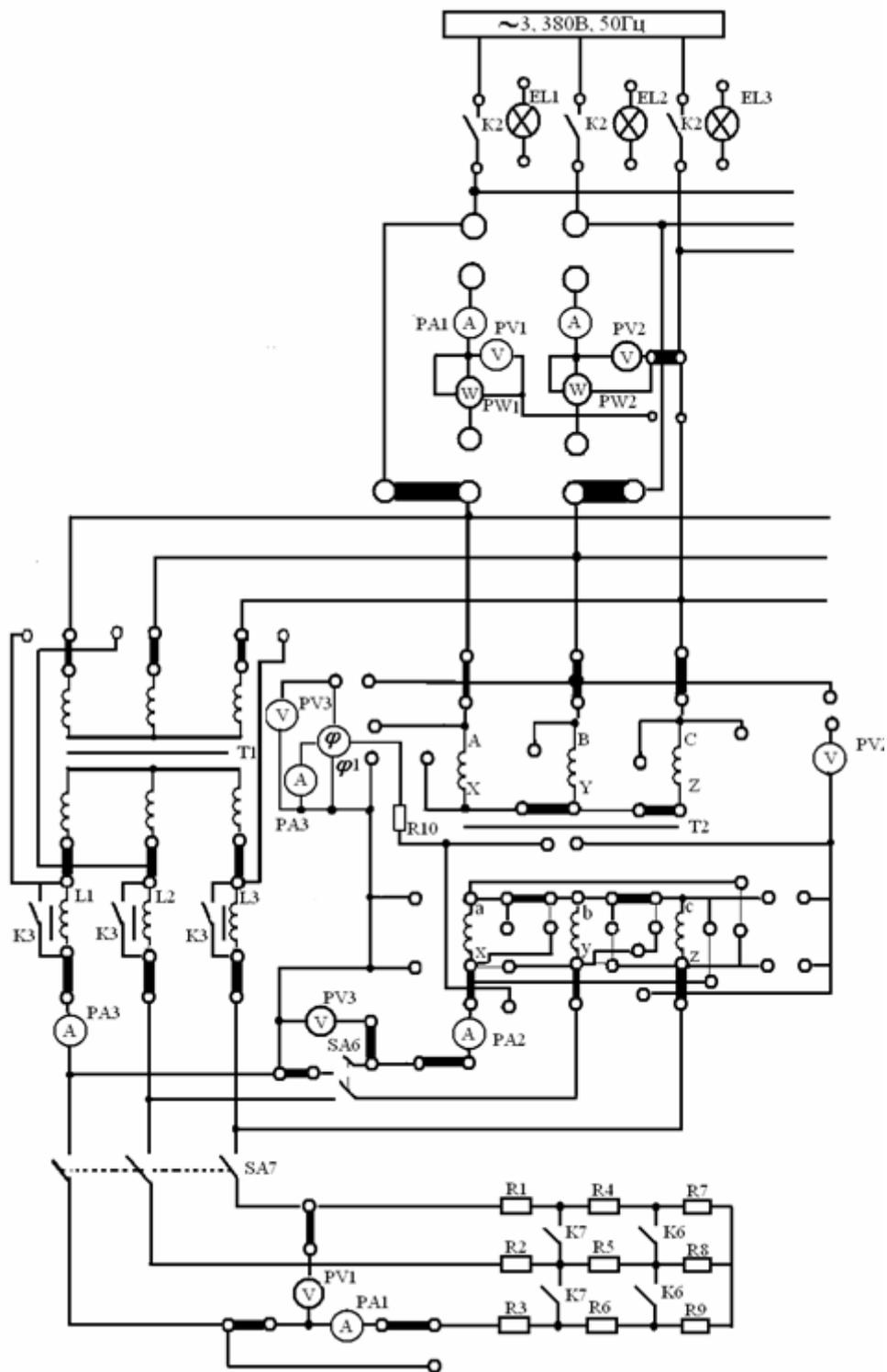


Рисунок 6.2 - Снятие внешней характеристики параллельной работы трансформаторов

## **7 Лабораторная работа №4. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

*Цель работы:* Изучить конструкцию трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и освоить приемы снятия его характеристик.

### **7.1 Основные теоретические сведения**

7.1.1 Общие положения. Характерной особенностью асинхронной машины является наличие скольжения, то есть неравенства частоты вращения ротора и магнитного поля статора. По этой причине машину называют асинхронной.

Существует два метода получения данных для построения рабочих характеристик асинхронных двигателей: метод непосредственной нагрузки и косвенный метод. Метод непосредственной нагрузки заключается в опытном исследовании двигателя в диапазоне нагрузок от холостого хода до режима номинальной нагрузки с измерением необходимых параметров. Этот метод обычно применяется для двигателей мощностью не более 10-15 кВт.

С ростом мощности двигателя усложняется задача его нагрузки, растут непроизводительный расход электроэнергии и загрузка электросети. Применение этого метода ограничивается еще и тем, что не всегда представляется возможным создать испытательную установку по причине отсутствия требуемого оборудования и недопустимости перегрузки электросети.

Широкое применение получил более универсальный косвенный метод, применение которого не ограничивается мощностью двигателя. Этот метод заключается в выполнении двух экспериментов: опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

Опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронных двигателей, в основном, аналогичны таким же опытам трансформаторов. Но они имеют и некоторые особенности, обусловленные, главным образом, наличием у двигателя вращающейся части - ротора. Кроме того, при переходе из режима холостого хода в режим короткого замыкания параметры обмоток двигателя (активные и индуктивные сопротивления) не остаются неизменными, что объясняется зубчатой поверхностью статора и ротора. Все это создает некоторые затруднения в проведении опытов и в последующей обработке их результатов.

7.1.2 Опыт холостого хода. Данный опыт даёт возможность изучить свойства магнитной цепи машины, определить возникающие при холостом ходе потери и чисто механические свойства асинхронного двигателя при питании от источника регулируемого напряжения номинальной частоты. Асинхронный двигатель потребляет мощность, которая расходуется в основном, на покрытие потерь в стали и механических потерь.

Известно, что намагничивающий ток берётся из сети. Для получения характеристики холостого хода производят несколько измерений при  $n=const$ ,  $f=const$  и  $U_1=var$ . Напряжение может снижаться до одной трети  $U_{НОМ}$  без нарушения устойчивой работы асинхронного двигателя. Дальнейшее снижение ведёт к некоторым затруднениям и в большинстве случаев не даёт интересных результатов. При проведении опытов следует всегда повышать напряжение сверх номинального, чтобы проследить за характером изменения потерь в стали и намагничивающей силы при увеличении магнитного потока.

Для полной оценки асинхронного двигателя необходимо знание потерь холостого хода, то есть механических потерь ( $P_{МЕХ}$ ) и потерь в стали ( $P_{СТ}$ ). Они определяются на холостом ходу мощностью ( $P_0$ ) за вычетом потерь в обмотке статора ( $P_{ЭЛ1}$ ). Так как ( $P_{ЭЛ1}$ ) очень малы, ввиду малости  $I_0$ , (незначительная доля по сравнению с  $P_{МЕХ}$  и  $P_{СТ}$ ) – ими пренебрегают, и потери холостого хода можно приравнять к ( $P_0$ ).

Питание асинхронного двигателя при опыте холостого хода (рисунок 7.1) осуществляется через Инвертор напряжения, позволяющий изменять напряжение и частоту в широких пределах. При этом вал двигателя должен быть свободным от механической нагрузки.

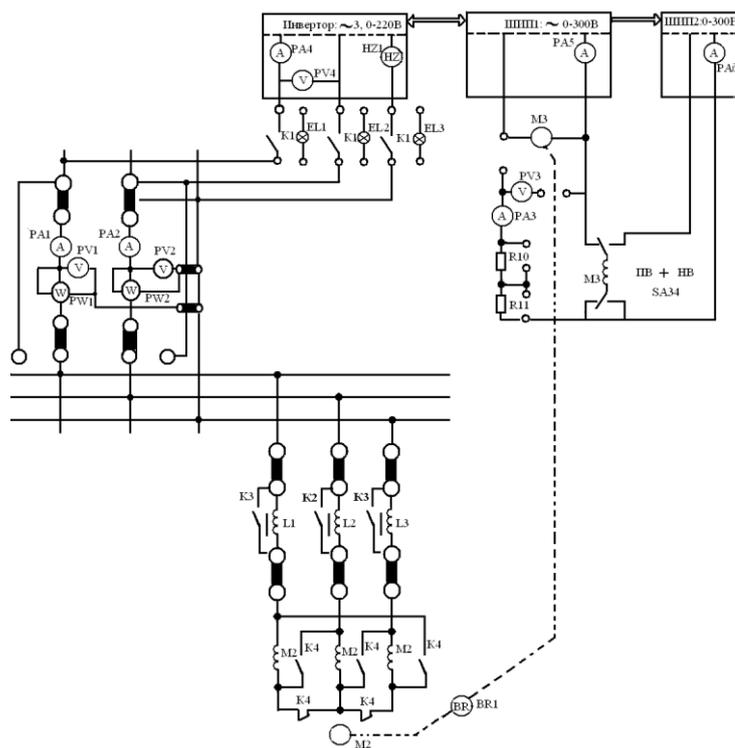


Рисунок 7.1 - Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Опыт начинают с напряжения питания  $U = 1,15 \cdot U_{НОМ}$ , затем постепенно понижают напряжение до  $U = 0,4 \cdot U_{НОМ}$  так, чтобы снять показания приборов в  $5 \div 7$  точках. При этом один из замеров должен соответствовать номинальному напряжению  $U_{НОМ}$ .

