



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Рубцовский индустриальный институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
(РИИ АлтГТУ)

В.Т. ГЕТМАНОВ, О.П. БАЛАШОВ, И.А. МАЦАНКЕ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

**Методические указания к лабораторным работам
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
бакалавров всех форм обучения**

Рубцовск 2015

УДК 621.31

Гетманов В.Т., Балашов О.П., Мацанке И.А. Электротехника: Методические указания к лабораторным работам для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2015. – 57 с.

Изложены цели, методика и порядок выполнения работ лабораторных работ. Методические указания содержат описания десяти лабораторных работ, тематически охватывающие основные разделы электротехники. Описание к лабораторной работе № 9 подготовил к.т.н. доцент Емельяненко А. В.

Рассмотрены и одобрены
на заседании кафедры
электроэнергетики РИИ.
Протокол № 13 от 28.12.2015

Рецензент: доц. каф. ВМФиХ,
к.п.н., доцент

В.И. Бахмат

©Рубцовский индустриальный институт, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. «Исследование разветвленной линейной цепи постоянного тока с одним источником электрической энергии».....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. «Исследование неразветвленной электрической цепи синусоидального тока».....	9
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. «Исследование разветвленной электрической цепи синусоидального тока».....	11
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. «Исследование трехфазных цепей при соединении нагрузки в звезду».....	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. «Исследование трехфазных цепей при соединении нагрузки треугольником».....	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6. «Исследование нелинейной цепи постоянного тока».....	23
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7. «Исследование однофазного трансформатора».....	30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 «Испытание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором».....	39
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9. «Исследование полупроводниковых выпрямителей».....	45
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10. «Исследование работы системы электроснабжения».....	54

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания представляют собой сборник заданий к лабораторным работам по электротехнике направлений подготовки бакалавриата.

Основной целью проведения лабораторных работ по электротехнике является расширение, углубление и закрепление знаний, полученных на теоретических и практических занятиях, приобретение практического опыта по сборке электрических схем, умение пользоваться электроизмерительными приборами с последующей оценкой измерений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Цель работы: экспериментальное исследование распределения токов и напряжений в разветвленной линейной цепи с одним источником электрической энергии и ознакомление с методами ее анализа.

1. Некоторые теоретические положения

Для анализа линейных электрических цепей любой конфигурации используют законы Кирхгофа и закон Ома. Первый закон Кирхгофа основан на принципе непрерывности движения электрических зарядов и формулируется так: алгебраическая сумма токов в узле равна нулю, т.е.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0, \quad (1)$$

где n – число ветвей, сходящихся к узлу.

До написания уравнения задаются условными положительными направлениями токов в ветвях и обозначают их стрелками на схеме замещения. В уравнении (1) токи, направленные к узлу, записываются со знаком плюс, направленные от узла, – со знаком минус, и наоборот. К примеру, для узла А (рисунок 1) уравнение по первому закону Кирхгофа будет иметь вид: $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 = 0$.

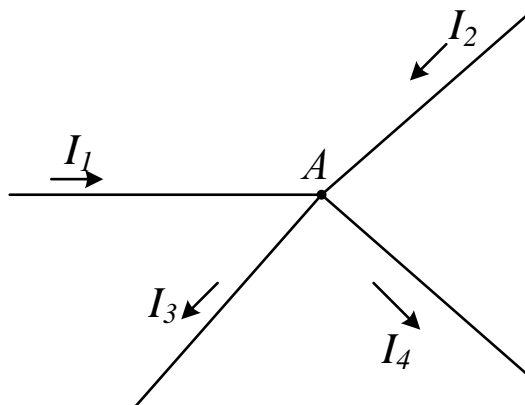


Рисунок 1. К составлению уравнения по первому закону Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа устанавливает связь между падениями напряжения и ЭДС в замкнутом контуре электрической цепи. Он гласит: алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре разветвленной электрической цепи равна алгебраической сумме падений напряжений на всех элементах, входящих в этот контур, т.е.

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k \cdot I_k, \quad (2)$$

где n – число ЭДС в контуре, m - число резисторов с сопротивлением R_k в контуре. При составлении уравнения (2) предварительно задают условные положительные направления токов во всех ветвях электрической цепи и выбирают направление обхода контура. Если при обходе контура направление ЭДС совпадает с направлением обхода контура, то такую ЭДС берут со знаком плюс; если не совпадает – со знаком минус. Падения напряжения $R_k \cdot I_k$ берут со знаком плюс, если положительное направление тока в данном элементе цепи совпадает с направлением обхода контура, и со знаком минус – если такого совпадения нет.

Для контура (рисунок 2) уравнение по второму закону Кирхгофа запишется:

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 + I_3 R_3 - I_2 R_2.$$

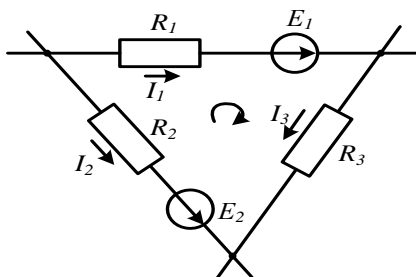


Рисунок 2. Схема замещения контура электрической цепи

При анализе электрических цепей с одним источником питания чаще всего известны значения ЭДС источника и сопротивления резисторов. В этом случае сначала преобразовывают всю пассивную часть схемы до одного эквивалентного резистора R_3 , а затем по закону Ома определяют ток через источник ЭДС. При необходимости с помощью законов Кирхгофа определяют токи и напряжения на других участках цепи. К примеру, определить токи и напряжения в схеме замещения цепи (рисунок 3,а), если известны значения ЭДС E и R_1, R_2, R_3 . Сначала преобразовывают параллельное соединение резисторов R_2, R_3 до одного R_{ab} (рисунок 3,б), а затем последовательно соединенные резисторы R_{ab} и R_1 до эквивалентного R_3 (рисунок 3,в), значения которых определяют по формулам:

$$R_{ab} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3},$$

$$R_3 = R_1 + R_{ab}.$$

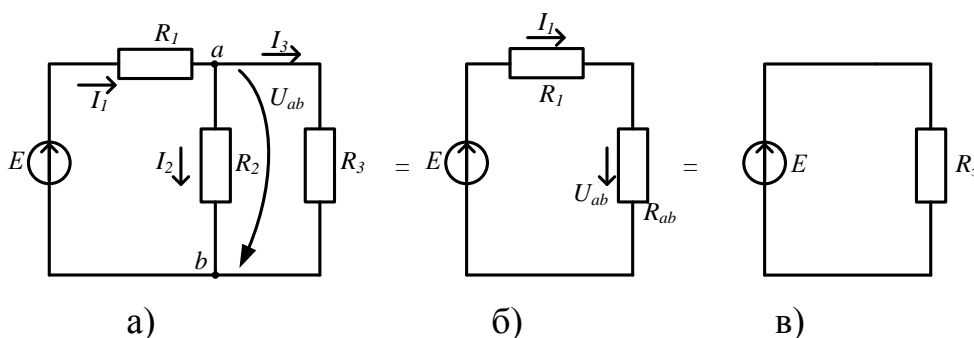


Рисунок 3. К эквивалентному преобразованию схемы замещения

По закону Ома определяется ток I_1 :

$$I_1 = \frac{E}{R_3}.$$

Напряжение на параллельных резисторах определяется законом Ома, т.е. $U_{ab} = I_1 \cdot R_{ab}$, а токи через них:

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3}.$$

Напряжение на резисторе R_1 определится как $U_1 = I_1 \cdot R_1$.

Или можно сразу после определения тока I_1 по второму закону Кирхгофа найти напряжение U_{ab} :

$$E = U_1 + U_{ab}, \quad U_{ab} = E - U_1.$$

а затем, как это сделано выше, токи в параллельных резисторах.

2. Схема электрической цепи

В лабораторной работе предусматривается измерение токов и напряжений цепи с одним источником электрической энергии. Экспериментальная часть работы выполняется по схеме (рисунок 4):

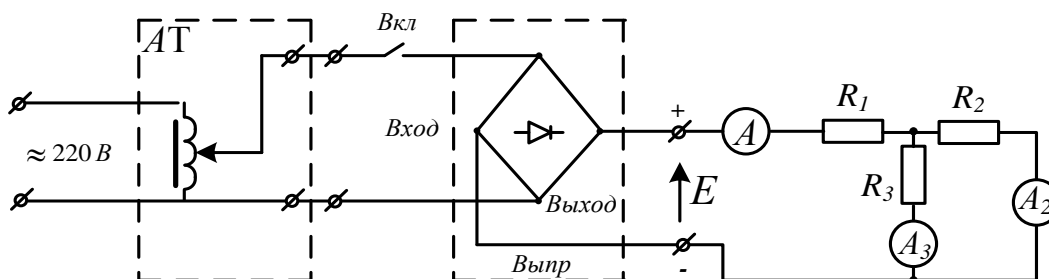


Рисунок 4. Схема измерения электрических величин

В качестве источника электрической энергии постоянного тока E используется регулятор напряжения АТ и выпрямитель (Выпр), расположенные на вертикальной стойке лабораторного стенда. С помощью регулятора АТ можно изменять значения ЭДС E источника. Измерительные приборы магнитоэлектрической системы A_1, A_2, A_3 также находятся на вертикальной стойке стенда. Напряжения на всех участках цепи измеряются поочередно одним вольтметром.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать схему (рисунок 4) и измерить токи во всех ветвях и напряжения на резисторах при значении ЭДС E , заданном преподавателем. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

E	I_1	I_2	I_3	U_1	U_2	U_3	Примечания
В	А	А	А	В	В	В	
							Измеренные величины
							Расчетные величины

3.2. С помощью первого и второго законов Кирхгофа убедиться в правильности снятых показаний в п.1.

3.3. Начертить схему замещения электрической цепи (рисунок 4) и, задавшись значениями E , R_1 , R_2 , R_3 , участвовавшими в опыте п.1, рассчитать все токи и напряжения и сравнить их с опытными. Результаты расчета поместить в таблицу 1. Значения сопротивлений резисторов измеряются омметром.

4. Контрольные вопросы

4.1. Сформулировать определения и порядок составления уравнений по первому и второму законам Кирхгофа.

4.2. Дать определение линейного элемента и линейной электрической цепи постоянного тока.

4.3. Что такое независимый контур электрической цепи?

4.4. Охарактеризовать последовательное соединение резисторов.

4.5. Охарактеризовать параллельное соединение резисторов.

4.6. Охарактеризовать смешанное соединение резисторов.

4.7. Объяснить правило параллельных ветвей.

4.8. Изложить способы преобразования электрических цепей.

Список литературы

1. Кононенко В.В. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов. – Изд.3-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 784с. 50 экз.
2. Касаткин А.С. Электротехника. - М.: Высш.шк., 2002. - 542с. 5 экз.
3. Гетманов В.Т. Электротехника: Курс лекций (часть I): Учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей всех форм обучения. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2011. – 135 с. (150 экз.).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: исследование линейной электрической цепи синусоидального тока при последовательном соединении элементов и освоение способов расчета таких цепей.

1. Схема электрической цепи

В работе используется схема, приведенная на рисунке 1.

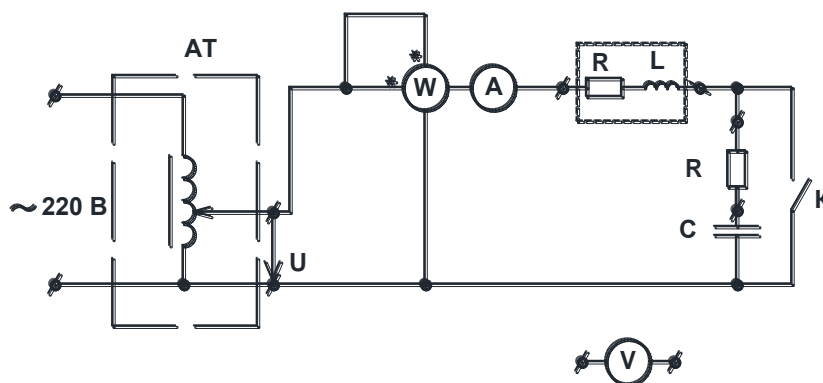


Рисунок 1. Схема для проведения экспериментов

Для регулирования напряжения на входе цепи используется автотрансформатор АТ, расположенный на вертикальной стойке стенда. Ток в цепи измеряется с помощью амперметра типа Э8030 с пределом измерения 3А. Активная мощность, потребляемая цепью, измеряется ваттметром Д50044. Резистивный элемент $R=15$ Ом и конденсатор $C=30$ мкФ находятся на вертикальной стойке лабораторного стенда. Для измерения напряжения на входе и элементах цепи используется вольтметр Э8032 с пределом измерения 150 В.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему (рисунок 1) и измерить параметры R_k и X_k индуктивной катушки при включенном ключе К (элементы R и C закорочены) и напряжении на входе цепи около 60 В. Данные опыта поместить в таблицу 1.

Таблица 1

Данные опыта			Данные расчета			Примечание
U	I	P	R_k	X_k	L_k	
В	А	Вт	Ом	Ом	Гн	Ключ К замкнут
60						

2.2. Рассчитать параметры R_K , X_K , L_K катушки индуктивности по формулам

$$Z_K = \frac{U}{I}, R_K = \frac{P}{I^2}, X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, L_K = \frac{X_K}{\omega}.$$

Результаты расчета занести в таблицу 1.

2.3. Исследовать режим работы цепи (рисунок 1) при разомкнутом ключе К и установленном на ее входе напряжении около 70 В. Результаты эксперименты занести в таблицу 2.

Таблица 2

U	I	P	U _K	U _C	U _R	Примечание
В	А	Вт	В	В	В	
70						Опытные данные
70						Результаты расчета

2.4. Задавшись значениями приложенного напряжения U и параметрами цепи R, C, R_K, X_K, которые участвовали в опыте (пункт 2.3), рассчитать ток I, активную мощность P, напряжения U_K, U_C, U_R и угол сдвига фаз φ в схеме (см. рисунок 1).

2.5. По данным опытов и результатам расчета построить в масштабе топографическую векторную диаграмму напряжений цепи (см. рисунок 1).

2.6. Найти из векторной диаграммы угол φ и сравнить его с расчетным значением.

3. Контрольные вопросы

3.1. От каких величин зависит значение угла сдвига фаз между током и приложенным напряжением?

3.2. Что называют индуктивным и емкостным сопротивлениями и от чего они зависят?

3.3. Как влияет изменение частоты синусоидального тока на величину реактивного сопротивления электрической цепи?

3.4. От каких величин зависит полное сопротивление последовательной R, L, C цепи?

3.5. Как рассчитать действующее значение тока в неразветвленной R, L, C цепи?

3.6. По каким формулам рассчитывают активную, реактивную и полную мощность в линейной электрической цепи синусоидального тока?

3.7. Каким способом можно измерить величины индуктивности и емкости реактивных приемников?

3.8. Как по известным параметрам R, L, C определить напряжения на отдельных элементах последовательной R, L, C цепи?

3.9. Что означает соотношение φ > 0?

3.10. Что означает соотношение $\varphi < 0$?

Список литературы

1. Кононенко В.В. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов. – Изд.3-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 784с. 50 экз.
2. Касаткин А.С. Электротехника. - М.: Высш.шк., 2002. - 542с. 5 экз.
3. Гетманов В.Т. Электротехника: Курс лекций (часть I): Учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей всех форм обучения. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2011. – 135 с. (150 экз.).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: исследование линейной электрической цепи синусоидального тока при параллельном соединении элементов и освоение способов расчета таких цепей.

1. Схема электрической цепи

В работе используется схема, приведенная на рисунке 1.

Для регулирования входного напряжения применяется автотрансформатор АТ, расположенный на вертикальной стойке стенда. Измерение этого напряжения осуществляется вольтметром типа Э8032 с пределом измерения 150 В. Токи в ветвях цепи измеряются амперметром типа Э8030. В неразветвленной части цепи с пределом измерения 3А, в параллельных ветвях – 1 А. Мощность измеряется ваттметром Д50044. Значение емкости конденсатора устанавливается с помощью магазина емкостей, который находится на вертикальной стойке лабораторного стенда.