Измеряют линейные значения напряжений и токов, а затем (в зависимости от схемы соединения обмотки статора) определяют фазные значения напряжения и тока холостого хода.

Активная мощность  $P_0$  измеряется в опыте холостого хода ваттметром и включает в себя электрические потери в обмотке статора:

$$P_{эл1} = 3 \cdot r_1 \cdot I_{\phi}^2, \text{ Вт.} \quad (7.1)$$

Здесь  $r_1$ -активное сопротивление фазы обмотки статора (Ом), измеренное непосредственно после отключения двигателя от сети, чтобы обмотка не успела охладиться.

Магнитные потери в сердечнике статора  $P_{СТ}$  и механические потери  $P_{МЕХ}$ :

$$P_0 = P_{эл1} + P_{СТ} + P_{мех}, \text{ Вт.} \quad (7.2)$$

Сумма магнитных и механических потерь двигателя:

$$P_{СТ} + P_{МЕХ} = P_0 - P_{эл1}, \text{ Вт.} \quad (7.3)$$

Коэффициент мощности для режима холостого хода:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_{\phi 0} \cdot I_{\phi 0}}. \quad (7.4)$$

По результатам измерений и вычислений строят характеристики холостого хода  $I_0$ ,  $P_0$ ,  $\cos \varphi_0 = f(U_1)$ , на которых отмечают значения величин  $I_{0ном}$ ,  $P_{0ном}$ ,  $(P_{ст} + P_{мех.ном})$  и  $\cos \varphi_{ном}$ , соответствующих номинальному напряжению  $U_{1ном}$ .

Если график  $(P_{ст} + P_{мех}) = f(U_1)$  продолжить до пересечения с осью ординат ( $U_1 = 0$ ), то получим величину потерь  $P_{мех}$ .

Это разделение магнитных и механических потерь основано на том, что при неизменной частоте сети  $f_1$  частота вращения ротора двигателя в режиме холостого хода  $n_0$ , а следовательно, и механические потери  $P_{мех}$  неизменны. В то же время магнитный поток  $\Phi$  прямо пропорционален ЭДС статора  $E_1$ .

Для режима холостого хода  $U_1 = E_1$ , а поэтому при  $U_1 = 0$  и магнитный поток  $\Phi = 0$ , а следовательно, и магнитные потери  $P_{ст} = 0$ . Определив величину механических потерь  $P_{мех}$ , можно вычислить магнитные потери  $P_{ст}$ :

$$P_{CT} = P_0 - P_{мех}, \text{ Вт.} \quad (7.5)$$

Согласно ГОСТу, перед проведением опытов необходимо провести обкатку асинхронного двигателя для прогрева подшипников:

- для АД до 11 кВт - 15 минут;
- от 11 кВт до 110 кВт - 30 минут;
- свыше 110 кВт - 75 минут.

7.1.3 Опыт короткого замыкания. Опыт короткого замыкания проводится по такой же схеме, как и в опыте холостого хода (рисунок 7.1), но при этом измерительные приборы должны быть выбраны в соответствии с пределами измерения тока, напряжения и мощности. Ротор двигателя следует жестко закрепить. Предельное значение тока статора при опыте короткого замыкания устанавливают, исходя из допустимой токовой нагрузки питающей сети и возможности провести опыт в минимальный срок, чтобы не вызвать опасного перегрева двигателя. Для двигателей мощностью до 1 кВт возможно проведение опыта, начиная с номинального напряжения  $U_K = U_{НОМ}$ . В этом случае предельный ток -  $I_K = (5 \div 7) \cdot I_{НОМ}$ . При выполнении опыта короткого замыкания желательно соединение обмотки статора звездой.

Определив диапазон изменения тока статора при опыте короткого замыкания, опыт начинают с предельного значения этого тока, установив соответствующее напряжение короткого замыкания  $U_K$ . Затем постепенно снижают это напряжение до значения, при котором ток достигнет нижнего предела установленного диапазона его значений. При этом снимают показания приборов для 5÷7 точек, одна из которых должна соответствовать номинальному току статора ( $I_K = I_{НОМ}$ ).

Продолжительность опыта должна быть минимально возможной. После снятия последних показаний приборов двигатель следует отключить и сразу же произвести замер активного сопротивления фазы обмотки статора  $r_1'$ , чтобы определить температуру обмотки. В зависимости от схемы соединения обмотки статора, линейные напряжения и токи пересчитывают на фазные  $U_K$  и  $I_K$ .

Таблица 7.1 - Обязательный отсчёт напряжения при опыте короткого замыкания

Номинальное фазное напряжение $U_{1НОМ}$ , В	127	220	380	500	3000	6000
Фазное напряжение короткого замыкания $U_{K.НОМ}$ , В	33	58	100	130	800	1600

Опыт, проведённый при пониженном напряжении относительно номинального, требует введения поправки на насыщение. Эта поправка состоит в том, что выше наибольшего значения, при опыте короткого замыкания, ток предполагается возрастающим по касательной к кривой, изображающей его зависимость от напряжения.

Для определения  $U_{к.НОМ}$  нужно построить график по данным таблицы 7.1.

Ток и мощность короткого замыкания пересчитывают на номинальное напряжение  $U_{IНОМ}$  по формулам:

$$I_{II} = I_{IНОМ} \cdot \left(\frac{U_{IНОМ}}{U_{к.НОМ}}\right), \text{ А}; \quad (7.5)$$

$$P'_K = P_{к.НОМ} \cdot \left(\frac{U_{IНОМ}}{U_{к.НОМ}}\right)^2, \text{ Вт}. \quad (7.6)$$

7.1.4 Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Под рабочими характеристиками асинхронного двигателя понимают зависимость ряда величин:  $P_1$ ,  $I_1$ ,  $S$ ,  $\cos\varphi$ , КПД от полезной мощности  $P_2$  при условии неизменного приложенного напряжения  $U_1$  и его частоты  $f_1$ .

Снятие рабочих характеристик следует производить при нагретых обмотках статора и ротора.

## 7.2 Задание на выполнение лабораторной работы

7.2.1 Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.

7.2.2 Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

7.2.3 Снять характеристики холостого хода. Определить потери холостого хода.

7.2.4 Снять характеристики короткого замыкания при заторможенном роторе. Определить потери короткого замыкания. Определить кратность пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя.

7.2.5 Снять и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя при номинальном напряжении и частоте сети.

7.2.6 Построить круговую диаграмму по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

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

## 7.3 Порядок работы с лабораторной установкой

7.3.1 Опыт холостого хода. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении; все

дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

Тумблером SA1 подключить к сети схему управления:

1) Тумблером SA2 включить пускатель КЗ и замкнуть контактами пускателя дроссели L1, L2, L3.

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

3) Тумблером SA27 установить независимый режим управления инвертора.

4) Установить выключатель SA30 в положение «PW1», SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 - в положение «PV3».

5) С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

6) С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

7) Подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора, нажав кнопку SB1.

8) Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» Инвертора плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до значения  $U=100\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4). Ротор двигателя в этом случае вращается с частотой, весьма близкой к синхронной (105 рад/сек). Чтобы достичь синхронной частоты вращения  $n_0$  и компенсировать механические потери  $P_{\text{мех}}$ , нужно подключить к сети вспомогательную машину М3, которая работает в двигательном режиме. Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;

- тумблером SA25 включить ШИП2;

- помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения (0,5А) вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру PA6);

- установить режим работы ШИП1: SA20 «Отключить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Двигательный режим»;

- тумблером SA23 включить ШИП1;

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1, плавно увеличивая напряжение на выходе, разогнать исследуемый двигатель до синхронной частоты вращения. Для более точного определения синхронной частоты вращения можно воспользоваться ваттметрами PW1, PW2. При приближении к синхронной частоты вращения активная мощность уменьшается до нуля;

- при  $n=n_0$  снять показания приборов. Увеличивая напряжение на исследуемом двигателе М2 от 100В до 220В, снять 5÷6 точек. Синхронную частоту вращения поддерживать постоянной (контролировать по прибору BR1), изменяя напряжение на вспомогательном двигателе М3. Данные занести в таблицу 7.2 и таблицу 7.3.

Таблица 7.2 - Данные опыта холостого хода

№	Измерения			
	$U_0, B$	$I_0, A$	$P_{01}, Вт$	$P_{02}, Вт$
1				
...				
6				

Таблица 7.3 - Данные опыта холостого хода

№	Вычисления						
	$U_{\phi 0}, B$	$I_{\phi 0}, A$	$\cos \varphi_0$	$\varphi_0, \text{град}$	$P_{ЭЛ}, Вт$	$P_{МЭХ}, Вт$	$P_M, Вт$
1							
...							
6							

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить Инвертор;
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ, равное нулю (контролировать по амперметру РА6).
- тумблером SA25 отключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

### 7.3.2 Опыт короткого замыкания.

Ток статора не должен превысить  $1,5 \cdot I_N$  исследуемого двигателя.

Ротор исследуемого двигателя не вращается.

Продолжительность каждого отсчёта не должна превышать 10с.

Опыт требует хорошей организации и слаженной работы бригады студентов. На каждого наблюдателя возлагается наблюдение за одним - двумя приборами в момент отсчёта (времени включения).

1. Собрать схему, представленную на рисунке 8.1.

2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено». Все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении. Все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели

стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключки.

3. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

4. Тумблером SA2 включить пускатель КЗ и закоротить контактами пускателя дроссели L1, L2, L3.

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

6. Тумблером SA27 установить независимый режим управления инвертора.

7. Установить выключатель SA30 в положение «PW1», SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 - в положение «PV3».

8. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

9. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

Чтобы ротор двигателя М2 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину М3, работающую по двухконтурной системе стабилизации скорости. Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;
- установить выключатель SA25 ШИП2 в положение «Включено»;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения (0,5А) вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6);

- установить режим работы ШИП1: SA20 «Включить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим»;

- тумблером SA23 включить ШИП1;

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП установить значение частоты вращения ротора равное нулю (контролировать по прибору BR1);

- тумблером SA26 включить инвертор;

- подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора, нажав кнопку SB1;

- увеличивая регулятором RP5 «Задание напряжения» инвертора напряжение на статоре асинхронного двигателя до значения  $U=90\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4), снять 5÷6 точек. Измеренные данные занести в таблицу 7.4.

Завершив эксперимент, необходимо:

- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля контролировать по прибору PV4);

- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;

- тумблером SA26 отключить инвертор;

- тумблером SA23 выключить ШИП1;

- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3, равное нулю (контролировать по амперметру РА6);

- тумблером SA25 выключить ШИП2;

- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

Таблица 7.4 - Данные опыта короткого замыкания

№	Измерения					
	$U_K$ , В	$I_K$ , А	$P_K$ , Вт			
1						
2						
...						
Вычисления						
$U_{ФК}$ , В	$I_{ФК}$ , А	$\cos\varphi_K$	$\varphi_K$ , Град	$Z_K$ , Ом	$X_K$ , Ом	$r_K$ , Ом

### 7.3.3 Исследование рабочих характеристик.

1. Собрать схему, представленную на рисунке 7.1.

2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

3. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

4. Тумблером SA2 включить пускатель КЗ и закоротить контактами пускателя дроссели L1, L2, L3.

5. Для включения обмотки статора по схеме «треугольник», становить переключатель SA3 в положение «Включено».

6. Тумблером SA27 установить независимый режим управления инвертора.

7. Установить выключатель SA30 в положение «PW1», SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 - в положение «PV3».

8. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

9. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

10. Тумблером SA26 включить инвертор.

11. Подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора, нажав кнопку SB1.

12. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» плавно увеличить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U=220В$  (контролировать по вольтметру PV4).

Чтобы создать механическую нагрузку на валу исследуемого двигателя, нужно подключить к сети вспомогательную машину М3, которая будет работать в генераторном режиме.

Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;
- установить выключатель SA25 ШИП2 в положение «Включено»;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения (0,5А) вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6);
- установить режим работы ШИП1: SA20 «Отключить замкнутую СУ», SA21 «Задание тока», SA22 «Генераторный режим»;
- тумблером SA23 включить ШИП1;
- увеличивая ток в цепи якоря вспомогательной машины М3 с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1, снять показания приборов в 5÷6 точках и занести их в таблицу 7.4 и таблицу 7.5.

Таблица 7.4 - Рабочие характеристики

№	Измерения				
	$I_{дпт}, А$	$I_1, А$	$U_1, В$	$P_1, Вт$	$\omega, с^{-1}$
1					
...					
6					

Таблица 7.5 - Рабочие характеристики

№	Вычисления									
	$n, об/мин$	$I_{1\phi}, А$	$U_{1\phi}, В$	$s$	$\cos\varphi$	$M_{эм}, Н·м$	$\Delta M, Н·м$	$M_2, Н·м$	$P_2, Вт$	$\eta$
1										
...										
6										

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- уменьшить напряжение на выходе инвертора до нуля контролировать по прибору PV4);
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- тумблером SA26 выключить инвертор;

- с помощью регулятора РРЗ «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ, равное нулю (контролировать по амперметру РА6);

- тумблером SA25 выключить ШИП2;

- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

По опытным данным построить в одной системе координат рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $n$ ,  $s$ ,  $\cos\varphi$ ,  $M$ ,  $\eta=f(P_2)$ .

Электромагнитный момент двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$$M_{ЭМ} = I_{ДПТ} \cdot C_M \cdot \Phi, \text{ Нм}, \quad (7.7)$$

где коэффициент ДПТ:

$$C_M \cdot \Phi = \frac{9,55 \cdot U_{н.ДПТ}}{n_{н.ДПТ}}. \quad (7.8)$$

Полезный момент на валу двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

$$M_2 = M_{ЭМ} - \Delta M, \text{ Нм}, \quad (7.9)$$

где  $\Delta M$  - момент сопротивления, возникающий в двигателе постоянного тока от магнитных, механических и добавочных потерь.

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\omega}, \text{ Нм}, \quad (7.10)$$

$$\text{где} \quad \Delta P = P_M + P_{МХ} + P_D, \text{ Вт}. \quad (7.11)$$

Для определения этих потерь иногда пользуются экспериментальным методом.

Включают двигатель постоянного тока независимого возбуждения на холостом ходу в двигательный режим. При этом измеряют ток якоря  $I_{a0}$  в режиме холостого хода и подведенное напряжение  $U_0$  и определяют мощность холостого хода  $P_0$  в цепи якоря, которая представляет собой сумму магнитных и механических потерь:

$$P_0 = U_0 \cdot I_{a0} = P_{МХ} + P_M, \text{ Вт}. \quad (7.12)$$

Пользуясь этим методом, нужно помнить, что для получения правильных результатов необходимо подвести к двигателю такое напряжение  $U_0$ , чтобы ЭДС якоря в режиме холостого хода  $E_0$  была равна ЭДС якоря в режиме номинальной нагрузки двигателя  $E_{ном}$ .

Известно, что ЭДС якоря в двигательном режиме машины постоянного тока меньше подведенного напряжения на величину падений напряжений в обмотках, включенных последовательно в цепь якоря (обмотка якоря, обмотка добавочных полюсов и т. д.),  $I_a \cdot \sum r$  и падения напряжения в щетках  $\Delta U_{щ}$ . Учитывая это, можно записать следующие выражения ЭДС якоря.

Для режима холостого хода:

$$E_0 = U_0 - I_{a0} \cdot \sum r - \Delta U_{щ} \cdot \frac{I_{a0}}{I}, \text{ В.} \quad (7.13)$$

Для режима номинальной нагрузки

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{а.ном} \cdot \sum r - \Delta U_{щ}, \text{ В.} \quad (7.14)$$

Принимая во внимание условие равенства ЭДС якоря  $E_0 = E_{ном}$ , получим то значение напряжения холостого хода  $U_0$ , которое необходимо подвести к двигателю в опыте холостого хода:

$$U_0 = U_{ном} - \sum r \cdot (I_{а.ном} - I_{a0}) - \Delta U_{щ} \cdot \left(1 - \frac{I_{a0}}{I_{а.ном}}\right), \quad (7.15)$$

где  $\sum r$  - сумма сопротивлений обмоток в цепи якоря (Ом);

$\Delta U_{щ}$  - падение напряжения на щетках, обычно принимают  $\Delta U_{щ} = 2\text{В}$ ;

$I_{a0}$  и  $I_{а.ном}$  - токи в цепи якоря в режиме холостого хода и в режиме номинальной нагрузки.

Согласно ГОСТ, для двигателей постоянного тока без компенсационной обмотки значение добавочных потерь  $P_D$  принимают равным 1% от подводимой мощности:

$$P_D = 0,01 \cdot P_1, \text{ Вт.} \quad (7.16)$$

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

$$P_1 = U \cdot I_a, \text{ Вт.} \quad (7.17)$$

Полезная мощность асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$P_2 = \frac{M_2 \cdot n}{9.55}, \text{ Вт.} \quad (7.18)$$

КПД асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100, [\%]. \quad (7.19)$$

## 7.4 Анализ полученных результатов

При анализе результатов необходимо сравнить параметры и данные асинхронного двигателя, полученные из круговой диаграммы, с паспортными данными двигателя.

Анализируя рабочие характеристики, нужно объяснить вид полученных графиков. Например, график тока не выходит из начала координат, так как в режиме холостого хода двигатель потребляет из сети ток холостого хода, обусловленный потерями холостого хода.

Характеристика частоты вращения ротора имеет падающий вид, т.е. с ростом нагрузки частота вращения ротора уменьшается. Это объясняется ростом скольжения  $s$ . При этом, чем больше активное сопротивление обмотки ротора, тем больше наклон этой характеристики к оси абсцисс, так как увеличение сопротивления обмотки ротора вызывает рост электрических потерь в цепи ротора, а следовательно, рост скольжения, величина которого пропорциональна электрическим потерям в роторе.

Небольшое значение коэффициента мощности  $\cos\varphi$  в зоне малых нагрузок двигателя объясняется тем, что и в режиме холостого хода и при небольшой нагрузке двигателя ток статора меньше номинального и в значительной части является намагничивающим током, имеющим фазовый сдвиг относительно напряжения сети близкий к  $90^\circ$ .

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

## 7.5 Контрольные вопросы

7.5.1 Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

7.5.2 Принцип действия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

7.5.3 Что такое скольжение и каким оно обычно бывает у асинхронного двигателя общего применения?

7.5.4 С какой целью у асинхронного двигателя обычно делают шесть выводов обмотки статора?

7.5.5 Как определить начало и конец обмотки статора?

7.5.6 Что такое реверс и как его осуществить в трехфазном асинхронном двигателе?

7.5.7 Какие характеристики асинхронного двигателя называются рабочими?

7.5.8 Почему относительная величина тока холостого хода у асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора такой же мощности?

7.5.9 Как изменится электромагнитный момент асинхронного двигателя, если питающее напряжение уменьшить в 3 раза?