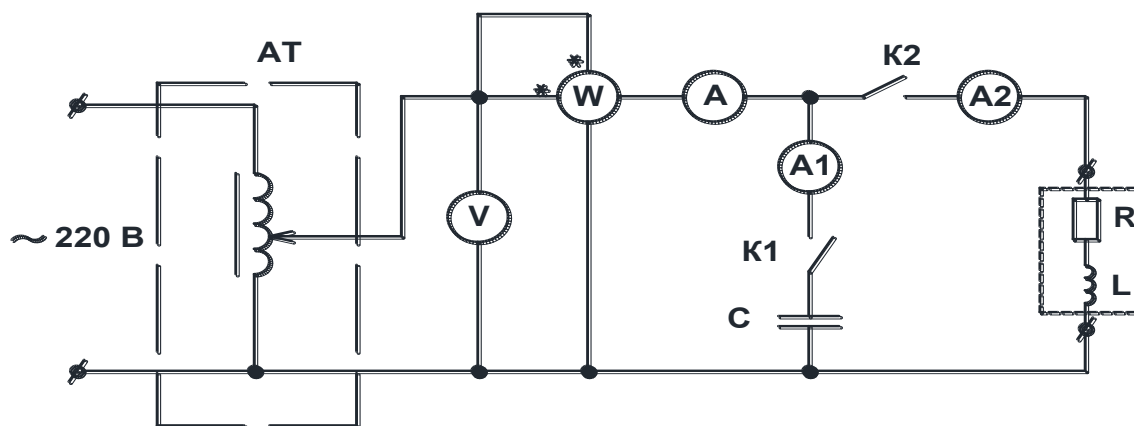


Рисунок 1. Схема для проведения практической части лабораторной работы

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему (рисунок 1) и измерить параметры индуктивной катушки R_k и L_k (ключ K_2 замкнут, а ключ K_1 разомкнут). Напряжение на входе цепи - 50 В. Показания приборов занести в таблицу 1.

Таблица 1

Данные опыта			Данные расчета				Примечание
U, В	I, А	P, Вт	Z _к , Ом	R _к , Ом	X _к , Ом	L _к , Гн	
50							Ключ K ₁ разомкнут Ключ K ₂ замкнут
50							

2.2. Рассчитать параметры R_k , X_k , L_k индуктивной катушки

$$Z_k = \frac{U}{I}, R_k = \frac{P}{I^2}, X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}, L_k = \frac{X_k}{\omega}.$$

Результаты расчета занести в таблицу 1.

2.3. Исследовать режим работы цепи (см. рисунок 1) при замкнутом состоянии ключей K_1 и K_2 для одного из значений емкости конденсатора C , заданного преподавателем, при напряжении на входе цепи $U=50$ В. Результаты эксперимента поместить в таблицу 2.

Таблица 2

U	I	I ₁	I ₂	P	Примечание
В	А	А	А	Вт	
50					Результат измерений
					Результаты расчета

2.4. Задавшись значениями приложенного напряжения U и параметров цепи R_k , X_k , C , которые участвовали в опыте (пункт 2.3), рассчитать комплексным методом токи I , I_1 , I_2 , а также мощность P . Результаты расчета занести в таблицу 2 и сравнить с опытными.

2.5. По данным опыта п. 2.3 построить в масштабе векторную диаграмму цепи и определить из неё угол сдвига фаз φ между приложенным напряжением U и током I в неразветвленной части цепи и сравнить со значением его, полученным в п. 2.4.

2.6. По данным опыта п. 2.3 рассчитать токи в параллельных ветвях по формулам $I_1 = \frac{U}{X_c} = U \cdot \omega \cdot c$; $I_2 = \frac{U}{Z_k}$ и угол сдвига тока $I_2(\varphi_2)$ по отношению к напряжению U по формуле $\varphi_2 = \arctg \frac{x_k}{R_k}$. Построить в масштабе векторную диаграмму цепи (см. рисунок 1), на которой ток I_1 в неразветвленной части схемы строится как геометрическая сумма токов параллельных ветвей.

Примечание. По указанию преподавателя студенты выполняют п. 2.5 либо п. 2.6.

3. Контрольные вопросы

- 3.1. Понятие проводимости в цепи переменного тока.
- 3.2. Как рассчитать ток I в неразветвленной части цепи (см. рисунок 1) через проводимости параллельных ветвей?
- 3.3. Как, используя результаты измерений п. 2.3, показать, что соблюдается первый закон Кирхгофа?
- 3.4. Изобразите треугольник проводимостей.
- 3.5. Как определяется эквивалентная активная проводимость при параллельном соединении элементов?
- 3.6. Как определяется эквивалентная реактивная проводимость при параллельном соединении элементов?

Список литературы

1. Кононенко В.В. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов. – Изд.3-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 784с. 50 экз.
2. Касаткин А.С. Электротехника. - М.: Высш.шк., 2002. - 542с. 5 экз.
3. Гетманов В.Т. Электротехника: Курс лекций (часть I): Учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей всех форм обучения. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2011. – 135 с. (150 экз.).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ В ЗВЕЗДУ

Цель работы: исследование трехфазной цепи при соединении нагрузки в звезду с нейтральным проводом и без него при симметричной и несимметричной нагрузках и построение по опытным данным векторных диаграмм напряжений и токов.

1. Некоторые теоретические положения

На рисунке 1 изображена трехфазная цепь при соединении нагрузки в звезду с нейтральным проводом.

На схеме обозначено:

E_A, E_B, E_C – фазные ЭДС генератора,

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – линейные напряжения генератора,

U_A, U_B, U_C – фазные напряжения нагрузки,

I_A, I_B, I_C – линейные токи.

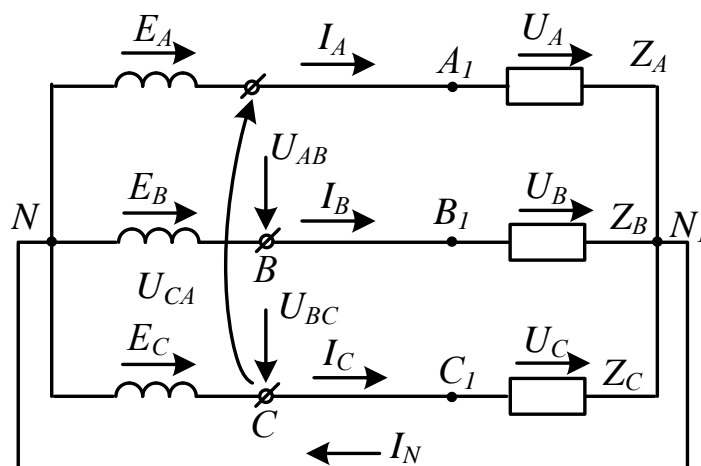


Рисунок 1. Трехфазная цепь при соединении нагрузки в звезду

При соединении звездой линейный ток равен фазному $I_{л}=I_{\phi}$, а линейные напряжения определяются вторым законом Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A. \end{aligned} \tag{1}$$

При симметричной нагрузке, когда $Z_A = Z_B = Z_C$, и симметричной системе ЭДС генератора E_A, E_B, E_C система фазных напряжений U_A, U_B, U_C образует симметричную систему, причем, как следует из векторной диаграммы (рисунок 2),

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}. \tag{2}$$

Ток в нейтральном проводе определяется первым законом Кирхгофа:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \tag{3}$$

В симметричном режиме он равен нулю, так как система линейных токов симметрична. Векторная диаграмма для симметричного режима приведена на рисунке.

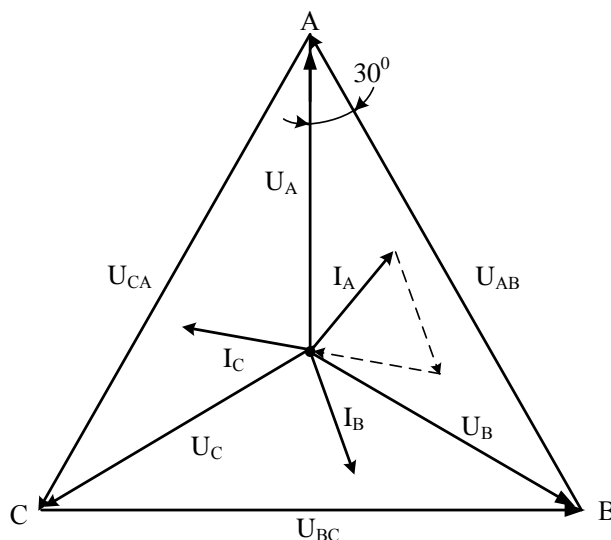


Рисунок 2. Векторная диаграмма в симметричном режиме

Если же равномерность нагрузки фаз нарушится (несимметричный режим), то в нейтральном проводе появится ток I_N (рисунок 3), хотя из-за наличия нейтрального провода напряжения на фазах приемника останутся неизменными и равными фазным ЭДС генератора.

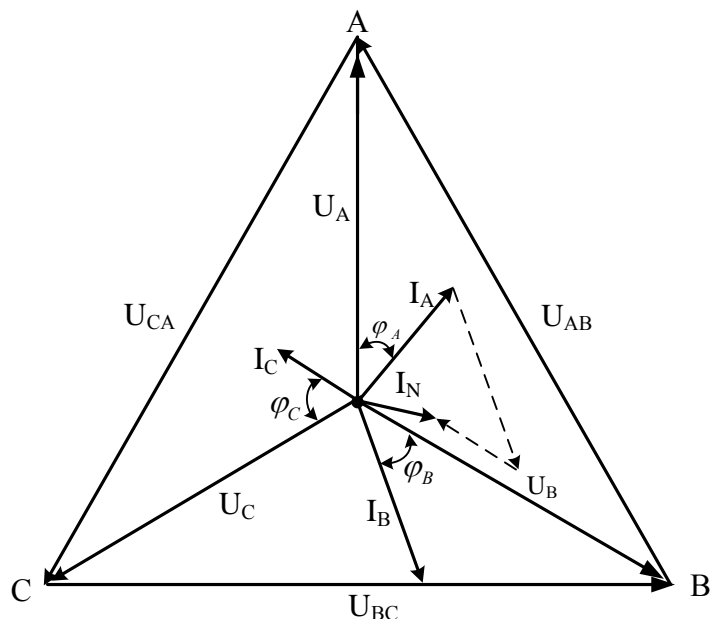


Рисунок 3. Векторная диаграмма при несимметричном режиме

Если же произойдет обрыв нейтрального провода, то фазные напряжения на нагрузке станут различными и могут значительно отличаться от номинального значения (что в большинстве практических случаев недопустимо), так как фазные токи стремятся установиться такими, чтобы их сумма была равна нулю: $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$. В связи с этим на практике особо следят за целостностью нейтрального провода.

Как указывалось, выше, при симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе отсутствует и поэтому необходимость в нем отпадает. В этом случае получается трехпроводная (рисунок 4) трехфазная цепь, соединенная звездой. Однако, при несимметричной нагрузке нарушится соотношение (2) и между нейтральными точками генератора и нагрузки появится напряжение смещения нейтрали U_N , которое определяется по методу узловых напряжений как

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (4)$$

где $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ - комплексы полных проводимостей отдельных фаз. Токи в фазах нагрузки:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= (\underline{E}_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_A; \\ \underline{I}_B &= (\underline{E}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_B; \\ \underline{I}_C &= (\underline{E}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_C. \end{aligned} \quad (5)$$

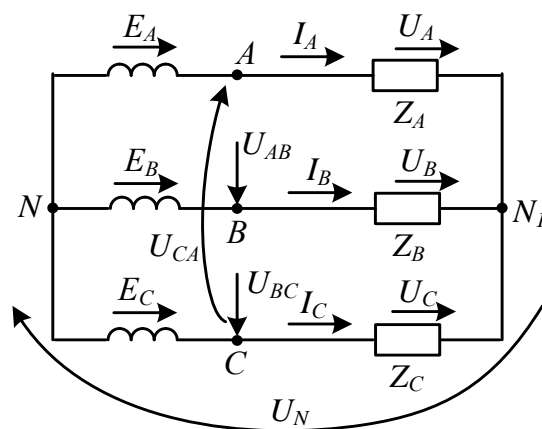


Рисунок 4. Трехпроводная цепь трехфазного тока

О некоторых несимметричных режимах в схеме (см. рисунок 4). Для простоты будем считать нагрузку в фазах активной. При уменьшении сопротивления, допустим, в фазе В, ток в ней возрастает, а напряжение уменьшится, напряжение на двух других фазах нагрузки возрастает. Этому случаю соответствует векторная диаграмма (рисунок 5).

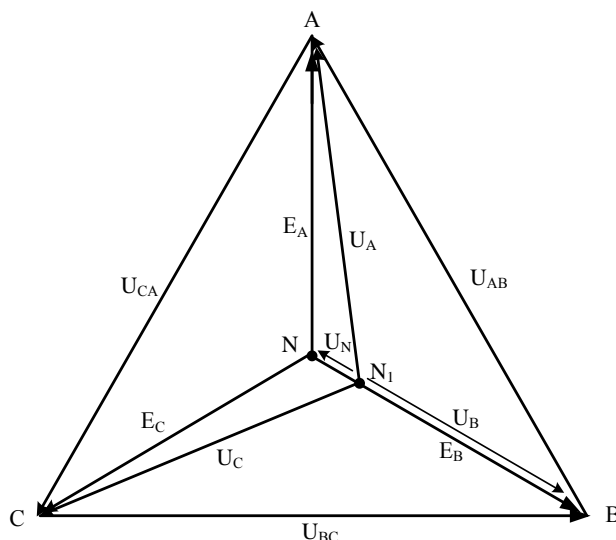


Рисунок 5. Векторная диаграмма напряжений при уменьшении нагрузки в фазе В

При уменьшении сопротивления в фазе В до нуля (замыкание фазы накоротко) напряжение на этой фазе станет равным нулю (рисунок 6), а напряжения на двух других фазах будут равны линейному.

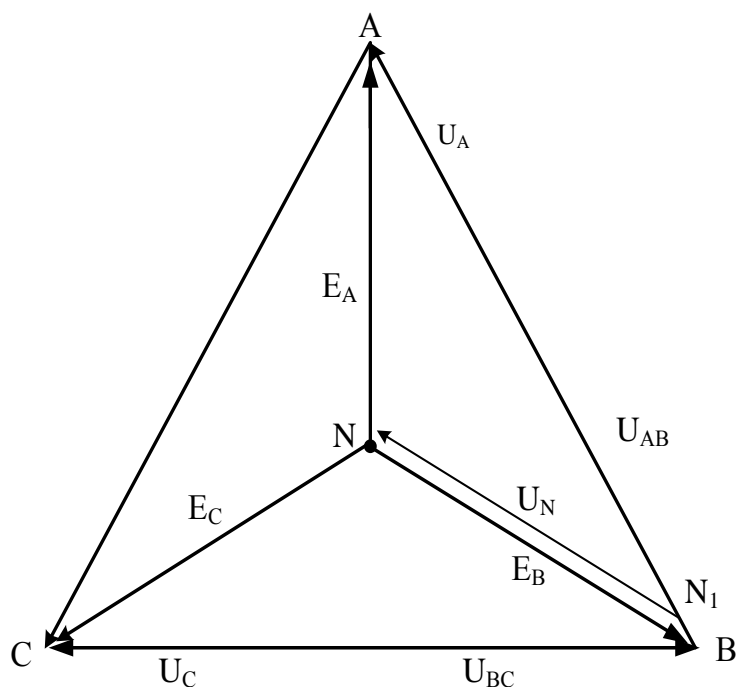


Рисунок 6. Векторная диаграмма напряжений при замыкании в фазе В

При увеличении сопротивления в этой фазе напряжение на ней будет расти (рисунок 7,а), а на двух других уменьшаться. При бесконечно большом сопротивлении нагрузки в фазе В (обрыв фазы) напряжения на фазах А и С будут равны половине линейного (рисунок 7,б).

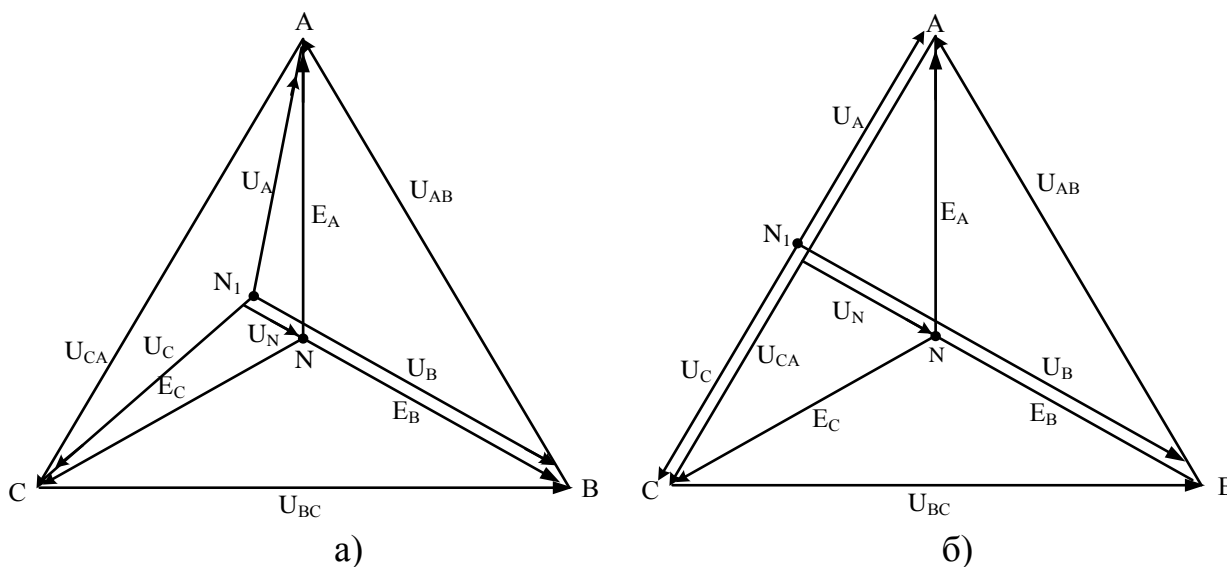


Рисунок 7. Векторная диаграмма напряжений:
а – при увеличении сопротивления в фазе В; б – при обрыве фазы В

2. Схема электрической цепи

В работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рисунке 8. Питание цепи осуществляется от сети трехфазного тока, система линейных напряжений (220 В) которой практически симметрична. В качестве трехфазной нагрузки используется ламповый реостат, в одной из фаз которого,

в отличие от других, включены 2 лампы, одна из которых отличается по мощности от остальных. Это позволяет с помощью ключей К изменить нагрузку в этой фазе.