7.5.10 Что такое перегрузочная способность асинхронного двигателя и как ее определить по круговой диаграмме?

7.5.11 Почему без нагрузки асинхронный двигатель работает с малыми значениями КПД и коэффициента мощности?

7.5.12 Какие виды потерь имеют место в асинхронном двигателе?

7.5.13 Почему магнитные потери в сердечнике ротора не учитываются?

7.5.14 На какие виды потерь влияют величина воздушного зазора и толщина пластин сердечника статора?

7.5.15 Почему график  $I_1=f(P_2)$  не выходит из начала координат?

7.5.16 При каких условиях высшие гармоники поля создают в асинхронном двигателе двигательный, генераторный и тормозной режимы?

7.5.17 Какими причинами вызван «провал» в механической характеристике?

7.5.18 При каких условиях может происходить «прилипание» ротора к статору?

## **8 Лабораторная работа №5. Исследование трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором**

*Цель работы:* изучить конструкцию трехфазного АД с фазным ротором; освоить приемы снятия характеристик холостого хода, короткого замыкания и рабочих характеристик, а также методы пуска.

### **8.1 Общие сведения**

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию и менее надежны, но они обладают лучшими регулировочными и пусковыми свойствами, чем двигатели с короткозамкнутым ротором. На корпусе асинхронного двигателя прикреплена табличка, на которой указаны тип двигателя, завод-изготовитель, год выпуска и номинальные данные (полезная мощность, напряжение, ток, коэффициент мощности, частота вращения и КПД).

### **8.2 Задание на выполнение лабораторной работы**

8.2.1 Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.

8.2.2 Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

8.2.3 Снять характеристики холостого хода.

8.2.4 Снять характеристики короткого замыкания при заторможенном роторе.

8.2.5 Снять рабочие характеристики двигателя при номинальном напряжении при разных значениях ступеней пускового реостата.

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

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

### 8.3 Снятие характеристик

8.3.1 Опыт холостого хода. Данный опыт даёт возможность изучить свойства магнитной цепи, определить возникающие при холостом ходе потери и чисто механические свойства АД при питании от источника регулируемого напряжения номинальной частоты. АД потребляет мощность, которая расходуется в основном на покрытие потерь в стали и механических потерь.

Для получения характеристики холостого хода производят несколько измерений при  $n=const$ ,  $f=const$  и  $U_1=var$ . При проведении опытов следует всегда повышать напряжение сверх номинального, чтобы проследить за характером изменения потерь в стали и намагничивающей силы при увеличении магнитного потока.

Наиболее важной частью характеристики холостого хода является кривая насыщения, называемая также кривой намагничивания или кривой холостого хода. Она показывает зависимость между током намагничивания ( $I_0$ ) и Э.Д.С. ( $E_0$ ), при этом последняя почти всегда приравнивается к напряжению  $U_0$  на зажимах АД при холостом ходе, так как падением напряжения на внутреннем активном и индуктивном сопротивлениях за счёт малой величины тока холостого хода можно пренебречь.

При  $\cos \varphi$  холостого хода в пределах от 0,01 до 0,15 намагничивающий ток будет равен току холостого хода, при этом ошибка не превышает 1%.

Для полной оценки АД необходимо знание потерь холостого хода, то есть механических потерь ( $P_{мех}$ ) и потерь в стали ( $P_{ст}$ ) ненагруженного АД. Они определяются на холостом ходу мощностью ( $P_0$ ) за вычетом потерь в обмотке статора ( $P_{медь}$ ). Так как ( $P_{медь}$ ) очень малы, ввиду малости  $I_0$ , (незначительная доля по сравнению с  $P_{мех}$  и  $P_{ст}$ ) – ими пренебрегают, и потери холостого хода можно приравнять к ( $P_0$ ).

Питание асинхронного двигателя при опыте холостого хода (рисунок 8.1) осуществляется через Инвертор напряжения, позволяющий изменять напряжение и частоту в широких пределах. При этом вал двигателя должен быть свободным от механической нагрузки.

Опыт начинают с напряжения питания  $U = 1,15 \cdot U_{ном}$ , затем постепенно понижают напряжение до  $U = 0,4 \cdot U_{ном}$  так, чтобы один из замеров соответствовал номинальному напряжению  $U_{ном}$ . Измеряют линейные значения напряжений и токов, а затем (в зависимости от схемы соединения

обмотки статора) определяют фазные значения напряжения и тока холостого хода.

*Порядок работы с лабораторной установкой.*

Изучить принципиальную схему стенда.

Для исследования собрать схему, представленную на рисунке 8.1.

Опыт проводить в следующей последовательности:

1) Собрать схему АД с фазным ротором (машина М1), представленную на рисунке 8.1.

2) Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда - надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено». Все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении. Все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

3) Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

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

5) Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.

6) Установить выключатель SA30 в положение «PV1», SA31 в положение «PW2», SA32 в положение «PV3».

7) С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты Инвертора  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

8) С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

9) Кнопкой SB1 подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора.

10) Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1=220\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

11) Прогреть асинхронный двигатель в течение 5 минут.

12) При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение  $U_1=100\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4). Ротор двигателя в этом случае вращается с частотой, весьма близкой к синхронной. Чтобы достичь синхронной частоты вращения  $n_0$  и компенсировать механические потери  $P_{\text{Мех}}$ , нужно подключить к сети вспомогательную машину М3, которая работает в двигательном режиме. Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;
- тумблером SA25 включить ШИП2;

- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения (0,5А) вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6);

- установить режим работы ШИП1: SA20 «Отключить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Двигательный режим»;

- тумблером SA23 включить ШИП1;

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1, плавно увеличивая напряжение на выходе, разогнать исследуемый двигатель до синхронной частоты вращения. Для более точного определения синхронной частоты вращения можно воспользоваться ваттметрами PW1, PW2. При приближении к синхронной частоты вращения активная мощность уменьшается до нуля.

- при  $n=n_0$  снять показания приборов. Увеличивая напряжение на исследуемом двигателе М2 от 100 В до 250 В, снять 5-6 точек. Синхронную частоту вращения поддерживать постоянной (контролировать по прибору BR1), изменяя напряжение на вспомогательном двигателе М3. Данные занести в таблицу 8.1 и таблицу 8.2.

Таблица 8.1 - Данные опыта холостого хода

№	Измерения		
	$U_0, В$	$I_0, А$	$P_0, Вт$
1			
...			
6			

Таблица 8.2

№	Вычисления						
	$U_{\phi 0}, В$	$I_{\phi 0}, А$	$\cos \varphi_0$	$\varphi_0, град$	$P_{Эл}, Вт$	$P_{Мех}, Вт$	$P_M, Вт$
1							
...							
6							

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);

- тумблером SA23 выключить ШИП1;

- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);

- тумблером SA26 отключить инвертор;

- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;

- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3, равное нулю (контролировать по амперметру РА6);

- тумблером SA25 отключить ШИП2;

- выключить автоматический выключатель «Сеть».

По результатам измерений и вычислений построить характеристики холостого хода  $I_0, P_0, \cos\varphi_0=f(U_1)$ , на которых необходимо отметить значения величин  $I_{0ном}, P_{0ном}, (P_M + P_{мех})_{ном}$  и  $\cos\varphi_{ном}$ , соответствующих номинальному напряжению  $U_{1ном}$ .

Если график  $(P_M + P_{мех}) = f(U_1)$  продолжить до пересечения с осью ординат ( $U_1 = 0$ ), то получим величину потерь  $P_{мех}$ .

Это разделение магнитных и механических потерь основано на том, что при неизменной частоте сети  $f_1$  частота вращения двигателя в режиме х.х  $n_0$ , а следовательно, и механические потери  $P_{мех}$  неизменны. В то же время магнитный поток  $\Phi$  прямо пропорционален ЭДС статора  $E_1$ .

Для режима холостого хода  $U_1 = E_1$ , поэтому при  $U_1 = 0$  и магнитный поток  $\Phi = 0$ , а следовательно, и магнитные потери  $P_M = 0$ .

Определив величину механических потерь  $P_{мех}$ , можно вычислить магнитные потери  $P_M$  (Вт):

$$P_M = P_0 - P_{мех}. \quad (8.1)$$

8.3.2 Опыт короткого замыкания. Опыт короткого замыкания проводится по такой же схеме, как и в опыте холостого хода (рисунок 2.1), но при этом измерительные приборы должны быть выбраны в соответствии с пределами измерения тока, напряжения и мощности. Ротор двигателя следует жестко закрепить. Предельное значение тока статора при опыте короткого замыкания устанавливают, исходя из допустимой токовой нагрузки питающей сети и возможности провести опыт в минимальный срок, чтобы не вызвать опасного перегрева двигателя. Для двигателей мощностью до 1 кВт возможно проведение опыта, начиная с номинального напряжения  $U_K = U_{ном}$ . В этом случае предельный ток  $I_K = (5 \div 7)I_{ном}$ . При выполнении опыта короткого замыкания желательно соединение обмотки статора звездой.

Определив диапазон изменения тока статора при опыте короткого замыкания, опыт начинают с предельного значения этого тока, установив соответствующее напряжение короткого замыкания  $U_K$ . Затем постепенно снижают это напряжение до значения, при котором ток  $U_K$  достигнет нижнего предела установленного диапазона его значений. При этом снимают показания приборов для  $5 \div 7$  точек, одна из которых должна соответствовать номинальному току статора ( $I_K = I_{ном}$ ).

Продолжительность опыта должна быть минимально возможной. После снятия последних показаний приборов двигатель следует отключить и сразу же произвести замер активного сопротивления фазы обмотки статора  $r_1'$ , чтобы определить температуру обмотки. В зависимости от схемы соединения обмотки статора, линейные напряжения и токи пересчитывают на фазные  $U_K$  и  $I_K$  по формулам, аналогичным (6.1) и (6.2).

Активную мощность короткого замыкания  $P_K$  измеряют ваттметром. По полученным значениям напряжений  $U_K$ , токов  $I_K$  и мощностей  $P_K$  вычисляют

коэффициент мощности при коротком замыкании, полное сопротивление короткого замыкания (Ом), активные и индуктивные составляющие этого сопротивления (Ом).

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

На характеристиках короткого замыкания отмечают значения величин  $P_{Kном}$  и  $U_{Kном}$ , соответствующих току короткого замыкания  $I_K = I_{ном}$ .

Опыт, проведённый при пониженном напряжении, относительно номинального, требует введения поправки на насыщение (ГОСТ 7217-79). Эта поправка состоит в том, что выше наибольшего значения, при опыте короткого замыкания, ток предполагается возрастающим по касательной к кривой, изображающей его зависимость от напряжения.

Для определения  $U_{кн}$  нужно построить график по данным таблицы 8.2.

Таблица 8.2 - Обязательный отсчёт напряжения при опыте короткого замыкания

Номинальное фазное напряжение $U_{1ном}$ , В	127	220	380	500	3000	6000
Фазное напряжение короткого замыкания $U_{к.ном}$ , В	33	58	100	130	800	1600

Ток и мощность короткого замыкания пересчитывают на номинальное напряжение  $U_{1ном}$  по формулам:

$$I_n = I_{1ном} \cdot \left( \frac{U_{1ном}}{U_{к.ном}} \right); \quad (8.2)$$

$$P'_k = P_{к.ном} \cdot \left( \frac{U_{1ном}}{U_{к.ном}} \right)^2. \quad (8.3)$$

Следует иметь в виду, что такой пересчет является приближенным, так как при  $U_K = U_{1ном}$  наступает магнитное насыщение сердечников (особенно зубцовых слоев) статора и ротора; это приводит к уменьшению индуктивного сопротивления  $X_k$ , что не учитывается формулами (8.2) и (8.3).

Электромагнитная мощность в режиме короткого замыкания, передаваемая на ротор двигателя, равна электрическим потерям в обмотке ротора  $P_{э2к}$ , поэтому электромагнитный момент при опыте короткого замыкания (Нм) определяется по формуле:

$$M_{\Pi} = \frac{30 \cdot P_{э2к}}{\pi \cdot n} = \frac{30 \cdot (P_{к.ном} - P_{э1к} - P_{МК})}{\pi \cdot n}, \quad (8.4)$$

где электрические потери в обмотке статора при опыте короткого замыкания:

$$P_{э1к} = 3 \cdot r_K \cdot I_{к.ном}^2. \quad (8.5)$$

Магнитные потери при опыте к. з.  $P_{mk}$  приближенно определяют по характеристикам холостого хода при напряжении  $U_1=U_k$ .

В режиме холостого хода магнитный поток  $\Phi$  больше, чем в режиме короткого замыкания, но если в режиме холостого хода магнитные потери происходят только в сердечнике статора, то в режиме короткого замыкания ( $s=1$ ) магнитные потери происходят еще и в сердечнике ротора, так как  $f_2=f_1$ .

Характеристика короткого замыкания воспроизводит начальные пусковые условия АД и потому позволяет определить начальный пусковой ток и начальный пусковой момент.

*Порядок работы с лабораторной установкой.*

Ток статора не должен превысить  $1,5 \cdot I_n$  исследуемого двигателя.

Ротор исследуемого двигателя не вращается.

Продолжительность каждого отсчёта не должна превышать 10 с.

Опыт требует хорошей организации и слаженной работы бригады студентов. На каждого наблюдателя возлагается наблюдение за одним - двумя приборами в момент отсчёта (времени включения).

1. Собрать схему, представленную на рисунке 8.1.

2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда, – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено». Все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении. Все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

3. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

4. Тумблером SA3 включить обмотки статора по схеме «звезда».

5. Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.

6. Установить выключатель SA30 в положение «PW1», SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 – в положение «PV3».

7. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

8. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

9. Чтобы ротор двигателя M1 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину M3, работающую по двухконтурной системе стабилизации скорости. Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «ПВ»;

- установить выключатель SA25 ШИП2 в положение «Включено»;

- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения (0,5 А) вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6);
- установить режим работы ШИП1: SA20 «Включить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим»;
- тумблером SA23 включить ШИП1;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 установить значение частоты вращения ротора равное нулю (контролировать по прибору BR1);
- тумблером SA26 включить Инвертор;
- подключить исследуемый двигатель к выходу Инвертора, нажав кнопку SB1.
- увеличивая регулятором RP5 «Задание напряжения» Инвертора напряжение на статоре асинхронного двигателя до значения  $U=90V$  (контролировать по вольтметру PV4), снять 5÷6 точек. Измеренные данные занести в таблицу 8.3.

Таблица 8.3 - Данные опыта короткого замыкания

№	Измерения		
	$U_k, B$	$I_k, A$	$P_k, Вт$
1			
...			
6			

Вычисления						
$U_{\Phi k}, B$	$I_{\Phi k}, A$	$\cos \varphi_k$	$\varphi_k$ град	$Z_k, Ом$	$X_k, Ом$	$r_k, Ом$

Завершив эксперимент, необходимо:

- уменьшить напряжение на выходе инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- тумблером SA26 отключить инвертор;
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3, равное нулю (контролировать по амперметру РА6);
- тумблером SA25 выключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «СЕТЬ».

8.3.3 Исследование рабочих характеристик. Под рабочей характеристикой АД понимают зависимость ряда величин:  $P_1, I_1, S, \cos \varphi, КПД$  от полезной мощности  $P_2$ , при условии неизменного приложенного напряжения и его частоты.

Снятие рабочей характеристики следует производить при нагретых до рабочей температуры обмоток статора и ротора.

При пуске двигателя с фазным ротором в цепь ротора включается добавочное активное сопротивление — пусковой реостат. Пусковой реостат обычно имеет несколько ступеней и рассчитывается на кратковременное протекание тока.

При включении активного сопротивления в цепь ротора уменьшается начальный пусковой ток  $I_n$  и увеличивается начальный пусковой момент  $M_n$

Порядок работы с лабораторной установкой.

1. Собрать схему, представленную на рисунке 8.1.
2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда, – надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено», все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

3. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

4. Тумблером SA3 включить обмотки статора по схеме «треугольник».

5. Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.

6. Установить выключатель SA30 в положение «PW1», SA31 в положение «PW2», выключатель SA32 - в положение «PV3».

7. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

8. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

9. Кнопкой SB1 подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора.

10. Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1=110\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4). Чтобы создать механическую нагрузку на валу исследуемого двигателя, нужно подключить к сети вспомогательную машину М3, которая работает в генераторном режиме.

Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «ПВ»;

- тумблером SA25 включить ШИП2;

- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6).

- установить режим работы ШИП1: SA20 «Отключить замкнутую СВ», SA21 «Задание тока», SA22 «Генераторный режим».

- тумблером SA23 включить ШИП1;

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1, плавно увеличивая ток в цепи якоря, снять 5-6 точек для каждой ступени пускового сопротивления  $R_{ст}$  ( $R1-R9$  по схеме стенда) при номинальном напряжении  $U_{1н}$ . Синхронную частоту вращения поддерживать постоянной (контролировать по прибору BR1), изменяя напряжение на вспомогательном двигателе М3. Данные занести в таблицу 8.4.

Таблица 8.4 - Рабочие характеристики

№	Измерения					Вычисления									
	$I_{Дтр}$ А	$I_1$ А	$U_1$ В	$P_1$ Вт	$\omega$ рад/с	$n$ об/мин	$I_{1\phi}$ А	$U_{1\phi}$ В	$S$	$\cos\phi$	$M_{ЭМ}$ Н·м	$\Delta M$ Н·м	$M_2$ Н·м	$P_2$ Вт	$\eta$
1															

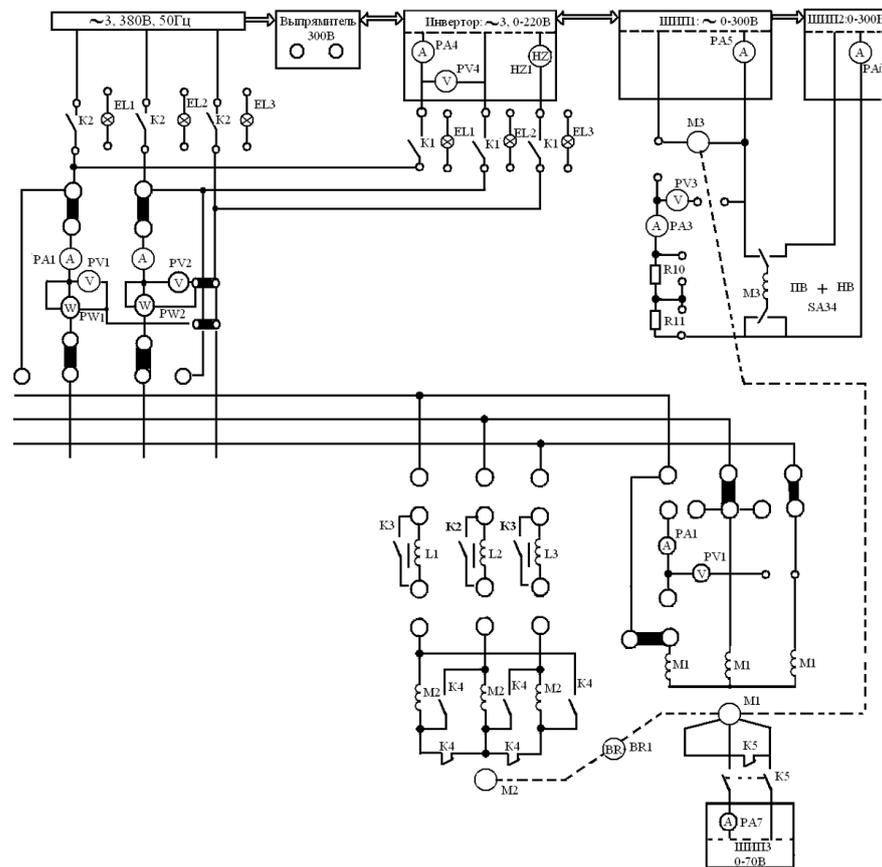


Рисунок 8.1 - Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;

- уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить инвертор;
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ, равное нулю (контролировать по амперметру РА6);
- тумблером SA25 отключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

По опытным данным построить в одной системе координат рабочие характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $n$ ,  $s$ ,  $\cos\varphi$ ,  $M$ ,  $\eta=f(P_2)$ .