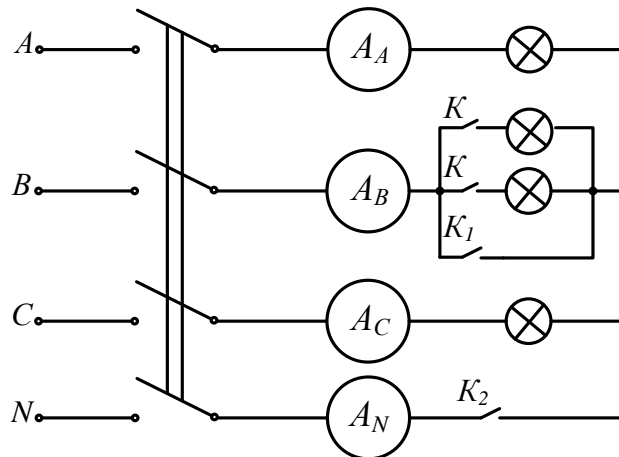


Рисунок 8. Схема испытаний цепи трехфазного тока при соединении нагрузки в звезду

Ключом K_1 производится замыкание фазы накоротко. Ключ K_2 позволяет исследовать цепь с нейтральным проводом и без него. Фазные напряжения в процессе опытов измеряются поочередно одним вольтметром.

3. Порядок выполнения работы

А. Исследование цепи без нейтрального провода

3.1. Собрать схему (см. рисунок 8), измерить токи и напряжения при симметричной нагрузке и проверить получающееся при этом отношение $U_{л}/U_{ф}$.

3.2. Измерить токи и напряжения при несимметричной нагрузке, создаваемой за счет изменения нагрузки одной из фаз (по указанию преподавателя) для случаев:

- а) уменьшение активной нагрузки,
- б) увеличение активной нагрузки,
- в) отключение нагрузки,
- г) замыкание фазы накоротко,
- д) включение в фазу конденсатора,
- е) включение в фазу катушки индуктивности.

Б. Исследование цепи с нейтральным проводом

3.3. Исследовать цепь (см. рисунок 8) при наличии нейтрального провода для случаев нагрузки, указанных в п.3.1 и 3.2, за исключением опыта короткого замыкания. Результаты измерений занести в таблицу 1.

3.4. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для всех режимов и определить из диаграмм по п.3.3 ток в нейтральном проводе.

Таблица 1

Показания приборов							Ток I_N из вект. диаграмм	Характер нагрузки в фазе	Примечание
U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	I_N			
В	В	В	А	А	А	А			
									Без нейтрального провода
									С нейтральным проводом

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Что такое трехфазная симметричная система ЭДС?
- 4.2. Что называется, соединением нагрузки в звезду?
- 4.3. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями, а также между линейными и фазными токами при соединении нагрузки звездой в симметричном режиме?
- 4.4. К чему приводит обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке фаз?
- 4.5. Почему на практике в нейтральный провод не ставят предохранитель?
- 4.6. Чему будут равны напряжения на фазах при симметричной нагрузке фаз в сети без нейтрального провода, если произойдет обрыв фазы А?

Список литературы

1. Кононенко В.В. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов. – Изд.3-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 784с. 50 экз.
2. Касаткин А.С. Электротехника. - М.: Высш.шк., 2002. - 542с. 5 экз.
3. Гетманов В.Т. Электротехника: Курс лекций (часть I): Учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей всех форм обучения. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2011. – 135 с. (150 экз.).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы: опытная проверка соотношений между линейными и фазными токами для различной нагрузки фаз приемника, соединенных треугольником, а также построение по результатам опытов векторных диаграмм напряжений и токов.

1. Некоторые теоретические положения

Соединение трехфазной системы приемников треугольником показано на рисунке 1.

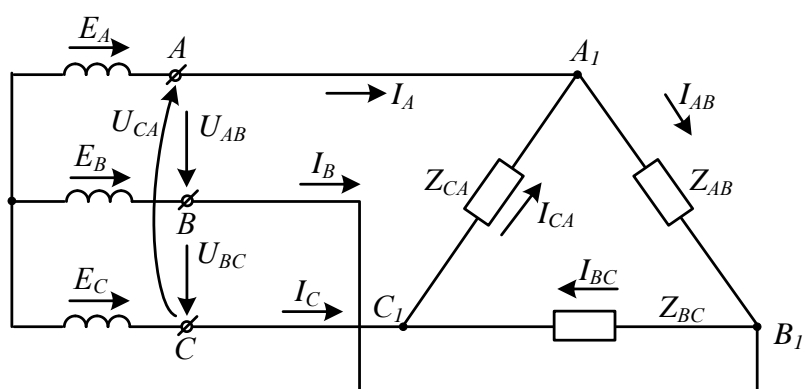


Рисунок 1. Трехфазная система с соединением нагрузки треугольником

Из рисунка следует, что линейные напряжения генератора равны фазным напряжениям нагрузки, если не учитывать сопротивления линейных проводов.

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}. \quad (1)$$

Соотношения между линейными I_A , I_B , I_C и фазными токами I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} выражаются уравнениями, записанными по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}. \end{aligned} \quad (2)$$

В симметричном режиме ($Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$) все фазы находятся в одинаковых условиях, поэтому системы линейных и фазных токов симметричны (рисунок 2), а соотношение между ними выражается как

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}. \quad (3)$$

При несимметричной (неравномерной) нагрузке симметрия токов нарушается, и они могут быть определены из уравнений (2).

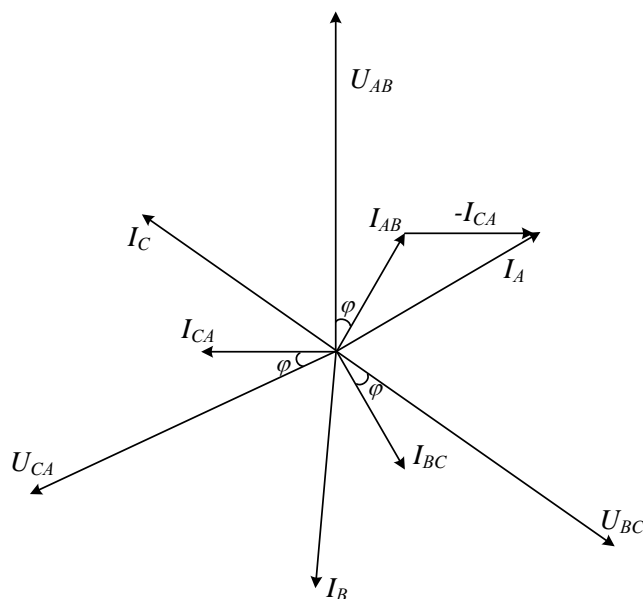


Рисунок 2. Векторная диаграмма напряжений и токов при равномерной нагрузке

При обрыве одной из фаз, например, АВ ($Z_{AB} = \infty$), фазные токи оставшихся фаз I_{BC} и I_{CA} не изменятся, так как на них по-прежнему подаются соответствующие линейные напряжения, а $I_{AB} = 0$.

Линейные же токи определяются как $I_A = -I_{CA}$, $I_B = I_{BC}$, $I_C = I_{CA} - I_{BC}$.

Векторная диаграмма для такого режима приведена на рисунке 3.

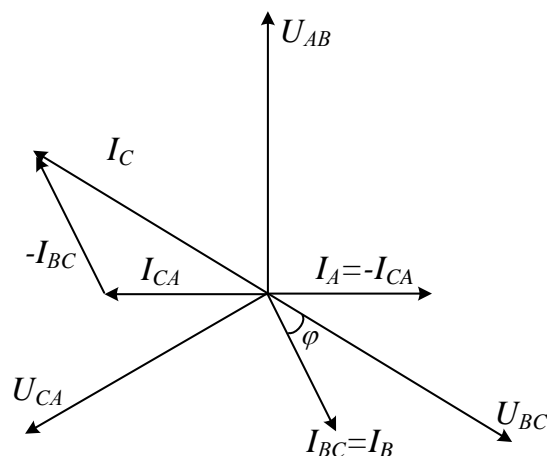


Рисунок 3. Векторная диаграмма при обрыве фазы АВ

При обрыве одного из линейных проводов, например, провода С (см. рисунок 1), режим работы фазы АВ не изменится, а две другие окажутся включенными последовательно на линейное напряжение U_{AB} . При этом трехфазная цепь превращается в однофазную с двумя параллельными ветвями.

Измерение мощности в трехфазной симметричной цепи можно произвести, измерив мощность одной фазы. Тогда мощность всей цепи

$$P = 3P_\phi, \tag{4}$$

где P_ϕ – мощность одной фазы.

При симметричной нагрузке мощность можно измерить методом двух ваттметров (рисунок 4). Мощность всей цепи

$$P = P_1 + P_2, \quad (5)$$

где P_1 и P_2 – показания первого и второго ваттметров.

2. Схема электрической цепи

В настоящей работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рисунке 4. Питание осуществляется от сети трехфазного тока с линейным напряжением 220 В. В качестве нагрузки используется ламповый реостат, в одной из фаз которого включены параллельно две лампы. Мощность одной из них отличается от остальных, что позволяет с помощью ключей К изменять нагрузку в этой фазе.

При подсоединении ваттметров необходимо обратить внимание на правильность включения генераторных зажимов, отмеченных значком *.

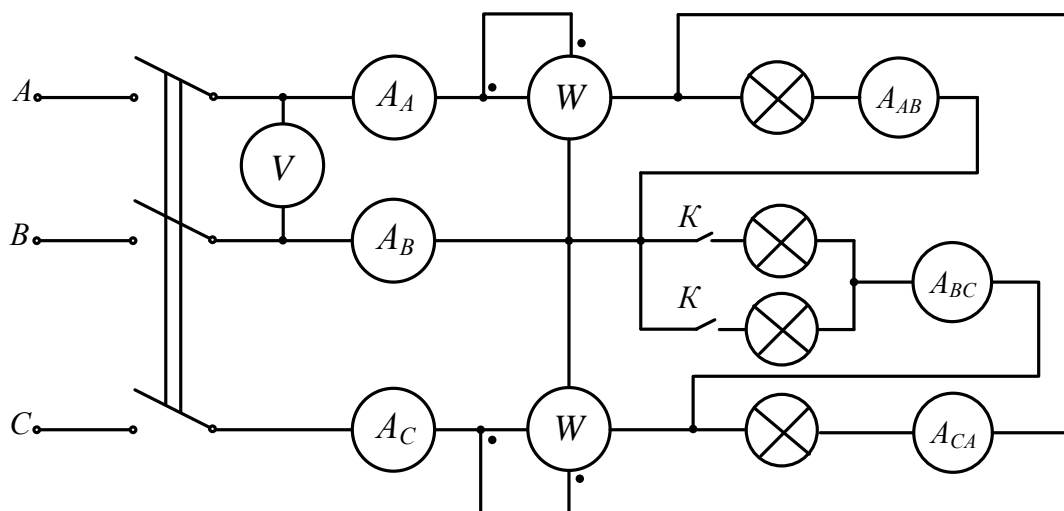


Рисунок 4. Схема для проведения экспериментальной части работы

3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать схему (см. рисунок 4) и исследовать трехфазную цепь, соединенную треугольником, в следующих режимах:

- а) симметричном,
- б) при уменьшении нагрузки одной из фаз,
- в) при увеличении нагрузки той же фазы,
- г) при обрыве одной из фаз,
- д) при обрыве линейного провода и одинаковой нагрузке фаз,
- е) при включении в одну из фаз конденсатора,
- ж) при включении в ту же фазу катушки индуктивности.

Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	P_1	P_2	P	Характер нагрузки в фазе
А	А	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	

3.2. По данным п.3.1,а проверить отношение I_l/I_ϕ и сравнить значение активных мощностей, полученных из опыта, и по формуле $P = \sqrt{3} U_l \cdot I_l \cdot \cos \varphi$.

3.3. Построить векторные диаграммы напряжений и токов для всех случаев симметричной и несимметричной нагрузки.

4. Контрольные вопросы

4.1. Что такое трехфазная симметричная система ЭДС?

4.2. Каким образом приемники трехфазной системы соединяются треугольником?

4.3. Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями при соединении приемников треугольником?

4.4. Каково соотношение между линейными и фазными токами при соединении приемников треугольником?

4.5. Обосновать применение двух ваттметров для измерения активной мощности в трехфазной цепи без нейтрального провода.

Список литературы

1. Кононенко В.В. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов. – Изд.3-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 784с. 50 экз.
2. Касаткин А.С. Электротехника. - М.: Высш.шк., 2002. - 542с. 5 экз.
3. Гетманов В.Т. Электротехника: Курс лекций (часть I): Учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей всех форм обучения. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2011. – 135 с. (150 экз.).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: ознакомиться с опытным определением вольт-амперных характеристик нелинейных элементов и распределением токов и напряжений в разветвленных нелинейных цепях постоянного тока, а также методами их анализа.

1. Некоторые теоретические положения

На практике встречаются цепи постоянного тока с нелинейными элементами, вольт-амперные характеристики (в.а.х.) которых $I = f(U)$

отличаются от прямой линии. Для расчета таких цепей из-за нелинейности их в.а.х. неприменимы методы анализа линейных электрических цепей. Часто расчет нелинейных цепей проводят графическим методом, который имеет целью построение в.а.х. всей нелинейной электрической цепи или ее части. При этом нелинейные элементы вводятся своими в.а.х., а порядок расчета зависит от конфигурации цепи.

Рассмотрим примеры расчета цепей с последовательным и параллельным соединениями нелинейных элементов. На рисунке 1,а приведена схема замещения нелинейной цепи, состоящей из двух последовательно соединенных нелинейных элементов $R_1(I)$ и $R_2(I)$, в.а.х. которых $I(U_1)$ и $I(U_2)$ известны (рисунок 1,б).

Очевидно, что при любом значении тока I в цепи, согласно второму закону Кирхгофа, приложенное к цепи напряжение U равно сумме напряжений U_1 и U_2 , т.е. $U = U_1 + U_2$.

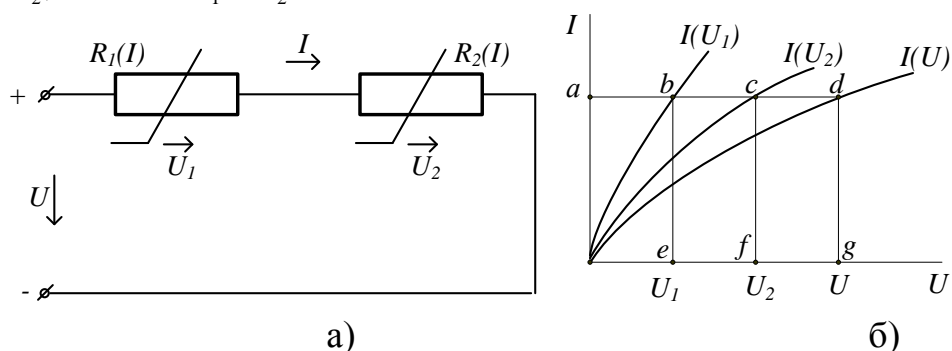


Рисунок 1. Схема замещения последовательного соединения нелинейных элементов и их вольт-амперные характеристики

Поэтому для замены цепи с двумя последовательно включенными нелинейными элементами схемой с одним эквивалентным нелинейным элементом $R(I)$ (рисунок 2) и построения результирующей в.а.х. $I(U)$, выражающей зависимость тока I в цепи от приложенного напряжения U , достаточно просуммировать абсциссы кривых $I(U_1)$ и $I(U_2)$ при нескольких произвольно выбранных значениях тока. Так, например, для получения точки d , принадлежащей в.а.х. $I(U)$, необходимо сложить отрезки ab и ac , т.е. $\vec{ad} = \vec{ab} + \vec{ac}$. Аналогично получают и все другие точки в.а.х. $I(U)$ эквивалентного нелинейного элемента.