## 8.4 Контрольные вопросы

- 8.4.1 Устройство трехфазного АД с фазным ротором.
- 8.4.2 Принцип действия АД с фазным ротором.
- 8.4.3 В чем особенность устройства АД с фазным ротором?
- 8.4.4 Каков порядок действий при пуске АД с фазным ротором?
- 8.4.5 Как провести опыт холостого хода АД с фазным ротором?
- 8.4.6 Как провести опыт короткого замыкания АД с фазным ротором?
- 8.4.7 Как провести опыт, чтобы снять рабочие характеристики АД с фазным ротором?
- 8.4.8 Что такое перегрузочная способность АД с фазным ротором?
- 8.4.9 Почему с увеличением нагрузки на валу АД с фазным ротором возрастает потребляемая из сети мощность?
- 8.4.10 Как определить величину механических и магнитных потерь АД с фазным ротором по характеристикам холостого хода?

## 9 Лабораторная работа №6. Исследование способов пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

*Цель работы:* изучить способы пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Изучить пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Приобрести практические навыки в сборке схем и снятии характеристик.

### 9.1 Основные теоретические сведения

При рассмотрении возможных способов пуска необходимо учитывать следующие основные положения:

- 1) Асинхронный двигатель должен развивать при пуске достаточно большой пусковой момент, который должен быть больше статического момента сопротивления на валу, чтобы ротор двигателя мог прийти во вращение и достичь номинальной частоты вращения.

2) Величина пускового тока должна быть ограничена таким значением, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети.

3) Схема пуска должна быть, по возможности, простой, а количество и стоимость пусковых устройств - малыми.

Помимо этого, пусковые свойства двигателей оцениваются еще и такими показателями, как продолжительность и плавность пуска, сложность пусковой операции, ее экономичность (стоимость и надежность пусковой аппаратуры и потерь энергии в ней).

Различают следующие способы пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

- а) прямой пуск;
- б) пуск переключением обмотки статора со звезды на треугольник;
- в) реакторный пуск;
- г) автотрансформаторный пуск;
- д) пуск при изменении частоты питающей сети  $f_1$ .

## 9.2 Задание на выполнение лабораторной работы

9.2.1 Записать паспортные данные электрических машин и измерительных приборов.

9.2.2 Ознакомиться со схемой и порядком включения стенда.

9.2.3 Ознакомиться с конструкцией двигателя с короткозамкнутым ротором, реакторов и переключающих устройств.

9.2.4 Выполнить пуск двигателя прямым включением при соединении обмотки статора в треугольник. Снять данные.

9.2.5 Выполнить пуск двигателя с переключением обмотки статора со звезды на треугольник.

9.2.6 Выполнить реакторный пуск двигателя. Снять данные.

9.2.7 Выполнить пуск двигателя при номинальной частоте, изменяя напряжение питания. Снять данные.

9.2.8 Выполнить частотный пуск двигателя с постоянным моментом, используя закон управления 
$$\frac{U_{I(1)}}{f_{I(1)}} = \frac{U_{I(2)}}{f_{I(2)}} = const.$$

Снять данные.

9.2.9 Сделать обработку полученных данных. Построить механические характеристики двигателя с короткозамкнутым ротором для всех способов пуска.

Провести анализ результатов лабораторной работы и составить подробный отчет.

Сделать заключение о проделанной работе.

### 9.3 Порядок выполнения работы

9.3.1 Прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора треугольником. Наиболее простым способом пуска двигателя с короткозамкнутым ротором является включение обмотки его статора непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки статора. Такой пуск называется прямым. При этом пусковой ток двигателя  $I_{II} = (5 \div 7) \cdot I_{НОМ}$ .

*Порядок работы с лабораторной установкой.*

Из-за наличия фильтров индикации показания приборов носят приближенный характер и не позволяют сопоставить значения токов при различных пусках. Поэтому измерение пусковых токов осуществляется при заторможенном роторе асинхронного двигателя.

Пусковой ток двигателя М2 намного больше номинального тока, поэтому снимать показания приборов следует по возможности быстро, не допуская чрезмерного перегрева двигателя.

Изучить принципиальную схему стенда.

Опыт проводить в следующей последовательности:

1) Для исследования пусковых свойств асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (машина М2) собрать схему, представленную на рисунке 9.1.

2) Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда - надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено». Все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении. Все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

3) Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

4) Тумблером SA2 включить пускатель К3 и закоротить контактами пускателя дроссели L1, L2, L3.

5) Тумблером SA3 включить обмотки статора по схеме «треугольник».

6) Установить выключатель SA30 в положение «PV1», SA31 - в положение «PW2», SA31 в положение «PV3».

7) Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.

8) С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты Инвертора  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

9) С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

10) Кнопкой SB1 подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора.

11) Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1=220B$  (контролировать по вольтметру PV4).

12) Прогреть асинхронный двигатель в течение 5 минут.

13) При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение  $U_1=0B$  (контролировать по вольтметру PV4).

14) Чтобы ротор двигателя M2 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину M3, которая работает в генераторном режиме.

Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;
- тумблером SA25 включить ШИП2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины M3 (контролировать по амперметру PA6) (0,4-0,5 А);
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 установить значение частоты вращения ротора, равное нулю (контролировать по прибору BR1);
- установить режим работы ШИП1: SA20 «Включить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим»;
- тумблером SA23 включить ШИП1;
- при помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1=220B$  (контролировать по вольтметру PV4);
- измерить ток в якорной цепи нагрузочного двигателя M3 (PA5), пусковой ток (PA1) и напряжение исследуемого двигателя (PV1), данные занести в таблицу 9.1 и таблицу 9.2 (включить на короткий промежуток).

Таблица 9.1 - Измерения прямого пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора треугольником

№	Измерения		
	$I_{дпт}, A$	$I_{п}, A$	$U_{п}, B$
1			
...			
6			

Таблица 9.2 - Вычисления по опыту прямого пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора треугольником

№	Вычисления					
	$U_{\Phi\Gamma}, B$	$I_{\Phi\Gamma}, A$	$I_{\Phi ПСР}, A$	$I_{\Phi ПСР}/I_{\Phi, НОМ}$	$M_{\Gamma}, H/м$	$M_{\Gamma\Gamma}/M_{НОМ}$
1						
...						
6						

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить инвертор;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ, равное нулю (контролировать по амперметру РА6);
- тумблером SA25 отключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

Измеряют линейные значения напряжений и токов, а затем (в зависимости от схемы соединения обмотки статора) определяют фазные значения напряжения и тока.

Электромагнитный момент ДПТ:

$$M = I_{\text{ДПТ}} \cdot C_M \cdot \Phi, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (9.1)$$

Коэффициент ДПТ:

$$C_M \cdot \Phi = \frac{9,55 \cdot U_{\text{НОМ.ДПТ}}}{n_{\text{НОМ.ДПТ}}}. \quad (9.2)$$

Номинальный момент:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{9,55 \cdot P_2}{n_{\text{НОМ}}}, \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (9.3)$$

По результатам измерений рассчитать кратности пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

9.3.2 Прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора звездой. Для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, работающего при соединении обмоток статора треугольником, можно применить пуск переключением обмотки статора со звезды на треугольник. В момент подключения двигателя

к сети переключатель ставят в положение «звезда», при котором обмотка статора оказывается соединенной в звезду. При этом фазное напряжение на статоре снижается в  $\sqrt{3}$  раз.

После того как ротор двигателя разгонится до частоты вращения, близкой к установившейся, переключатель быстро переводят в положение «треугольник» и фазные обмотки двигателя оказываются под номинальным напряжением. Возникший при этом бросок тока является незначительным.

*Порядок работы с лабораторной установкой.*

Для исследования пусковых характеристик асинхронного двигателя (машина М2) при соединении обмотки статора звездой во время пуска собрать схему, представленную на рисунке 9.3.

9.3.3 Опыт проводить в следующей последовательности:

1. Собрать схему, представленную на рисунке 9.3.
2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда - надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено». Все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении, все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.
3. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.
4. Тумблером SA2 включить пускатель КЗ и замкнуть контактами пускателя дроссели L1, L2, L3.
5. Тумблером SA3 включить обмотки статора по схеме «звезда».
6. Установить выключатель SA30 в положение «PV1», SA31 - в положение «PW2», SA32 - в положение «PV3».
7. Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.
8. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты Инвертора  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).
9. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).
10. Кнопкой SB1 подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора.
11. Тумблером SA26 включить Инвертор. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1=220\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).
12. Прогреть асинхронный двигатель в течение 5 минут.
13. При помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение  $U_1=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

Чтобы ротор двигателя М2 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину М3, которая работает в генераторном режиме. Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;
- тумблером SA25 включить ШИП2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6) (0,4-0,5 А);
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 установить значение частоты вращения ротора, равное нулю (контролировать по прибору BR1);
- установить режим работы ШИП1: SA20 «Включить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим»;
- тумблером SA23 включить ШИП1;
- при помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1=220В$  (контролировать по вольтметру PV4);
- измерить ток в якорной цепи нагрузочного двигателя М3 (РА5), пусковой ток (РА1) и напряжение исследуемого двигателя (PV1). Данные занести в таблицу 9.3.

Таблица 9.3 - Данные прямого пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при соединении обмотки статора звездой.

№	Измерения		
	$I_{дпт}$ А	$I_{п}$ А	$U_{п}$ В

Вычисления					
$U_{фпв}$	$I_{фп}$ А	$I_{фпср}$ А	$I_{фпср}/I_{ф.ном}$	$M_{п}$ Н/м	$M_{п}/M_{ном}$

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить инвертор;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3, равное нулю (контролировать по амперметру РА6);
- тумблером SA25 отключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

По результатам измерений рассчитать кратности пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

9.3.4 Реакторный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Более универсальным является способ пуска понижением подводимого к асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором напряжения посредством реакторов (реактивных катушек - дросселей).

Реакторный пуск осуществляется следующим образом. Сначала двигатель получает питание через трехфазный реактор (реактивную или индуктивную катушку), сопротивление которого ограничивает величину пускового тока. При этом ток из сети поступает в обмотку статора через реакторы, на которых происходит падение напряжения за счет индуктивного сопротивления реактора. В результате на обмотку статора подается пониженное напряжение. По достижении нормальной частоты вращения включается выключатель, который шунтирует реактор, в результате чего на двигатель подается нормальное напряжение сети.

*Порядок работы с лабораторной установкой.*

Реакторы рассчитаны на кратковременное включение. Поэтому пуск двигателя следует проводить не более 10 секунд. Повторный пуск следует проводить не раньше, чем через 30 секунд.

Количество пусков - не более пяти. Повтор серии измерений - через 5 минут.

9.3.5 Опыт проводить в следующей последовательности.

Для исследования пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (машина М2) собрать схему, представленную на рисунке 9.1.

Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда - надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено». Все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении. Все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта перемычки.

1. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

2. Тумблером SA3 включить обмотки статора по схеме «треугольник».

3. Установить выключатель SA30 в положение «PV1», SA31 - в положение «PW2», SA32 - в положение «PV3».

4. Тумблером SA27 установить независимый режим управления инвертора.

5. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты Инвертора  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

6. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0B$  (контролировать по вольтметру PV4).

7. Кнопкой SB1 подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора.

8. Тумблером SA26 включить инвертор.

Чтобы ротор двигателя M2 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину M3, которая работает в генераторном режиме. Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;
- тумблером SA25 включить ШИП2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины M3 (контролировать по амперметру PA6);
- установить режим работы ШИП1: SA20 «Включить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим».
- тумблером SA23 включить ШИП1;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 установить значение частоты вращения ротора, равное нулю (контролировать по прибору BR1);
- при помощи регулятора RP5 «Задание напряжения» установить напряжение на статоре асинхронного двигателя до номинального значения  $U_1=220B$  (контролировать по вольтметру PV4);
- измерить ток в якорной цепи нагрузочного двигателя M3, пусковой ток и напряжение исследуемого двигателя. Данные занести в таблицу 9.3;
- опыт повторить 5 раз;
- данные занести в таблицу 9.4.

Таблица 9.4 - Данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при реакторном пуске

№	Измерения		
	$I_{ДПТ}$ А	$I_{П}$ А	$U_{П}$ В

Вычисления					
$U_{ФП}$ В	$I_{ФП}$ А	$I_{ФПСР}$ А	$I_{ФПСР}/I_{Ф.НОМ}$	$M_{П}$ Н/м	$M_{П}/M_{НОМ}$

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить Инвертор;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);

- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3, равное нулю (контролировать по амперметру РА6).

- тумблером SA25 отключить ШИП2;

- выключить автоматический выключатель «Сеть».

### 9.3.6 Пуск асинхронного двигателя при изменении напряжения

*Порядок работы с лабораторной установкой.*

1. Собрать схему, представленную на рисунке 9.1.

2. Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда - надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено». Все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении. Все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.

3. Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.

4. Тумблером SA2 включить пускатель К3 и закоротить контактами пускателя дроссели L1, L2, L3.

5. Тумблером SA3 включить обмотки статора по схеме «треугольник».

6. Установить выключатель SA30 в положение «PV1», SA31 в положение «PW2», SA31 в положение «PV3».

7. Тумблером SA27 установить независимый режим управления Инвертора.

8. С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты Инвертора  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по прибору HZ1).

9. С помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» установить значение напряжения  $U=0\text{В}$  (контролировать по вольтметру PV4).

10. Кнопкой SB1 подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора.

11. Тумблером SA26 включить Инвертор.

Чтобы ротор двигателя М2 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину М3, которая работает в генераторном режиме. Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;

- тумблером SA25 включить ШИП2;

- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6);

- установить режим работы ШИП1: SA20 «Включить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим»;

- тумблером SA23 включить ШИП1;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 установить значение частоты вращения ротора, равное нулю (контролировать по прибору BR1);
- при помощи регулятора RP5 «Задание напряжения», плавно изменяя напряжение на статоре двигателя до номинального значения  $U_1=220V$  (контролировать по вольтметру PV4), измерить ток в якорной цепи нагрузочного двигателя МЗ, пусковой ток и напряжение исследуемого двигателя для 5-6 точек, данные занести в таблицу 9.5.

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP5 «Задание напряжения» уменьшить напряжение на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору PV4);
- тумблером SA26 отключить Инвертор;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины МЗ, равное нулю (контролировать по амперметру PA6);
- тумблером SA25 отключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

По результатам измерений рассчитать кратности пускового тока и пускового момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Таблица 9.5 - Данные пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при изменении напряжения

№	Измерения		
	$I_{ДПТ}$ А	$I_{П}$ А	$U_{П}$ В

Вычисления					
$U_{ФП}$ В	$I_{ФП}$ А	$I_{ФПСП}$ А	$I_{ФПСП}/I_{Ф.НОМ}$	$M_{П}$ Н/м	$M_{П}/M_{НОМ}$

9.3.7 Частотный пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Этот способ позволяет плавно изменять угловую частоту вращения ротора в наиболее широком диапазоне и, следовательно, позволяет уменьшить пусковые токи. Для его осуществления требуется, чтобы асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором получал питание от отдельного источника. В качестве такого источника могут быть использованы электромеханические или статические преобразователи частоты. В связи с развитием полупроводниковой техники в настоящее время

наиболее предпочтительными являются полупроводниковые статические преобразователи.

При частотном пуске одновременно с изменением частоты  $f_1$  приходится по определенному закону изменять и подводимое к обмотке статора напряжение  $U_1$ . Это обусловлено определенными требованиями, предъявляемыми к механическим характеристикам асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Для осуществления пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с постоянным моментом необходимо подводимое к обмотке статора напряжение изменять пропорционально его частоте:

$$\frac{U_{1(1)}}{U_{1(2)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} = const . \quad (9.4)$$

При частотном пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором его энергетические характеристики остаются практически неизменными. Поэтому этот способ пуска является экономичным. Недостатками частотного пуска являются громоздкость и высокая стоимость источника питания.

*Порядок работы с лабораторной установкой.*

Опыт проводить в следующей последовательности:

- 1) Собрать схему, представленную на рисунке 9.1.
- 2) Подключить стенд к трехфазной сети (включить три автоматических выключателя, расположенных в левой нижней части стенда - надпись «Сеть»). Перед включением стенда необходимо убедиться, что все тумблеры, управляющие включением преобразователей (SA23, SA24, SA25, SA26), находятся в положении «выключено». Все регуляторы заданий выходных величин преобразователей (RP1, RP2, RP3, RP4, RP5) находятся в крайнем левом положении. Все дополнительные переключатели (SA2, SA3, SA4, SA6, SA7) находятся в выключенном положении, а также на панели стенда присутствуют только необходимые для проведения данного опыта переключатели.
- 3) Тумблером SA1 подключить к сети схему управления.
- 4) Тумблером SA3 включить обмотки статора по схеме «треугольник».
- 5) Установить выключатель SA30 в положение «PVI», SA31 - в положение «PW2», SA31 - в положение «PV3».
- 6) Тумблером SA27 установить режим управления Инвертора « $U/f=const$ ».
- 7) С помощью регулятора RP4 «Задание частоты» установить значение частоты Инвертора  $f=0Гц$  (контролировать по прибору HZ1).
- 8) Кнопкой SB1 подключить исследуемый двигатель к выходу инвертора.
- 9) Тумблером SA26 включить Инвертор.