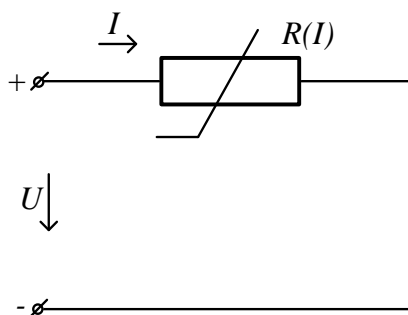


Рисунок 2. Схема замещения с эквивалентным нелинейным элементом

Пользуясь полученной характеристикой $I(U)$, можно решать различные для данной цепи задачи. Например, по известному току в цепи I определить приложенное напряжение U и напряжения на элементах цепи U_1 и U_2 . Это делается следующим образом. На оси ординат находим точку a , соответствующую заданному значению тока, и проводим через нее прямую, параллельную оси напряжений. Из точек пересечения ее с характеристиками $I(U_1)$, $I(U_2)$ и $I(U)$ опускаем перпендикуляры на ось абсцисс, пересечения которых с осью определяют искомые напряжения U_1 , U_2 и U (точки e , f , g). Если задано напряжение U , то сначала по в.а.х. $I(U)$ определяют ток I в цепи, а затем напряжения U_1 и U_2 .

Если последовательно с нелинейным элементом соединен линейный резистор, то расчет такой цепи будет аналогичным, за исключением того, что в.а.х. резистора представляет прямую линию.

При параллельном соединении двух нелинейных элементов с известными в.а.х. $I_1(U)$ и $I_2(U)$ (рисунок 3,а) напряжение U является общим, а ток I в неразветвленной части цепи равен, согласно первому закону Кирхгофа, сумме токов в ветвях, т.е. $I = I_1 + I_2$.

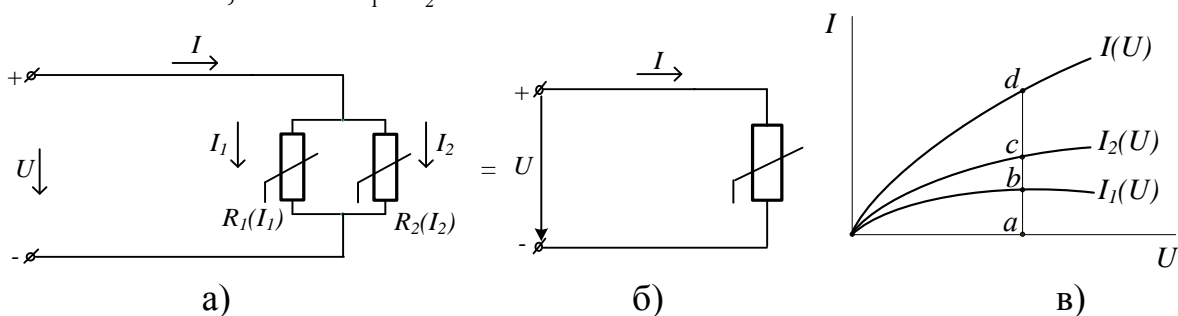


Рисунок 3. Параллельное соединение нелинейных элементов и их вольт-амперные характеристики

Поэтому для замены двух параллельно соединенных нелинейных элементов одним (рисунок 3,б) и получения его в.а.х. $I(U)$ достаточно при нескольких произвольно выбранных значениях напряжений U просуммировать ординаты характеристик отдельных элементов (рисунок 3,в). К примеру, для получения точки d , принадлежащей в.а.х. $I(U)$, необходимо сложить отрезки ab и ac . Пользуясь в.а.х. $I(U)$, как и в предыдущем случае, можно, например, по известному току I в неразветвленной части по в.а.х. $I(U)$ определить приложенное напряжение U , а затем токи в нелинейных элементах или решить обратную задачу.

При расчете смешанного соединения нелинейных элементов (рисунок 4,а) сначала параллельное соединение нелинейных элементов заменяют эквивалентным нелинейным элементом $R(I)$ (рисунок 4,б), как было показано выше. После такого преобразования схема замещения содержит два нелинейных элемента, соединенных последовательно. Расчет такой цепи также рассмотрен выше.

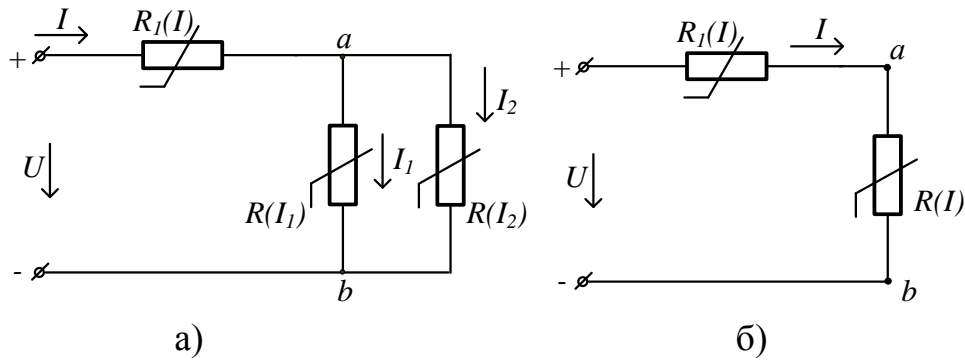


Рисунок 4. Смешанное соединение нелинейных элементов и эквивалентное преобразование

Если в сложной электрической цепи есть одна ветвь с нелинейным элементом, то определение тока в ней можно проводить по методу эквивалентного генератора. С этой целью выделяют ветвь с нелинейным элементом, а всю оставшуюся линейную часть схемы представляют активным двухполюсником (рисунок 5,а).

Известно, что схему линейного активного двухполюсника (см. рисунок 5,а) по отношению к зажимам a и b выделенной ветви можно представить эквивалентным генератором (рисунок 5,б) с ЭДС E_r , равной напряжению на зажимах ab при разомкнутой ветви ($U_{ab\text{xx}}$), и резистором R_r , сопротивление которого равно входному сопротивлению $R_{\text{вх}}$ линейного двухполюсника со стороны зажимов ab .

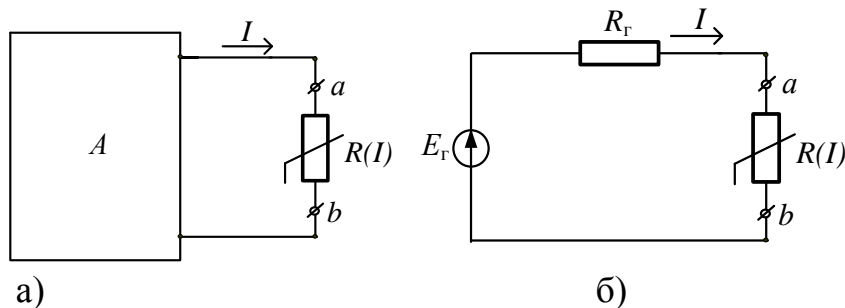


Рисунок 5. Метод эквивалентного генератора при расчете нелинейной цепи

Ток I можно определить по величине E_r из предварительно построенной эквивалентной в.а.х. для цепи (см. рисунок 5,б) аналогично тому, как это было показано выше (см. рисунок 1,б).

Ток через нелинейный элемент можно определить и следующим образом. Уравнение по второму закону Кирхгофа для схемы (см. рисунок 5,б)

$$U_{ab}(I) = E_r - I \cdot R_r \quad (1)$$

представляет собой внешнюю в.а.х. двухполюсника (линия 1, рисунок б), которую можно построить по двум точкам. При холостом ходе в цепи (см. рисунок 5,б) $I = 0$, а напряжение $U_{ab} = E_r$. При коротком замыкании $U_{ab} = 0$, а

ток в цепи $I = \frac{E_r}{R_r}$.

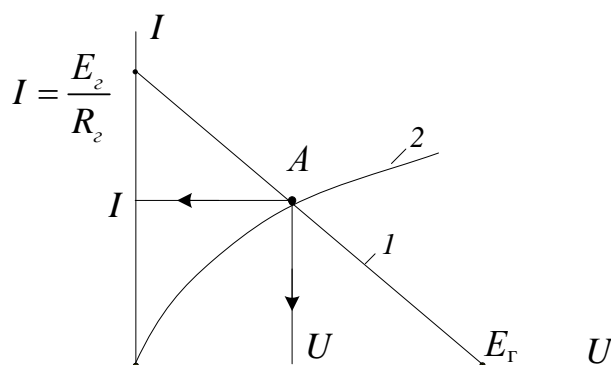


Рисунок 6. Определение тока и напряжения на нелинейном элементе

В то же время $U_{ab}(I)$ является в.а.х. нелинейного элемента (кривая 2, рисунок 6). Очевидно, что рабочий режим схемы (см. рисунок 5,б) должен удовлетворять обеим характеристикам, т.е. должен определяться точкой пересечения А этих характеристик. Перпендикуляры, опущенные из точки А на оси координат, определяют значение тока I и напряжения U на нелинейном элементе. При необходимости могут быть найдены токи в ветвях линейной части схемы по законам Ома и Кирхгофа.

2. Схема электрической цепи

В работе предусматривается получить опытным путем в.а.х. нелинейного элемента, в качестве которого используется обычная лампа накаливания. Предусматривается также измерение токов и напряжений в разветвленной цепи постоянного тока, содержащей один нелинейный элемент.

Для снятия в.а.х. нелинейного элемента используется схема, приведенная на рисунке 7.

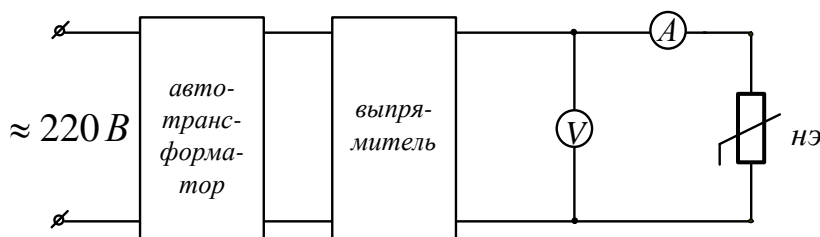


Рисунок 7. Схема для экспериментального получения в.а.х. нелинейного элемента

Распределение токов и напряжений в нелинейной цепи исследуется по схеме (рисунок 8). Напряжения на всех участках цепи замеряются поочередно одним вольтметром.

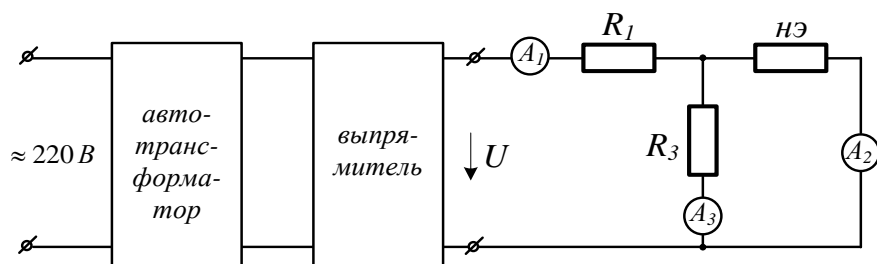


Рисунок 8. Схема для исследования нелинейной цепи постоянного тока

3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать схему, изображенную на рисунке 7, и снять в.а.х. нелинейного элемента. В этом опыте необходимо получить данные для 8-10 точек.

Внимание! В.А.Х. снимать до напряжения, не превышающего 75 В.

Результаты опыта занести в таблицу 1.

Таблица 1

U	B	0				
I	A	0				

3.2. Собрать схему (см. рисунок 8) и измерить токи и напряжения.

Результаты измерений поместить в таблицу 2.

Таблица 2

U	I_1	I_2	I_3	U_1	$U_2=U_3$	R_1	R_3	Примечание
B	A	A	A	B	B	Ом	Ом	
								Эксперимент
						×	×	Расчет

3.3. Задавшись значениями U , R_1 , R_3 , участвовавшими в опыте п.3.2, и в.а.х. нелинейного элемента, полученной в п.3.1, графическим методом рассчитать токи и напряжения в исследуемой цепи (см. рисунок 8). Результаты расчета занести в таблицу 2 и сравнить их с экспериментальными.

3.4. Задавшись значениями U , R_1 , R_3 (п.3.2) и в.а.х. нелинейного элемента, определить методом эквивалентного генератора ток и напряжение нелинейного элемента.

Методические указания

При снятии в.а.х. нелинейного элемента необходимо использовать приборы магнитоэлектрической системы – амперметр с пределом измерения 1 А, вольтметр – 150 В.

При экспериментальном исследовании нелинейной цепи в качестве амперметра A_1 следует использовать прибор с пределом измерения 3 А, а

амперметров A_2 и A_3 – приборы с пределом измерения 1 А. Напряжения измеряются вольтметром на 150 В.

4. Контрольные вопросы

4.1. Что понимают под вольт-амперной характеристикой нелинейного элемента?

4.2. Охарактеризовать статическое сопротивление нелинейного резистора.

4.3. Охарактеризовать дифференциальное сопротивление нелинейного резистора.

4.4. По какой причине при расчете нелинейной цепи не применяют метод наложения?

4.5. Изложить суть способа построения внешней характеристики эквивалентного генератора.

4.6. Определить ток I в цепи (рисунок 9), если $R_I=5$ Ом, а приложенное напряжение $U=15$ В. В.а.х. нелинейного элемента задана в таблице 3.

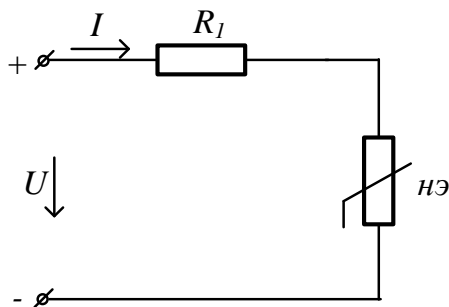


Рисунок 9. Схема замещения нелинейной цепи

Таблица 3

I	А	0	0,8	1,6	2	2,2	2,5
U	В	0	2	6	10	14	20

Список литературы

1. Кононенко В.В. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов. – Изд.3-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 784с. 50 экз.

2. Касаткин А.С. Электротехника. - М.: Высш.шк., 2002. - 542с. 5 экз.

3. Гетманов В.Т. Электротехника: Курс лекций (часть I): Учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей всех форм обучения. – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2011. – 135 с. (150 экз.).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучить устройство и принцип действия однофазного трансформатора и испытать его в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой.

1. Некоторые теоретические положения

Трансформатором называется электромагнитный аппарат, осуществляющий преобразование энергии переменного тока одного напряжения в другое без изменения частоты. Это простой, надежный и экономичный электрический аппарат, не имеющий подвижных частей и скользящих контактов, обладающий высоким КПД (до 99%).

Трансформаторы получили широкое распространение в технике и прежде всего при передаче и распределении электрической энергии.

Потребителям электроэнергии (двигателям, осветительным приборам и т.д.) необходимо низкое напряжение (десятки или сотни вольт), а линии электропередач не могут работать экономично при низком напряжении. И чем длиннее линии, тем выше линейное напряжение (сотни тысяч вольт), а генераторы не могут быть построены на такое высокое напряжение. Поэтому возникает необходимость изменять напряжение, что делается с помощью трансформатора. Повышают напряжение генераторов до требуемого в линии, а в районе потребления его многократно понижают.

В зависимости от назначения разделяют на силовые общего применения (при передаче и распределении электроэнергии) и специальные (печные, сварочные, автотрансформаторы, измерительные) трансформаторы.

В зависимости от рода тока делят на однофазные и многофазные (наиболее распространены трехфазные). В зависимости от способа охлаждения – на сухие и масляные. Но, несмотря на разнообразие типов, их принцип действия и физические процессы, протекающие в них, по существу одни и те же.

Простейший трансформатор (рисунок 1) состоит из двух или более электрически не связанных между собой катушек, помещенных на стальной сердечник (магнитопровод).

Обмотка с числом витков W_1 , соединенная с источником питания, называется первичной.

К вторичной обмотке с числом витков W_2 подключается потребитель Z_n (нагрузка).

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При наличии U_1 по первичной обмотке потечет ток i_1 , который создает в магнитопроводе основной магнитный поток Φ . Этот поток, замыкаясь в магнитопроводе, пронизывает обе катушки и индуцирует в них ЭДС ℓ_1 и ℓ_2 :

$$\ell_1 = -\frac{d\psi}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

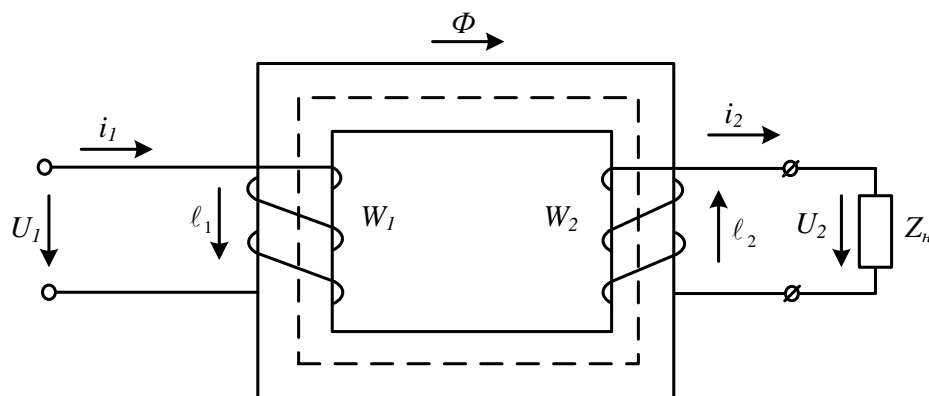


Рисунок 1. Простейший двухобмоточный трансформатор

$$\ell_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

которые могут отличаться друг от друга из-за чисел витков

обмоток. Это обстоятельство позволяет выполнить трансформатор на любое отношение напряжений, применяя обмотки с нужным числом витков.

При подключении нагрузки Z_n к выводу вторичной обмотки под действием ЭДС ℓ_2 в цепи ее потечет ток i_2 и установится напряжение U_2 .

Обмотка, подключенная к сети с большим напряжением, называется обмоткой высшего напряжения (В.Н.), а к сети меньшего напряжения называется – низшего напряжения (Н.Н.).

Если $U_1 > U_2$ - понижающий трансформатор, а если $U_1 < U_2$, то повышающий.

Основными частями трансформатора является магнитопровод и обмотки. Магнитопровод выполнен набранным из листовой (0,35÷0,5) электротехнической стали, листы изолированы с двух сторон лаком для ослабления вихревых токов.

Обмотки надеваются на стержни, которые соединяются посредством ярма. Магнитопроводы бывают стержневые и броневые, а также стыковые и шихтованные.

Трансформаторы характеризуются следующими каталожными данными:

- Номинальная мощность S_n (кВ·А)–мощность, которую может отдавать трансформатор со вторичной стороны. Именно полная мощность, так как трансформаторы могут работать с нагрузками, имеющими разный $\cos\varphi$;
- Линейные номинальные напряжения $U_{1н}$ и $U_{2н}$;
- Линейные токи при номинальной мощности $I_{1н}$ и $I_{2н}$;
- Частота;
- Число фаз;
- Схема и группа соединения (для трехфазных трансформаторов) обмоток;
- Напряжение короткого замыкания U_k %;

- Способ охлаждения.

Если приложенное напряжение U_1 изменяется по синусоидальному закону, то и магнитный поток в сердечнике также будет синусоидальным, т.е. $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Мгновенное значение ЭДС в первичной обмотке:

$$\begin{aligned} \ell_1 &= -\frac{d\psi_1}{dt} = -W_1 \frac{d\Phi}{dt} = -W_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega \cdot t)}{dt} = -W_1 \omega \cdot \Phi_m \cos \omega \cdot t = \\ &= W_1 \omega \cdot \Phi_m \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}) = E_{1m} \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}), \end{aligned}$$

где $E_{1m} = W_1 \omega \Phi_m$ - амплитуда ЭДС.

Аналогично можно записать и для ЭДС вторичной обмотки:

$$\ell_2 = W_2 \omega \cdot \Phi_m \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}) = E_{2m} \sin(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}).$$

Действующие значения ЭДС в первичной и вторичной обмотках запишутся:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{W_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \cdot W_1 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4,44f W_1 \cdot \Phi_m, \\ E_2 &= 4,44f W_2 \cdot \Phi_m. \end{aligned}$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения называется коэффициентом трансформации трансформатора, т.е.

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44f W_1 \cdot \Phi_m}{4,44f W_2 \cdot \Phi_m} = \frac{W_1}{W_2}.$$

Уравнение намагничивающих сил

В режиме холостого хода, когда вторичная обмотка трансформатора разомкнута ($I_2 = 0$, а $I_1 = I_0$ - первичный ток холостого хода), в трансформаторе действует только одна намагничивающая сила $\underline{I}_0 W_1$, которая и наводит основной магнитный поток Φ_m :

$$\Phi_m = \frac{\underline{I}_0 W_1}{R_m},$$

где R_m - магнитное сопротивление сердечника трансформатора магнитному потоку.

При замыкании вторичной обмотки на нагрузку в ней возникает ток \underline{I}_2 , а ток в первичной обмотке возрастает от величины \underline{I}_0 до \underline{I}_1 и теперь поток Φ_m создается действием двух намагничивающих сил $\underline{I}_1 \cdot W_1$ и $\underline{I}_2 \cdot W_2$, т.е.

$$\Phi_m = \frac{\underline{I}_1 \cdot W_1 + \underline{I}_2 \cdot W_2}{R_m}.$$

Если пренебречь потоками рассеяния и активным сопротивлением первичной обмотки, то ЭДС E_1 равна первичному напряжению U_1 , а магнитный поток запишется:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4,44 f W_1} = \frac{U_1}{4,44 f W_1}.$$

Если принять такие допущения, то из этой формулы следует, что магнитный поток не зависит от нагрузки трансформатора, так как U_1 остается неизменным при любом изменении нагрузки. Это обстоятельство позволяет приравнять правые части уравнений для магнитного потока и получить уравнение намагничивающих сил трансформатора.

$$\underline{I}_0 \cdot W_1 = \underline{I}_1 \cdot W_1 + \underline{I}_2 \cdot W_2.$$

Разделив обе части уравнения на W_1

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \cdot \frac{W_2}{W_1} \quad \text{и заменив} \quad \underline{I}_2 \cdot \frac{W_2}{W_1} = \underline{I}'_2, \quad \text{получим уравнение токов}$$

трансформатора.

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}'_2,$$

где \underline{I}'_2 - вторичный ток, приведенный к числу витков первичной обмотки.

Первичный ток трансформатора из этого уравнения:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2).$$

Отсюда следует, что ток I_1 имеет 2 составляющие. Одна из них (I_0) затрачивается на создание основного потока в магнитопроводе Φ_m , а другая ($-\underline{I}'_2$) компенсирует размагничивающее действие вторичного тока. Любое изменение тока во вторичной цепи трансформатора сопровождается изменением первичного тока, а величина потока Φ_m остается неизменной.

Ток холостого хода трансформатора достаточно мал $I_0 = (0,02 \div 0,1)I_1$, и если им пренебречь, то:

$$I_1 = I'_2 = I_2 \cdot \frac{W_2}{W_1}.$$

Отсюда следует, что токи трансформатора обратно пропорциональны числам витков, т.е.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1}.$$

Схема замещения трансформатора

Для анализа режимов работы трансформатора или для исследований сложных цепей, куда входят трансформаторы как элементы этих цепей (электрические сети), реальный трансформатор заменяют комбинацией электрически соединенных сопротивлений – схемой замещения. При ее составлении исключается магнитная связь между обмотками трансформатора, причем все элементы вторичной цепи приводятся к напряжению вторичной обмотки. Часто используется Г-образная схема замещения (рисунок 2).

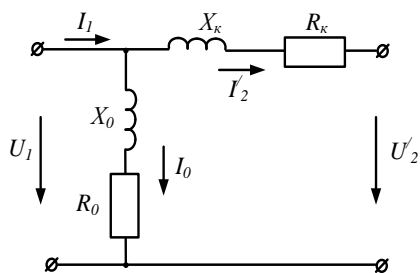


Рисунок 2. Схема замещения трансформатора

В этой схеме активные и реактивные сопротивления обмоток объединены, т.е.

$$R_k = R_1 + R_2', \quad X_k = X_1 + X_2'.$$

Опытное определение параметров схемы замещения

Для определения параметров схемы замещения и некоторых паспортных данных трансформатора проводят опыты холостого хода и короткого замыкания.

Опыт холостого хода проводят по схеме (рисунок 3).

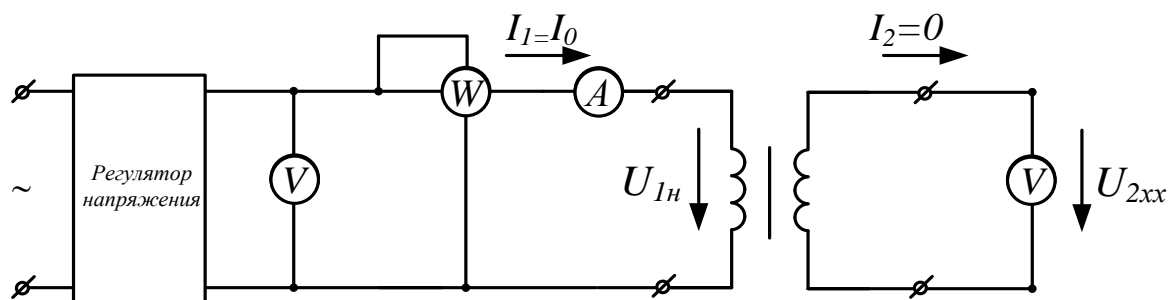


Рисунок 3. Схема для проведения опыта холостого хода трансформатора

Режим холостого хода – это режим, когда вторичная обмотка разомкнута ($Z_H = \infty$, $I_2 = 0$), а на первичную обмотку подано номинальное напряжение $U_{1н}$.

По этому опыту находят:

- параметры X_0 и R_0 Г-образной схемы замещения, так как в этом случае $I_2' = 0$, а $I_1 = I_0$.

$$Z_0 = \frac{U_{1н}}{I_0}, \quad R_0 = \frac{P_{xx}}{I_0^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

- коэффициент трансформации $K = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_{1н}}{U_{2xx}}$;

- магнитные потери мощности в сердечнике P_c . Мощность P_{xx} (показания ваттметра), потребляемая трансформатором, затрачивается на потери в стали и электрические потери в меди первичной обмотки $P_m = I_0^2 \cdot R_1$. Из-за малости тока

I_0 этими потерями пренебрегают и считают, что вся мощность холостого хода затрачивается на магнитные потери в стали магнитопровода, т.е. $P_{xx} = P_c$.

Опыт короткого замыкания проводят по схеме, представленной на рисунке 4. Этот опыт проводится при закороченной вторичной обмотке.

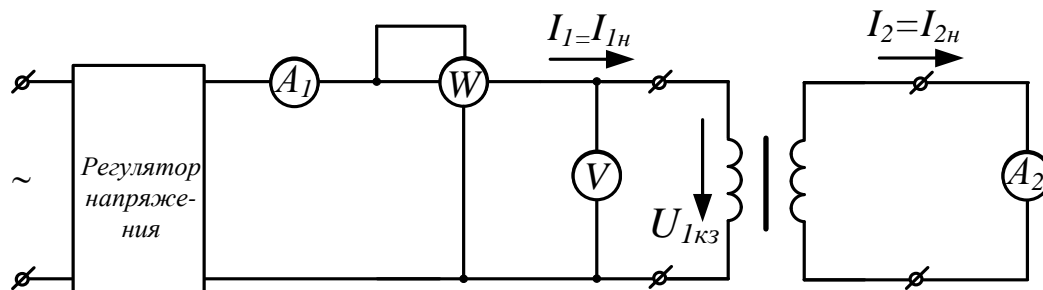


Рисунок 4. Схема для проведения опыта короткого замыкания трансформатора

Если к первичной обмотке в таком режиме подвести номинальное напряжение, то токи в обмотках превысят номинальные в 10-40 раз. Поэтому напряжение U_1 плавно повышают от нуля до тех пор, пока ток в первичной обмотке не достигнет номинальной величины $I_{1н}$, и фиксируют мощность потерь $P_{кз}$ и напряжение $U_{1кз}$. Его обычно выражают в процентах от номинального $U_k \% = \frac{U_{1кз}}{U_{1н}} 100\%$ и называют напряжением короткого замыкания. У реальных трансформаторов оно лежит в пределах $3 \div 10\%$.

Активные потери в этом опыте $P_{кз}$ (показания ваттметра) затрачиваются в основном на электрические потери в обмотках P_m , т.к. потери в сердечнике незначительны из-за малости магнитного потока, т.к. $U_{1кз} \ll U_{1н}$. Этот опыт позволяет определить параметры схемы замещения X_k и R_k . В схеме (рис.2) можно пренебречь током I_0 , так как он в этом опыте в сотни раз меньше I_1 или I'_2 , и считать, что $I_1 = I'_2$. Тогда

$$Z_k = \frac{U_{1кз}}{I_{1н}}, \quad R_k = \frac{P_{кз}}{I_{1н}^2}, \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

Величину U_k используют при расчете тока короткого замыкания трансформатора в условиях эксплуатации. В этом случае короткое замыкание является аварийным режимом, возникающим в результате пробоя изоляции или неправильных соединений в цепи вторичной обмотки. При этом токи I_1 и I_2 резко возрастают. Установившееся значение тока в этом режиме может быть найдено по следующей формуле:

$$I_{1кз} = \frac{I_{1н} \cdot 100\%}{U_k \%}.$$

Поэтому в каталоге для трансформаторов и дается величина $U_k \%$.

Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия η трансформатора определяется как отношение отдаваемой трансформатором мощности P_2 к получаемой им мощности P_1 , т.е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Разность этих двух мощностей $\Delta P = P_1 - P_2$ представляет собой потери в трансформаторе. Следовательно, коэффициент полезного действия трансформатора связан с полезной нагрузкой P_2 и потерями следующим соотношением:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + \Delta P}.$$

Как уже отмечалось, в трансформаторе различают два вида потерь: потери в стали сердечника P_c (гистерезис и вихревые токи) и потери в меди обмоток P_m . Мощность холостого хода трансформатора практически вся затрачивается на потери в стали P_c и определяется по опыту холостого хода. Потери в меди определяются из опыта короткого замыкания. Таким образом, $\Delta P = P_c + P_m$, а коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_c + P_m} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_c + P_m} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{xx} + P_{кз}} = \frac{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_n \cos \varphi_2 + P_{xx} + \beta^2 P_{кз}},$$

где $S_n = U_{2n} I_{2n}$ - номинальная мощность трансформатора,

$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}}$ - коэффициент нагрузки.

Коэффициент полезного действия трансформатора зависит от нагрузки. При нагрузке трансформатора $50 \div 70\%$ от номинальной ($\beta = 0,5 \div 0,7$) коэффициент полезного действия будет максимальным, порядка 0,995. Зависимость $\eta = f(\beta)$ приведена на рисунке 5.

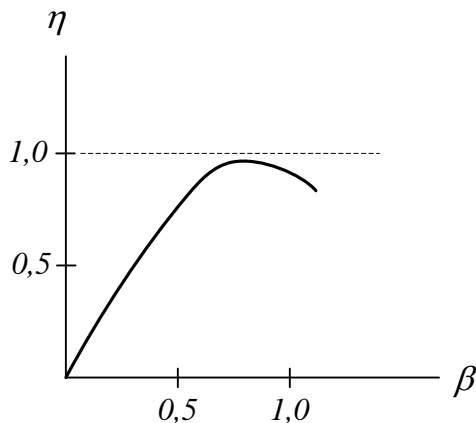


Рисунок 5. Зависимость $\eta = f(\beta)$

Вообще коэффициент полезного действия трансформаторов весьма велик, лежит в пределах $0,96 \div 0,995$.

Для испытаний используется однофазный двухобмоточный трансформатор со следующими техническими характеристиками: мощность $S_n = 100 \text{ ВА}$, $U_{1н} = 220 \text{ В}$, $U_{2н} = 110 \text{ В}$, частота 50 Гц , номинальный ток первичной обмотки $I_{1н} = 0,5 \text{ А}$, номинальный ток вторичной обмотки $I_{2н} = 1 \text{ А}$.

В качестве нагрузки трансформатора используется реостат R_n (рисунок 6).

2. Порядок выполнения работы

2.1. Собрать схему для проведения опыта холостого хода (см. рисунок 3). Установить с помощью регулятора напряжения на первичной обмотке трансформатора номинальное напряжение $U_1 = 220 \text{ В}$ и измерить первичный ток холостого хода $I_1 = I_0$ и напряжение на разомкнутой вторичной обмотке трансформатора U_{2xx} , а также мощность холостого хода P_{xx} . Результаты измерений внести в таблицу 1. По результатам опыта вычислить коэффициент трансформации трансформатора и поместить в таблицу 1.