Чтобы ротор двигателя М2 не вращался, нужно подключить к сети вспомогательную машину М3, которая работает в генераторном режиме. Для этого необходимо:

- тумблер SA34 перевести в положение «НВ»;
- тумблером SA25 включить ШИП2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить номинальное значение тока возбуждения вспомогательной машины М3 (контролировать по амперметру РА6);
- установить режим работы ШИП1: SA20 «Включить замкнутую СУ», SA21 «Задание скорости», SA22 «Генераторный режим»;
- тумблером SA23 включить ШИП1;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 установить значение частоты вращения ротора, равное нулю (контролировать по прибору BR1).
- при помощи регулятора RP4 «Задание частоты», плавно увеличивая частоту на статоре двигателя до номинального значения  $f=50\text{Гц}$  (контролировать по вольтметру HZ1), измерить ток в якорной цепи нагрузочного двигателя М3, пусковой ток и напряжение исследуемого двигателя для 5-6 точек. Данные занести в таблицу 9.5.

Таблица 9.5 - Данные пуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при постоянном моменте

№	Измерения			
	$I_{дпт}, \text{А}$	$I_{п}, \text{А}$	$U_{п}, \text{В}$	$f, \text{Гц}$

Вычисления					
$U_{фп} \text{ В}$	$I_{фп} \text{ А}$	$I_{фпср} \text{ А}$	$I_{фпср}/I_{ф.ном}$	$M_{п} \text{ Н/М}$	$M_{п}/M_{ном}$

Завершив эксперимент, необходимо:

- с помощью регулятора RP4 «Задание частоты» уменьшить частоту на выходе Инвертора до нуля (контролировать по прибору HZ1);
- тумблером SA26 отключить инвертор;
- с помощью регулятора RP1 «Задание» ШИП1 уменьшить напряжение до нуля (контролировать по прибору PV3);
- тумблером SA23 выключить ШИП1;
- отключить исследуемый двигатель, нажав кнопку SB2;
- с помощью регулятора RP3 «Задание тока» ШИП2 установить значение тока возбуждения вспомогательной машины М3, равное нулю (контролировать по амперметру РА6);
- тумблером SA25 отключить ШИП2;
- выключить автоматический выключатель «Сеть».

### *Анализ полученных результатов.*

Анализируя результаты лабораторной работы, необходимо дать сравнительную оценку пусковым свойствам асинхронного двигателя при различных способах пуска, рассмотренных в данной лабораторной работе. При этом следует иметь в виду основные пусковые параметры двигателя - начальные пусковой ток и пусковой момент, полученные в результате экспериментов. При сравнении удобно воспользоваться отношениями  $\frac{I_{п}}{I_{п0}}$  и

$\frac{M_{п}}{M_{п0}}$ , где  $I_{п0}$  и  $M_{п0}$  - начальные значения пускового тока и пускового момента при пуске двигателя непосредственным включением в сеть.

При выводах о достоинствах и недостатках способов пуска необходимо учитывать еще и такие показатели, как сложность пусковой операции и ее экономичность, имея в виду стоимость дополнительных устройств.

## **9.4 Контрольные вопросы**

9.4.1 Какими показателями характеризуются пусковые свойства асинхронных двигателей?

9.4.2 Каковы достоинства и недостатки пусковых свойств асинхронных двигателей?

9.4.3 Как лучше, с точки зрения улучшения пусковых свойств, уменьшить пусковой ток: снижением подводимого к двигателю напряжения или увеличением активного сопротивления в цепи обмотки ротора?

9.4.4 Каковы достоинства и недостатки пуска асинхронных двигателей непосредственным включением в сеть?

9.4.5 Какие существуют способы пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении?

9.4.8 Перечислите способы регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя и дайте им сравнительную оценку.

9.4.9 Почему при частотном пуске одновременно с частотой тока необходимо изменять напряжение?

9.4.10 Какие показатели определяют пусковые свойства асинхронных двигателей?

9.4.11 На чем основаны методы уменьшения пускового тока асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором? Перечислите эти методы?

9.4.12 Каков общий недостаток методов пуска асинхронных двигателей при пониженном напряжении?

9.4.13 На сколько уменьшается пусковой ток асинхронного двигателя при его пуске методом переключения обмотки статора со звезды на треугольник? Как при этом изменяется пусковой момент?

9.4.14 Какова зависимость пускового момента асинхронного двигателя от напряжения, подводимого к обмотке статора?

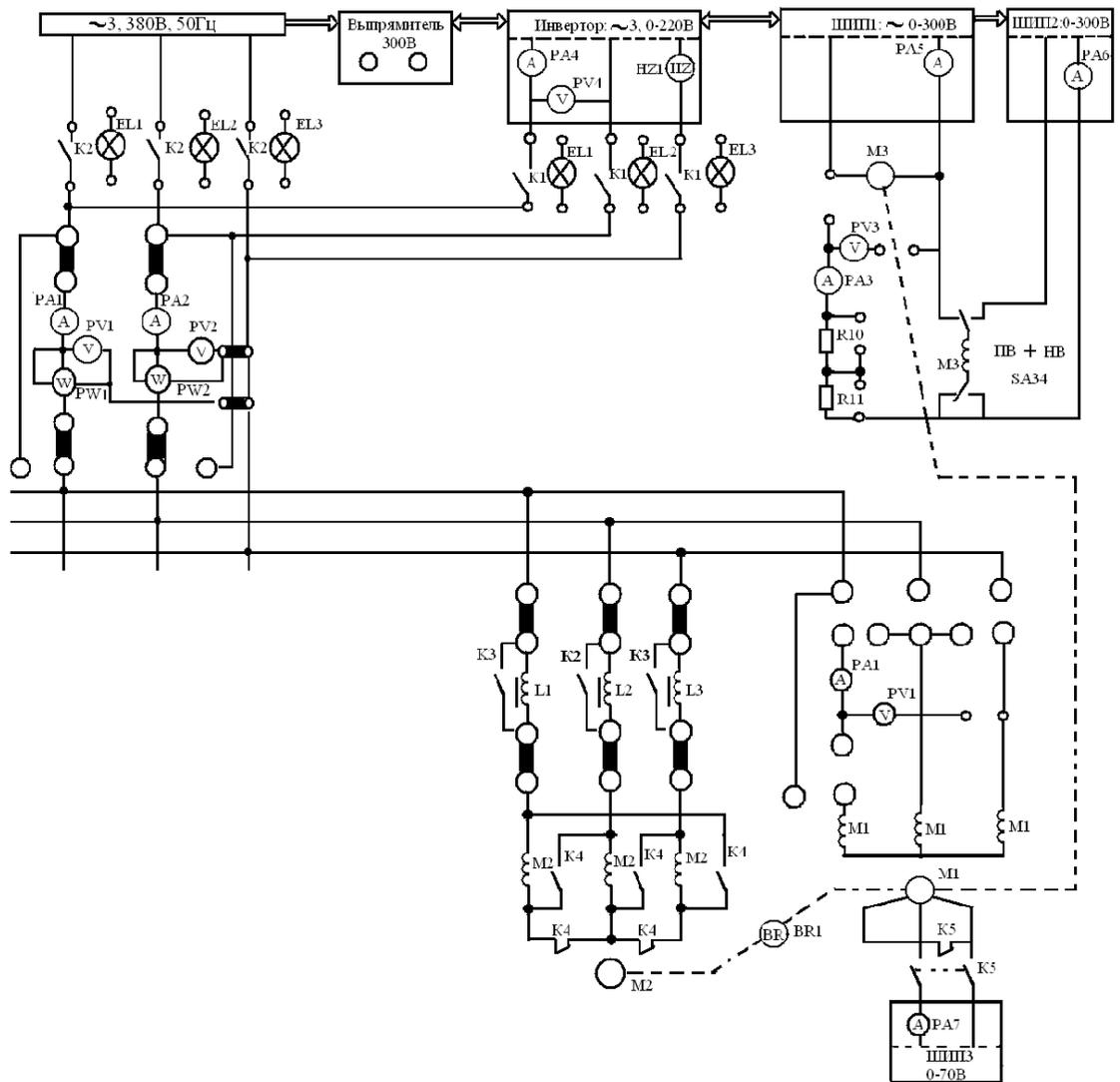


Рисунок 9.1- Исследование способов пуска трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

## Список литературы

### Основная

- 1 Копылов И.П. Электрические машины. - М.: Высшая школа. – Логос, 2000. - 607 с.
- 2 Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В двух томах. 3-е издание. - М.: Издательский дом МЭИ. 2006. - 652 (656) с.
- 3 Кацман М.М. Электрические машины. 5-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Издательский центр «Академия», 2003.- 496 с.
- 4 Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. - М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.

### Дополнительная

- 5 Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. - ч. 1,2. - М.: Высшая школа, 1987.
- 6 Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. - ч.2 Машины переменного тока. - Л.: Энергия, 1973. - 412 с.
- 7 Пиотровский Л.М., Васютинский С.Б., Несговоров Е.Д. Испытания электрических машин. - ч.1.- М., Л.: Госэнергоиздат, 1960.-181с.
- 8 Кацман М.М. Руководство к лабораторным работам по электрическим машинам и электроприводу. - М.: Высшая школа, 1983. - 215 с.

Пулат Исмаилович Сагитов  
Раушан Манаповна Шидерова  
Юрий Владимирович Кузьмин

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

1,2 часть

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов  
специальности 5В071800

Редактор Л.Т. Сластихина  
Спец. по стандартизации Г.И. Мухаметсариева

Подписано в печать 29.03.2019  
Тираж 70 экз.  
Объем 4,7 уч.-изд.л.

Формат 60x84 1/16  
Бумага типографская №1  
Заказ \_\_\_\_\_ Цена \_\_\_\_\_

Копировально – множительное бюро  
Некоммерческое акционерное общество  
«Алматинский университет энергетики и связи»  
050013, Алматы, ул Байтурсынова 126