Таблица 1

Измерено				Вычислено
U_1	$I_1 = I_0$	U_{2xx}	P_{xx}	K
В	А	В	Вт	
220				

2.2. Собрать схему для проведения опыта короткого замыкания (см. рисунок 4). Рукоятку регулятора напряжения сначала устанавливают в начальное положение (минимальное напряжение), а затем плавно увеличивают напряжение на зажимах первичной обмотки до такого значения U_1 , при котором в первичной и во вторичной обмотках установятся токи номинальной величины $I_{1н}$ и $I_{2н}$. Результаты измерений первичного и вторичного токов, мощности $P_{кз}$ занести в таблицу 2. По результатам опыта вычислить значение напряжения короткого замыкания $U_k \%$.

Таблица 2

Измерено				Вычислено
U_1	I_1	I_2	$P_{кз}$	$U_k \%$
В	А	А	Вт	

2.3. Собрать схему (см. рисунок 6) и испытать трансформатор при различном коэффициенте нагрузки β . Для этого необходимо установить и поддерживать на первичной обмотке номинальное напряжение $U_{1н} = 220 \text{ В}$ и,

изменяя нагрузку, снять показания приборов для следующих значений коэффициента нагрузки: $\beta = 0,25; 0,5; 0,75; 1,0$.

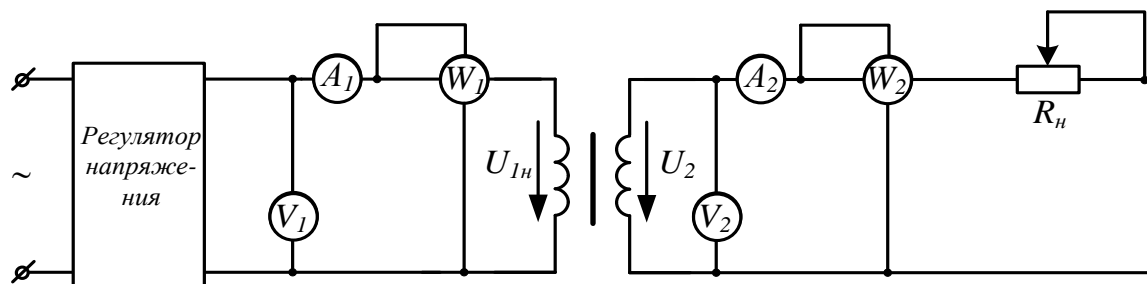


Рисунок 6. Схема для испытаний трансформатора под нагрузкой

Результаты измерений поместить в таблицу 3.

Таблица 3

Измерено							Вычислено
β	U_1	U_2	I_1	I_2	P_2	P_1	η
	В	В	А	А	Вт	Вт	
0,3	220						
0,5	220						
0,75	220						
1,0	220						

2.4. По данным, полученным в п.2, вычислить коэффициент полезного действия трансформатора для различных значений коэффициента нагрузки β и занести результаты расчета в таблицу 3, а также построить внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$.

3. Контрольные вопросы

- 3.1. Что такое коэффициент трансформации трансформатора?
- 3.2. По результатам какого опыта трансформатора можно определить коэффициент трансформации?
- 3.3. Какие потери мощности различают в трансформаторах?
- 3.4. Какие потери мощности в трансформаторе определяют из опыта холостого хода?
- 3.5. Какие потери мощности в трансформаторе определяют из опыта короткого замыкания?
- 3.6. Чем отличается испытательный режим короткого замыкания трансформатора от аварийного режима короткого замыкания?
- 3.7. Что такое напряжение короткого замыкания $U_k\%$ и для чего оно используется?
- 3.8. Как определить КПД трансформатора?

3.9. При каком значении нагрузки трансформатор имеет максимальный КПД?

3.10. Какой вид имеет внешняя характеристика трансформатора?

Список литературы

1. Кононенко В.В. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов. – Изд.3-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 784с. 50 экз.

2. Касаткин А.С. Электротехника. - М.: Высш.шк., 2002. - 542с. 5 экз.

3. Борисов Ю.М. Электротехника: Учеб. для неэлектротехн. спец. вузов/ Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 551 с. 23 экз.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ИСПЫТАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: ознакомиться с устройством асинхронного двигателя; научиться производить пуск и реверсирование двигателя, а также снимать и строить основные характеристики асинхронного двигателя.

1. Некоторые теоретические положения

Трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором получили широкое применение в промышленности благодаря их высокой надежности и экономичности, простоте и дешевизне.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором состоит из неподвижного статора, в пазах которого размещена обмотка, подключаемая к сети трехфазного переменного тока, и вращающегося ротора, имеющего обмотку в виде беличьей клетки.

Начало и конец каждой фазы обмотки статора выведены наружу, что позволяет соединить обмотку треугольником или звездой, т.е. применить один и тот же двигатель на два различных напряжения сети, отношение которых равно $\sqrt{3}$.

На щитке машины, как правило, указывается два напряжения, например, 220/127, 380/220 В. Большему из указанных напряжений сети соответствует соединение обмотки статора в звезду, меньшему - в треугольник.

При подключении трехфазной обмотки статора к трехфазной сети образуется вращающееся магнитное поле, которое наводит в замкнутой обмотке ротора переменные токи. Взаимодействие индуктированных токов ротора с вращающимся магнитным полем статора приводит ротор во вращение в том же направлении, в котором вращается и поле.

Скорость поля статора n_1 связана с частотой сети f_1 и числом пар полюсов машины p зависимостью:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

Таким образом, при $p=1$, $n_1=3000$ об/мин.,
 при $p=2$, $n_1=1500$ об/мин.,
 при $p=3$, $n_1=1000$ об/мин.

Скорость вращения ротора n_2 определяется формулой

$$n_2 = n_1(1 - S),$$

где S – скольжение, величина, характеризующая разность в скоростях вращения поля статора и ротора, находится по формуле:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Часто скольжение выражают в процентах, т.е.

$$S_h = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%.$$

В зависимости от режима работы двигателя скольжение изменяется от нуля до единицы. Скольжение $S=0$ соответствует режиму холостого хода, когда вал двигателя не нагружен, т.е. скорости поля статора и ротора близки ($n_2=n_1$).

Скольжение $S=1$ соответствует режиму короткого замыкания, когда противодействующий момент на валу превышает вращающий момент двигателя и ротор неподвижен ($n_2=0$).

При номинальной мощности на валу работающего двигателя скольжение невелико и составляет 2-6%.

Вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален магнитному потоку Φ и активной составляющей тока $I_2 \cos \psi_2$ в роторе, т.е.

$$M = C_m \Phi I_2 \cos \psi_2,$$

где $\cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (X_2 \cdot S)^2}}$ характеризует сдвиг тока в роторе по отношению

к ЭДС ротора.

Здесь R_2 – активное сопротивление обмотки ротора, X_2 – индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора.

Механическая характеристика асинхронного двигателя (рисунок 1) часто представляется в виде зависимости частоты вращения ротора от нагрузки на валу $n_2=f(M)$. Такая зависимость определяет эксплуатационные возможности двигателя. Точка А определяет номинальный режим работы двигателя, которому соответствует $M_{ном}$ и $n_{ном}$. Точка К соответствует максимальному (критическому) значению момента M_k . При перегрузке двигателя свыше M_k двигатель входит в область неустойчивого режима и останавливается.

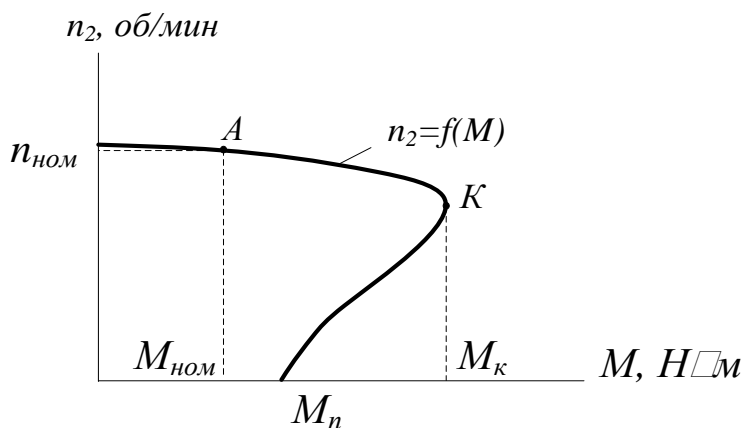


Рисунок 1. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Из рисунка 1 следует, что в рабочей области частота вращения ротора незначительно снижается при увеличении вращающего момента от нуля до максимального значения. Механическую характеристику такого вида называют жесткой.

Часто технологический процесс требует изменения направления вращения (реверсирования) приводных электродвигателей. Ротор двигателя изменит направление вращения на противоположное, если изменится направление вращения магнитного поля статора. Этого можно достичь, поменяв местами любые две фазы сети двигателя.

2. Схема для проведения экспериментальной части работы

Для исследования используется трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4ААМ50А4У3. Основные характеристики его указаны на щитке. Схема для испытания двигателя показана на рисунке 2.

В качестве нагрузки двигателя используется электромагнитный тормоз (ЭМТ) типа ТЭМ-100, связанный с валом двигателя, а для измерения частоты вращения ротора двигателя применен фототахометр ФТ-2, описание и инструкция по эксплуатации, которых приведены в приложении.

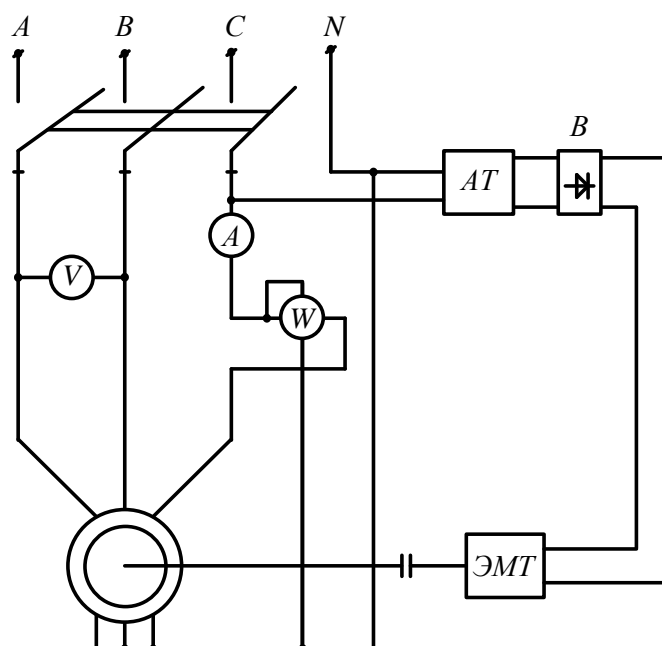


Рисунок 2. Схема для испытания асинхронного двигателя

Электромагнитный тормоз питается от выпрямителя *B* через автотрансформатор *АТ*, с помощью которого можно регулировать ток в системе электромагнитов *ЭМТ*, что позволяет плавно изменять тормозной момент на валу двигателя. С помощью ваттметра измеряется активная мощность, потребляемая двигателем. Амперметр предназначен для измерения тока статора.

3. Порядок выполнения работы

3.1. Собрать схему рисунка 2 для испытания двигателя.

3.2. Запустить двигатель и снять показания приборов при холостом ходе двигателя.

3.3. Испытать асинхронный двигатель, нагружая его с помощью электромагнитного тормоза. Снять показания приборов при 5-6 значениях тормозного момента. Показания приборов занести в таблицу 1.

Таблица 1

Измерено				Вычислено				
U_1	I_1	P_1	n_2	M	S	$\cos\varphi_1$	η	P_2
В	А	Вт	об/мин	Н·м	%	-	-	Вт

3.4. Выполнить обработку результатов опытов, пользуясь расчетными формулами

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1 I_1}, P_2 = \frac{M \cdot n_2}{9,55}, \eta = \frac{P_2}{P_1}, S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%.$$

3.5. По результатам измерений и вычислений построить рабочие характеристики двигателя:

$$n_2 = f(P_2), S = f(P_2), M = f(P_2), I_1 = f(P_2), \cos \varphi_1 = f(P_2), \eta = f(P_2).$$

4. Контрольные вопросы

- 4.1. Почему двигатель называется асинхронным?
- 4.2. Из каких основных частей состоит асинхронный двигатель?
- 4.3. Как рассчитывается частота вращения поля статора?
- 4.4. Как определяется скорость вращения ротора?
- 4.5. Каким образом можно регулировать скорость вращения ротора?
- 4.6. Как изменить направление вращения ротора двигателя?
- 4.7. Дать определение скольжения.
- 4.8. Как определяется КПД двигателя и какие он имеет значения?
- 4.9. Чем отличается асинхронный двигатель с фазным ротором?
- 4.10. Охарактеризовать многоскоростной асинхронный двигатель.

Список литературы

1. Кононенко В.В. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов. – Изд.3-е. – Ростов на Дону: Феникс, 2007. – 784с. 50 экз.
2. Касаткин А.С. Электротехника. - М.: Высш.шк., 2002. - 542с. 5 экз.
3. Борисов Ю.М. Электротехника: Учеб. для неэлектротехн. спец. вузов/ Ю.М. Борисов, Д.Н. Липатов, Ю.Н. Зорин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 551 с. 23 экз.

Приложение 1

1. Электромагнитный тормоз

Основными конструктивными элементами тормоза являются статор и дисковый алюминиевый ротор, приводимый во вращение исследуемым двигателем.

Статор состоит из неподвижной стойки и поворотной системы электромагнитов. Каждый магнит на поворотной части имеет магнитопровод, на котором расположены катушки, образующие обмотку возбуждения тормоза. Дисковый ротор тормоза вращается между полюсными наконечниками магнитопровода.

При подаче на выводы обмотки возбуждения тормоза постоянного напряжения в ней возникает постоянный ток, создающий постоянное магнитное поле. Если при возбужденном тормозе ротор привести во вращение, то в диске ведутся вихревые токи. Взаимодействуя с постоянным магнитным полем электромагнитов, они создают на валу двигателя противодействующий момент, а на валу поворотной части статора - вращающий момент, увлекающий систему электромагнитов в сторону вращения ротора. При равенстве вращающего и противодействующего моментов поворотная система статора придет в неподвижное состояние, что соответствует режиму нагрузки с неизменной скоростью вращения ротора двигателя.

Величина создаваемого тормозом момента плавно регулируется изменением величины напряжения с помощью рукоятки автотрансформатора.

Чтобы определить величину момента на валу асинхронного двигателя, необходимо показание стрелки измерительной системы тормоза умножить на 200 г·см, а затем перевести в Н·м, учитывая, что 1 Н·м = 0,102 кг·м.

2. Фототахометр ФТ-2

Фототахометр позволяет измерять число оборотов вала двигателя в интервале от 500 до 8000 об/мин. Отсчет производится по шкале стрелочного электроизмерительного прибора.

Измеряемое число оборотов вала n (об/мин) двигателя рассчитывается по формуле:

$$n = n_n + \left(\frac{n_e - n_n}{100} \right) N,$$

где n_n – нижний предел диапазона измерений,

n_e – верхний предел диапазона измерений,

N – показание прибора в делениях.

К примеру, при работе на втором диапазоне ($n_n = 1000$ об/мин, $n_e = 3000$ об/мин) при отклонении стрелки прибора на 23 деления скорость вращения определяется как

$$n = 1000 + \frac{3000 - 1000}{100} 23 = 1460 \text{ об/мин.}$$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение и исследование схем полупроводниковых выпрямителей и определение их основных параметров.

1. Некоторые теоретические положения

Выпрямление переменного тока производится при помощи электрических вентилях, обладающих односторонней проводимостью - малое сопротивление в прямом направлении и очень большое в обратном.

В настоящее время в качестве таких элементов, обладающих выпрямительными свойствами, преимущественно используются полупроводниковые диоды.

Обычно выпрямительное устройство, помимо выпрямителя (В), содержит силовой трансформатор (T_p), сглаживающий фильтр (C_ϕ) и, если требуется, стабилизатор напряжения (СН) (рис.1).

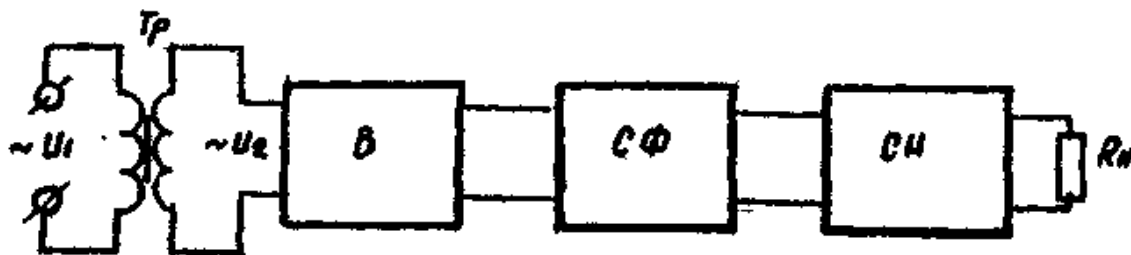


Рисунок 1. Структурная схема полупроводникового выпрямителя

Выпрямительные устройства, в зависимости от схемы соединения и назначения, могут быть однофазные и трехфазные, управляемые и неуправляемые.

Для устройств электроники, автоматики, сигнализации, контроля и т.п. требуются небольшие мощности. Поэтому для их питания обычно применяются однофазные выпрямители с диодами малой и средней мощности.

Для выпрямления однофазного переменного тока применяются как однополупериодные, так и двухполупериодные схемы выпрямителей. Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис.2.

В положительный полупериод напряжения, когда точка «а» имеет положительный потенциал, диод VD открыт, через него проходит ток i_n и в результате на нагрузочном резисторе будет создаваться падение напряжения

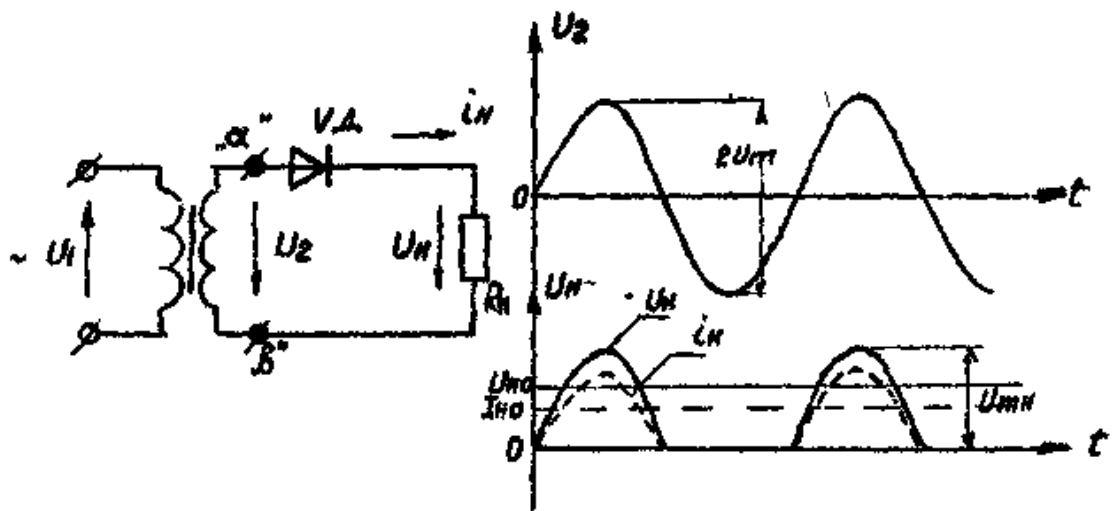


Рисунок 2. Схема и временные диаграммы однополупериодного выпрямителя.

U_n , практически равное напряжению U_2 . В отрицательный полупериод диод закрыт, $i_n=0$ и выходное напряжение равно нулю. Из изложенного ясно, что напряжение и ток в цепи нагрузки i_n являются пульсирующими, причем в течение периода T проходит одна полуволна синусоидального тока.

Постоянная составляющая тока $I_{но}$ и напряжения $U_{но}$ соответственно равны

$$I_{но} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt = \frac{I_m}{\pi}; \quad (1)$$

$$U_{но} = I_{но} R_n = \frac{I_m}{\pi} \cdot R_n = \frac{U_m}{\pi},$$

где I_m и U_m - амплитудные значения тока и напряжения.

Величину пульсаций тока или напряжения оценивают коэффициентом пульсаций.

k_n - отношение амплитуды верхней гармоники тока или напряжения к постоянной составляющей тока или напряжения.

$$k_n = \frac{I_{1m}}{I_0} = \frac{U_{1m}}{U_0}. \quad (2)$$

Для однополупериодного выпрямителя

$$I_{1m} = I_{m/2}; \quad U_{1m} = U_{m/2}$$

$$k_{n4} = \frac{I_m}{2} \cdot \frac{\pi}{I_m} = \frac{\pi}{2} = 1,57. \quad (3)$$

Такие схемы выпрямителей обычно используются для питания цепей малой мощности. Их недостатком является высокий уровень пульсации.

Двухполупериодный выпрямитель обеспечивает лучшее использование трансформатора (нет подмагничивания сердечника постоянным током) и уменьшение пульсаций тока и напряжения в нагрузке. Наиболее распространенной является мостовая схема выпрямителя, рисунок 3,а.

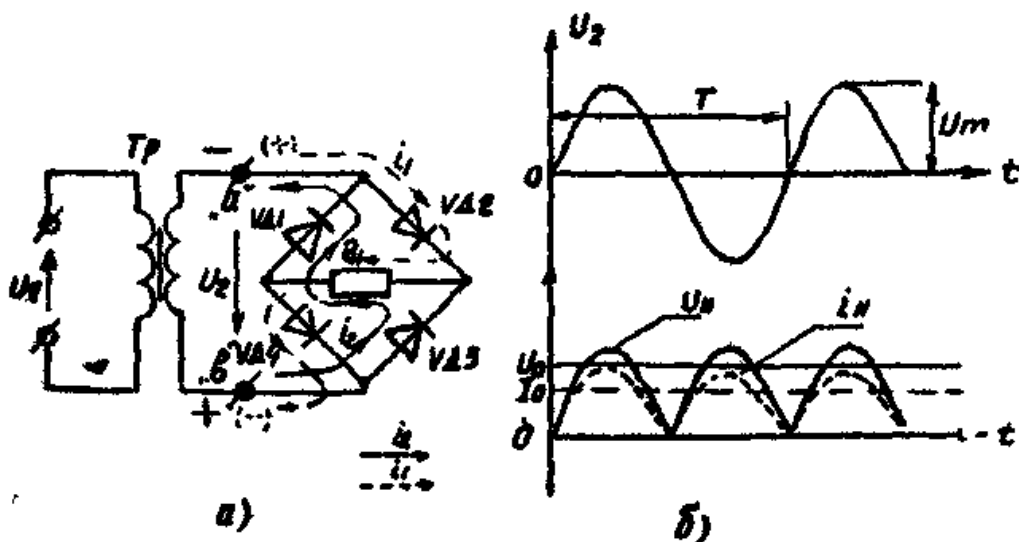


Рисунок 3. Схема (а) и временные диаграммы (б) двухполупериодного выпрямителя

В положительный полупериод (точка «а» имеет положительный потенциал) открыты диоды VD2 и VD4 (VD1 и VD3 закрыты), протекает ток i_1 , который является и током нагрузки i_H . В другой полупериод напряжения U_2 открывается диоды VD1, VD3 (VD2 и VD4 закрываются), течет ток i_2 , который в нагрузочном резисторе R_H имеет то же направление, что и ток i_4 .

Таким образом, в нагрузке в течение периода T проходят две полуволны тока одного направления. Следовательно, постоянная составляющая тока в нагрузке в два раза больше, чем в однополупериодной схеме:

$$I_0 = 2 \frac{I_m}{\pi}; \quad U_0 = 2 \frac{U_m}{\pi}.$$

Коэффициент пульсаций двухполупериодного выпрямителя определяется из выражения

$$k_{n2} = \frac{2}{m^2 - 1} = 0,667, \quad (4)$$

где m - число отрезков кривой тока за период (для однофазного двухполупериодного выпрямителя $m=2$).

Достоинством мостовой схемы выпрямителя, кроме отмеченных ранее, является то, что здесь не обязательно наличие трансформатора. Выпрямительное устройство может работать непосредственно от имеющегося переменного напряжения, что практически используется во многих случаях (например, в схемах автоматики). Кроме того, в этой схеме максимальное обратное напряжение на закрытых диодах в два раза меньше, чем у однополупериодных.

2. Сглаживающие фильтры

Выпрямленное напряжение состоит из постоянной и переменной составляющих, в то время как для питания электронных и других устройств используется только постоянная составляющая. Переменная же составляющая не только не используется, но и приводит к ряду нежелательных явлений

(потери энергии, наводки и т.п.). Потому стремятся к уменьшению переменной составляющей, т.е. снижают коэффициент пульсаций. Для этой цели применяются специальные схемы, называемые сглаживающими фильтрами. Применяются в основном фильтры емкостные, индуктивно-емкостные, резистивно-емкостные.

Емкостный фильтр представляет собой конденсатор емкостью C_ϕ , включаемый параллельно резистору R_n , он применяется для выпрямителей малой мощности (рис. 4,а).

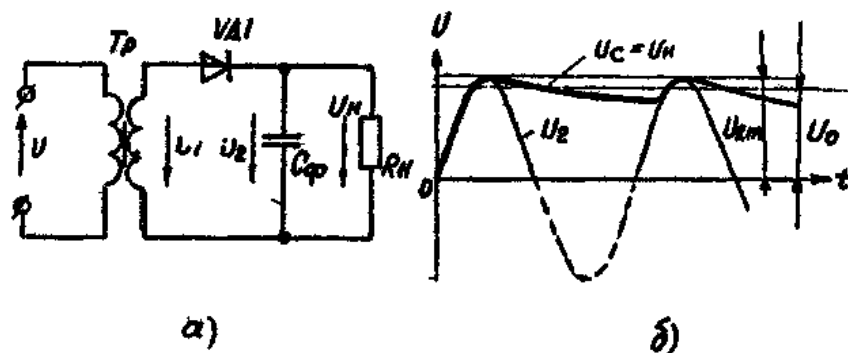


Рисунок 4. Схема и временная диаграмма напряжений емкостного фильтра.

В положительный полупериод конденсатор заряжается до амплитудного значения U_{2m} . Емкость конденсатора выбирают такой величины, чтобы для частоты пульсаций ω_n сопротивление конденсатора $X_c = 1/\omega_n \cdot C_\phi$ было много меньше R_n . Тогда постоянная времени разряда цепи $\tau_{раз} = C_\phi \cdot R_n$ значительно больше периода пульсаций, конденсатор разряжается сравнительно медленно и напряжение на нем уменьшается незначительно (рис. 4,б).

Это приводит к увеличению среднего значения выпрямленного напряжения U_0 на нагрузочном резисторе R_n и к снижению коэффициента пульсаций.

Индуктивный фильтр представляет собой катушку индуктивности (дроссель), обладающую индуктивностью L_ϕ и активным сопротивлением R_ϕ . Фильтр (дроссель) включается последовательно с резистором нагрузки R_n . Он работает эффективно в цепях с большими токами при выполнении условий:

$$m\omega_n L_\phi \gg R_n, \quad R_\phi \ll R_n$$

где m - число фаз.

Для более качественного сглаживания применяются Г-образные (или П-образные) LC - фильтры и RC - фильтры (рис.5, а,б).

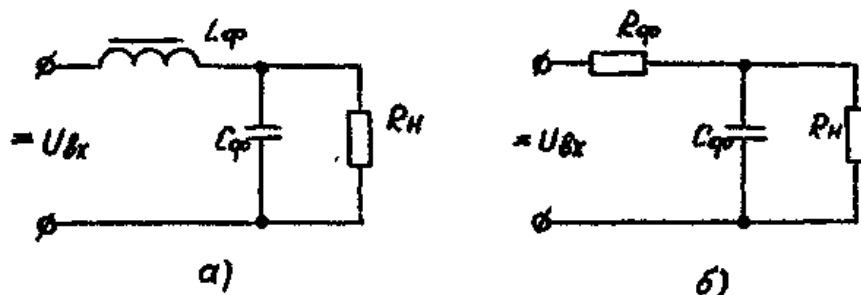


Рисунок 5. Схемы LC - фильтра и RC - фильтра

Повышение сглаживания в LC - фильтре (см. рис.5,а) происходит потому, что в индуктивности значительная часть переменной составляющей напряжения теряется. Емкость, включенная параллельно нагрузке, составляет для переменной составляющей тока сопротивление значительно меньше, чем сопротивление R_n , и поэтому значительно уменьшает долю этого тока в нагрузке. Качество фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания пульсаций.

$$S = \frac{k_{n\text{вх}}}{k_{n\text{вых}}} = \frac{U_{\text{вхт}}}{U_{\text{выхт}}} \cdot \frac{U_{02}}{U_{01}}. \quad (5)$$

Для LC - фильтра с учетом, что $R_n \gg X_c$,

т.е. $U_{01} \cong U_{02}$,

где U_{01} и U_{02} - постоянные составляющие напряжений до и после фильтра, $U_{\text{вхт}}$, $U_{\text{выхт}}$ - амплитуда пульсаций до и после фильтра.

$$S = \frac{X_L - X_c}{X_c} = \frac{X_L}{X_c} - 1; \quad S = \omega_n^2 LC - 1. \quad (6)$$

$$X_L = \omega_n L_\phi; \quad X_c = \frac{1}{\omega C_\phi}.$$

Или, если задано S,

$$LC = \frac{S + 1}{\omega_n^2}. \quad (7)$$

Для уменьшения габаритов и веса можно вместо L_ϕ использовать резистор R_ϕ (RC - фильтр), см. рис. 5,б).

Повышение сглаживания здесь происходит потому, что на резисторе R_ϕ теряется значительно большая часть переменной составляющей, чем постоянной, а емкость, включенная параллельно нагрузке R_n , составляет для переменной составляющей тока сопротивление значительно меньше, чем сопротивление, и поэтому значительно уменьшает долю переменного тока в нагрузке. Сопротивления резисторов R_n и R_ϕ примерно одного порядка. В отличие от LC - фильтра, здесь происходит уменьшение постоянной составляющей выходного напряжения и коэффициент пульсаций определяется из выражения

$$S = \frac{U_{\text{вхт}}}{U_{\text{выхт}}} \cdot \frac{U_{02}}{U_{01}} = \frac{\sqrt{R_\phi^2 + X_c^2}}{X_c} \cdot \frac{R_n}{R_n + R_\phi}. \quad (8)$$

3. Порядок выполнения работы

3.1. Изучить методические указания, ознакомиться с лабораторным стендом.

3.2. Собрать схему однополупериодного выпрямителя и снять осциллограммы выходного напряжения:

а) при отключенном сглаживающем фильтре без нагрузки ($I_n = 0$);

б) при включенном фильтре без нагрузки и с заданной нагрузкой.

3.3. Собрать схему двухполупериодного выпрямителя и снять осциллограммы выходного напряжения по п.п. 2,а, 2,б.

3.4. Снять и построить внешнюю характеристику двухполупериодного выпрямителя с RC - фильтром и без фильтра.

3.5. Определить коэффициент пульсации, коэффициент сглаживания фильтра с нагрузкой и без нагрузки по осциллограммам выходных напряжений исследуемых выпрямителей.

Примечание: Значения входного напряжения, емкости конденсатора фильтра и тока нагрузки (п.2,б, 3, 5, 6) устанавливаются по указанию преподавателя.

Исследование однополупериодного выпрямителя

При выполнении лабораторной работы на стенде (рис.6) исследуемая схема однополупериодного выпрямителя (рис.7) собирается с помощью переключателей (1;2; 5; 6;7;8;).

Снятие осциллограмм производится по координатной сетке на экране осциллографа. Для каждой осциллограммы записывается ток нагрузки и выходное напряжение.

При некотором допущении можно считать, что отношение коэффициентов пульсаций выходного напряжения с фильтром $k_{пф}$ и без фильтра $k_{по}$ равно

$$\frac{k_{пф}}{k_{по}} = \frac{B}{A}. \quad (9)$$

Тогда коэффициент пульсации выходного напряжения выпрямителя с фильтром можно определить

$$k_{пф} = 1,57 \frac{B}{A}, \quad (10)$$

где $K_{по}=1,57$ – коэффициент пульсации идеального однополупериодного выпрямителя без фильтра.

Для выполнения пунктов 3 и 4 собрать схему двухполупериодного выпрямителя (рис. 3).

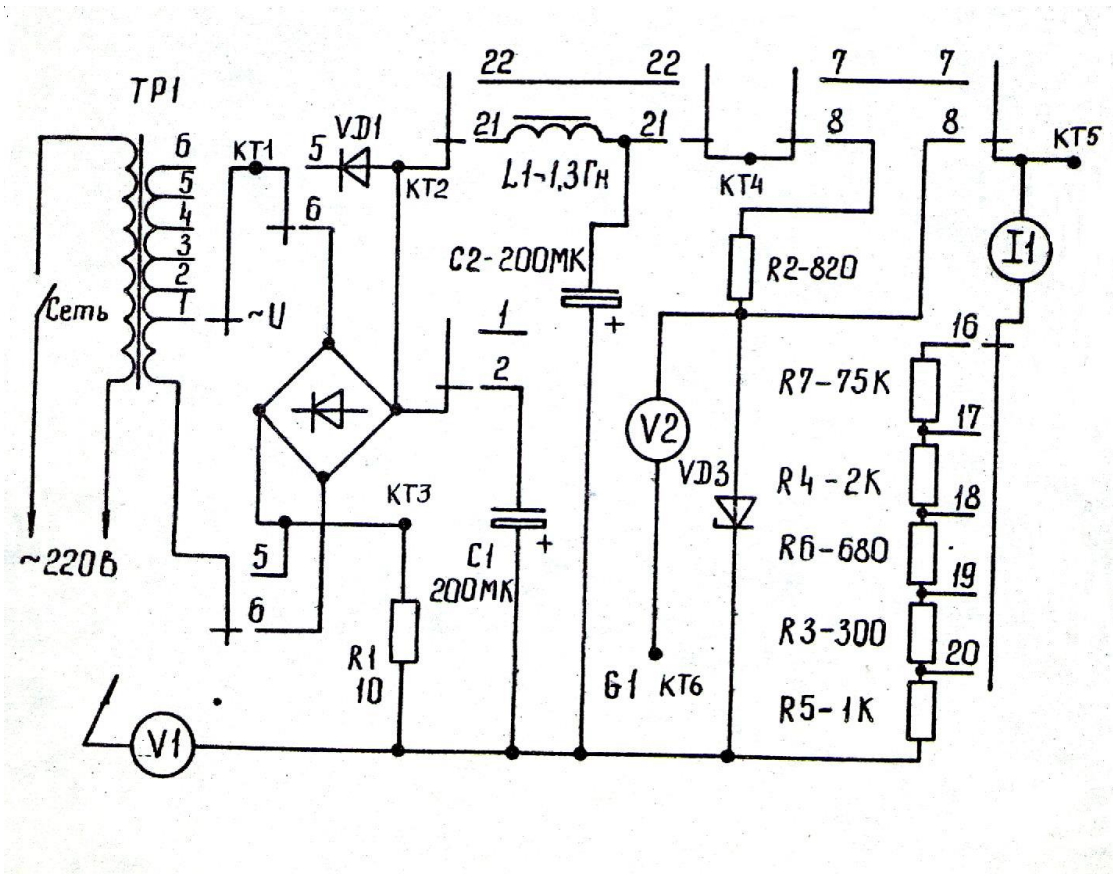


Рисунок 6. Принципиальная схема лабораторного стенда

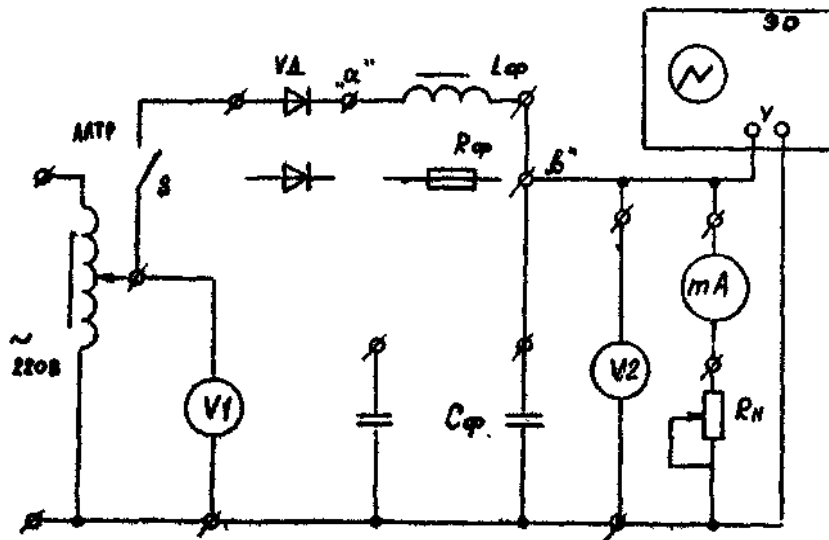


Рисунок 7. Схема однополупериодного выпрямителя

Исследование двухполупериодного выпрямителя

Исследование двухполупериодного выпрямителя и определение коэффициентов пульсаций $K_{пф}$, коэффициента сглаживания S проводится так же, как и однополупериодной схемы в соответствии с пунктами 2,а и 2,в.

При вычислении коэффициента пульсаций $K_{пф}$ следует иметь в виду, что величина коэффициента пульсаций двухполупериодного выпрямителя без фильтра $K_{пф0}=0,667$.

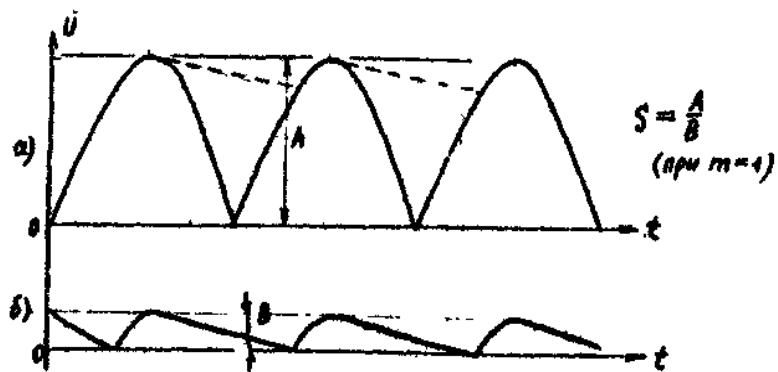


Рисунок 8. Осциллограммы U выхдвухполупериодного выпрямителя без фильтра, без нагрузки (а) и с фильтром (б)

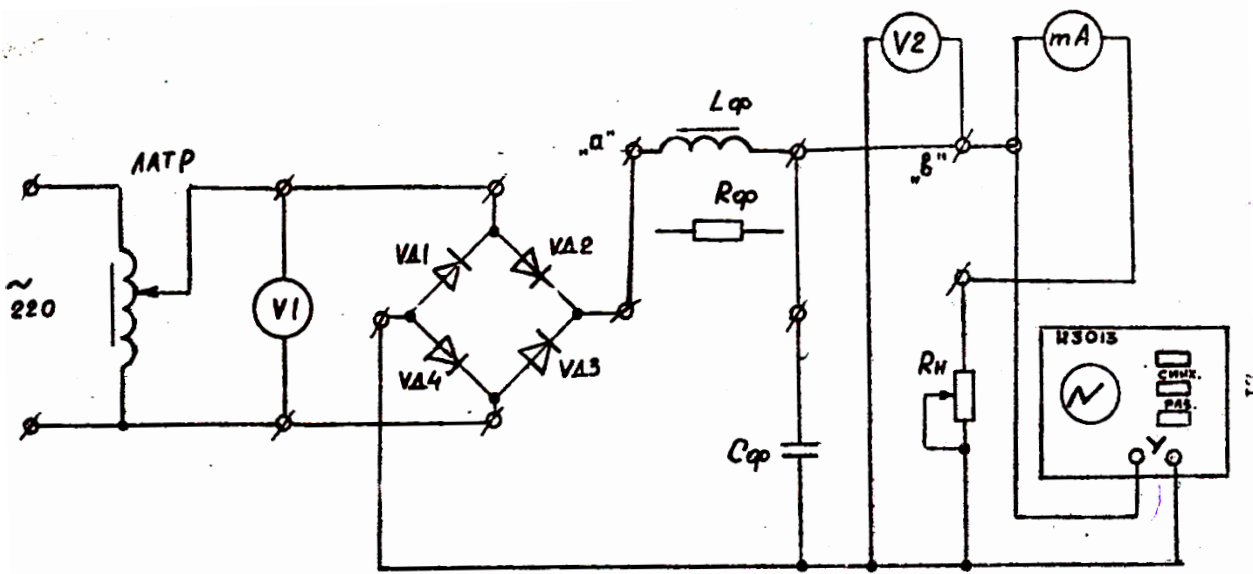


Рисунок 11. Схема двухполупериодного выпрямителя

Результат наблюдений и вычислений по пунктам 2 и 3 занести в табл.1.

Снятие внешней характеристики $U_{\text{вых}}=f(I_{\text{н}})$ произвести для двухполупериодной схемы выпрямителя без фильтра (1) и с фильтром (2), изменяя ток нагрузки от 0 ($R_{\text{н}} = \infty$) до $R_{\text{н}}=1$ кОм при помощи регулируемого резистора $R_{\text{н}}$ по показаниям вольтметра и амперметра.

Таблица 1

	$I_{\text{н}}, \text{A}$	A	U_0	$B, \text{мм}$	$k_{\text{пф}}$	S
Однополупериодная схема						
Двухполупериодная схема						

Данные наблюдений занести в табл.2.

Таблица 2

$R_n, \text{ Ом}$			
$I_n, \text{ А}$			
$U, \text{ В}$	1		
	2		

По данным табл. 2 (в прямоугольной системе координат) построить внешнюю (нагрузочную) характеристику выпрямителя с фильтром 1 и без фильтра 2.

Обратить внимание, что с увеличением тока нагрузки выпрямленное напряжение на выходе фильтра уменьшается. Это происходит вследствие увеличения падения напряжения на внутреннем сопротивлении диодов и обмотки трансформатора, а также на сопротивлении фильтра.

4. Контрольные вопросы

4.1. Объяснить принцип работы мостовой схемы выпрямителя.

4.2. Какие преимущества у мостовой схемы полупроводникового выпрямителя по сравнению с однополупериодным выпрямителем?

4.3. Что такое коэффициент пульсаций выходного напряжения выпрямителя и как он определяется?

4.4. Почему при увеличении тока в нагрузке увеличивается амплитуда пульсаций выходного напряжения выпрямителя с емкостным фильтром (увеличивается амплитуда пульсаций - В)?

4.5. Как можно объяснить, что с увеличением I_n полупроводникового выпрямителя уменьшается выходное напряжение?

Литература

1. Афонин, В.В. Электроника: учебное пособие / В.В. Афонин, К.А. Набатов, И.Н. Акулинин; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». - Тамбов : Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. - 81 с. [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277351>

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Цель работы: исследование работы системы электроснабжения и построение графиков электрических нагрузок на суточном интервале времени. Определение и анализ показателей, характеризующих график нагрузки.

1. Некоторые теоретические положения

Электрическая нагрузка характеризует потребление электроэнергии отдельными электроприемниками, группой электроустановок или предприятием в целом. Электрическая нагрузка может быть измерена приборами, показания которых снимаются через равные промежутки времени, или непрерывно самопишущими приборами. Электрические нагрузки представляются в виде активной P , реактивной Q или полной S мощностей или тока I . Кривые изменения P , Q , S , I во времени называются *графиками электрических нагрузок*. Графики для отдельных ЭП называются *индивидуальными* и обозначаются $p(t)$, $q(t)$, $s(t)$, $i(t)$, графики нагрузки для группы ЭП называются *групповыми* и обозначаются $P(t)$, $Q(t)$, $S(t)$, $I(t)$ [1, 2].

При проектировании СЭС применяются в основном групповые графики, рис.1.

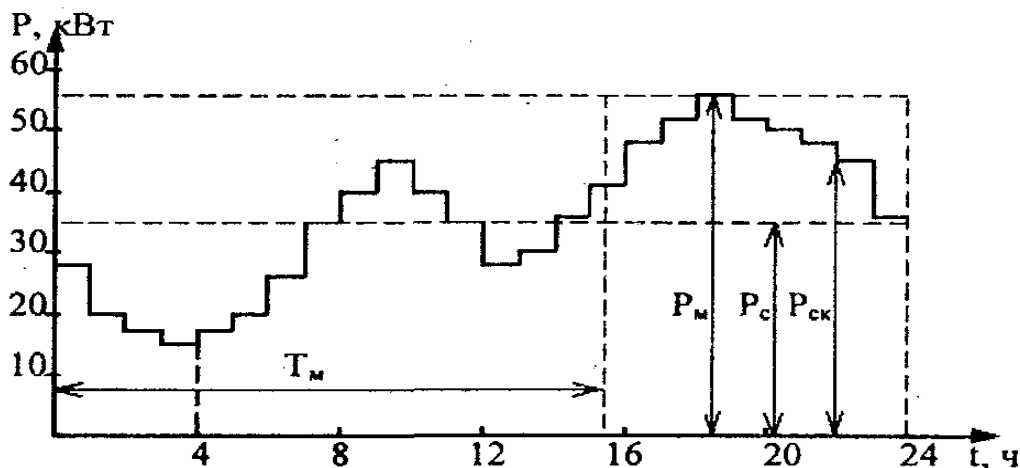


Рисунок 1. Суточный график активной нагрузки

2. Порядок выполнения работы

2.1. Лабораторная работа проводится на физической модели, представляющей собой систему электроснабжения промышленного предприятия [3].

2.2. Подготовиться к регистрации графиков активных и реактивных нагрузок, заготовить таблицу 1 для трансформатора Т4.

2.3. Подготовить установку для регистрации текущих параметров режима работы моделируемой СЭПП на суточном интервале времени; включить трансформатор Т2, обобщенную нагрузку S_l на шинах 10 кВ ГПП, синхронный электродвигатель; отключить трансформатор Т3, конденсаторные батареи БК1, БК2 и БК3, БК4, а также силовой фильтр ФКУ; установить РПН трансформатора Т2 и ПБВ трансформатора Т4 в нулевое положение.

2.4. Запустить установку нажатием кнопки «Пуск» и произвести регистрацию графиков активной и реактивной мощностей нагрузок трансформатора Т4 путем считывания и записи в таблицу 1 (графы 2, 4) показаний соответствующих счетчиков.

2.5. Рассчитать графики активной, реактивной и полной мощностей путем умножения разности показаний счетчиков на соответствующий масштабный коэффициент ($K_{сч}=35$). Вычислить средние значения и среднеквадратические отклонения активной мощности P по графику нагрузки.

$$P_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i; P_{ск} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P_{cp})^2}, \quad (1)$$

где n - число интервалов θ в суточном графике тока.

2.6. Определить ряд показателей, характеризующих график электрических нагрузок:

а) максимальное значение активной мощности P_m ;

б) коэффициент формы графика нагрузки K_ϕ

$$K_\phi = \frac{P_{ск}}{P_{cp}}, \quad (2)$$

в) коэффициент максимума K_m ;

$$K_m = \frac{P_m}{P_{cp}}, \quad (3)$$

г) коэффициент заполнения графика $K_{зг}$;

$$K_{зг} = \frac{P_{cp}}{P_m}, K_{зг} = \frac{1}{K_m}, \quad (4)$$

д) число часов использования суточного максимума нагрузки $T_{ма}$;

$$T_{ма} = \frac{W_a}{P_m}, \quad (5)$$

где $W_a = \sum_{i=1}^T P_i \cdot T$.

2.7. Оформить отчет по лабораторной работе, который должен содержать:

- цель работы;
- результаты регистрации и расчета графиков нагрузки и их параметров для трансформатора Т4 (таблица 1);
- графики нагрузок Т4 (активной, реактивной, полной мощности);
- определение показателей, характеризующих график электрических нагрузок;
- выводы по работе.

Таблица 1

Регистрация и расчет текущих параметров режима СЭПШ на суточном
интервале времени для трансформатора Т4

№ часа суток	Показания счетчиков				Графики нагрузок			
	активного		реактивного		активная мощность, <i>P, кВт</i>	реактивная мощность, <i>Q, квар</i>	полная мощность, <i>S, кВ·А</i>	<i>tqφ</i>
	пока- зания	раз- ность	пока- зания	раз- ность				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
0								
Среднее значение активной мощности								
Среднеквадратическое отклонение активной мощности								

3. Контрольные вопросы

- 3.1. Каковы причины изменения нагрузки силового трансформатора Т4 в течение суток?
- 3.2. Что представляет собой график электрических нагрузок?
- 3.3. Как определяются средние значения мощностей?
- 3.4. Как определяется среднеквадратичное отклонение мощности? Что оно характеризует?
- 3.5. Какими коэффициентами можно охарактеризовать график нагрузок?

Список литературы

1. Щербаков Е. Ф. Электроснабжение и электропотребление в строительстве [Электронный ресурс] : учебное пособие / Е.Ф. Щербаков, Д.С. Александров, А.Л. Дубов — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2012. — 512 с. — Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=9469.
2. Электротехника и электроника: Учебное пособие для вузов / Ред. В.В. Кононенко. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 784с.
3. Балашов О.П. Электроснабжение: Методические указания к лабораторным работам для студентов направления «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2015. - 48 с.

Гетманов Виктор Тимофеевич
Балашов Олег Петрович
Мацанке Иван Алексеевич

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Методические указания к лабораторным работам
для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров
всех форм обучения

Редактор Е.Ф. Изотова

Подписано к печати 30.12.15. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 3,5. Тираж 100 экз. Зак. 151508. Рег. № 138.

Отпечатано в ИТО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.