



Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Электротехника»
для студентов специальности 7100301 «Судовождение»
дневной и заочной форм обучения

Севастополь
2006



УДК 621.3

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехника» / Сост. В.В. Костюков. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. – 61 с.

Методические указания предназначены для подготовки и проведения лабораторных работ по дисциплине «Электротехника» студентов специальности «Судовождение».

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры СПЭМС (протокол № 5 от 18 января 2006 г.).

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент:

Маригодов В.К., доктор технических наук, профессор

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1. Линейная электрическая цепь постоянного тока с одним источником энергии.....	5
Лабораторная работа № 2. Определение параметров схемы замещения и исследования режимов работы реального источника напряжения.....	10
Лабораторная работа № 3. Схемы замещения реальных пассивных элементов электрической цепи.....	16
Лабораторная работа № 4. Последовательное соединение сопротивления, индуктивности и емкости при синусоидальном токе.....	22
Лабораторная работа № 5. Параллельное соединение сопротивления, индуктивности и емкости при синусоидальном токе.....	26
Лабораторная работа № 6. Разветвленная цепь синусоидального тока.....	31
Лабораторная работа № 7. Мощности в цепях синусоидального тока.....	35
Лабораторная работа № 8. Трехфазная цепь при соединении нагрузки звездой.....	40
Лабораторная работа № 9. Трехфазная цепь при соединении нагрузки треугольником.....	46
Лабораторная работа № 10. Исследование режимов работы однофазного трансформатора.....	50
Лабораторная работа № 11. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.....	55
Библиографический список.....	61



ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для подготовки, выполнения и оформления студентами специальности «Судовождение» дневной и заочной форм обучения лабораторных работ по дисциплине «Электротехника».

Выполнение лабораторных работ производится на универсальных лабораторных стендах с помощью соединительных проводов в соответствии со схемами, приведенными в методических указаниях. Перед выполнением эксперимента студенты должны изучить теоретическую часть соответствующей лабораторной работы.

В методических указаниях используются общепринятые обозначения электротехнических величин:

u, U, U_m – соответственно мгновенное, действующее и амплитудное значение напряжений;

i, I, I_m – соответственно мгновенное, действующее и амплитудное значение токов;

R, X, Z – соответственно активное, реактивное и полное сопротивления;

G, b, y – соответственно активная, реактивная и полная проводимость;

p, P, Q, S – соответственно мгновенная, активная, реактивная и полная мощности;

f, ω – соответственно циклическая и угловая частоты.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальная проверка соотношений между напряжениями и токами в линейной цепи постоянного тока.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В линейных электрических цепях простой структуры с одним источником энергии расчет токов и напряжений можно осуществить методом эквивалентных преобразований.

Эквивалентным называют такое преобразование части электрической схемы, когда в неизменных элементах токи и напряжения остаются прежними.

При таком расчете удобно пользоваться понятием двухполюсника. Двухполюсником называется любая сколь угодно сложная цепь, которая рассматривается относительно пары зажимов (полюсов) (рисунок 1).

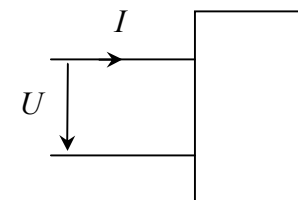


Рисунок 1 - Двухполюсник

Связь между током и напряжением на зажимах двухполюсника выражается законом Ома:

$$R = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

В линейных электрических цепях сопротивление R отражает только структуру самого двухполюсника и не зависит от тока или напряжения.

Идея метода эквивалентных преобразований заключается в следующем. Изначальная схема путем поэтапной замены нескольких сопротивлений одним «сворачивается» относительно зажимов источника энергии.

При таком сворачивании используют замену последовательно или параллельно соединенных сопротивлений одним – рисунок 2.



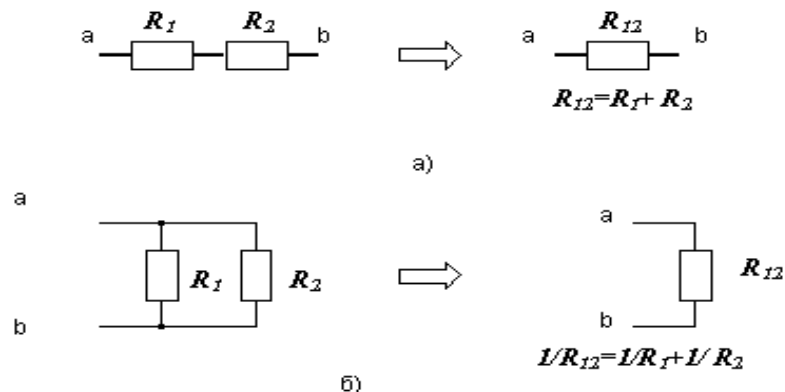


Рисунок 2 – Эквивалентное преобразование последовательного а) и параллельного б) соединения сопротивлений электрической цепи

Когда вся схема относительно зажимов источника будет заменена одним сопротивлением, сопротивление которого известно, можно определить неизвестный ток или напряжение источника энергии.

Далее схема поэтапно разворачивается. Переход к следующему этапу необходимо производить, когда все токи и напряжения предшествующего этапа найдены. После такого перехода на новом этапе оценивается, какие токи и напряжения уже известны, и с их помощью находятся неизвестные.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов используются аналоговые амперметры, а напряжений – аналоговый вольтметр.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

- 4.1. Собрать цепь согласно рисунку 3.
- 4.2. Подать напряжение $U_{\text{вх}}$ от рекомендуемого источника постоянного напряжения (от 100 до 200 В).
- 4.3. Включить ключ K_1 , показания амперметра и вольтметра записать в таблицу 1.
- 4.4. Отключить ключ K_1 .
- 4.5. Пункты 4.3 и 4.4 повторить для остальных ключей.
- 4.6. По закону Ома (1) рассчитать сопротивления резисторов $R_1 - R_6$, результаты расчетов занести в таблицу 1.
- 4.7. Собрать цепь согласно рисунку 4.
- 4.8. Подать напряжение $U_{\text{вх}}$ от регулируемого источника постоянного напряжения так, чтобы ток любого амперметра не превышал 0.3 А.



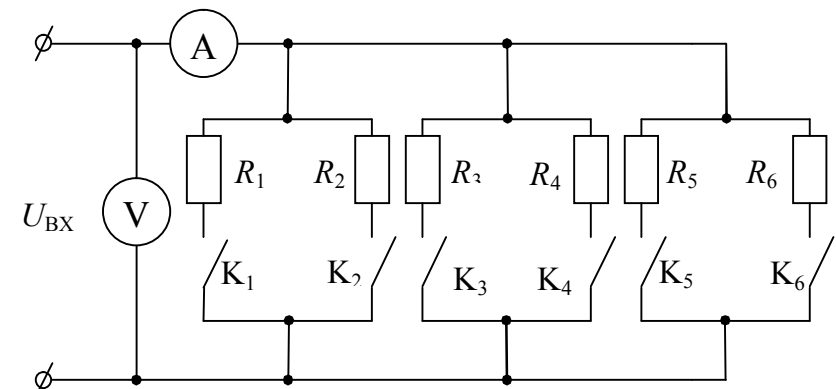


Рисунок 3 – Схема эксперимента

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

Результат Параметр	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	Примечание
U , В							Измерено
I , А							
R , Ом							Вычислено

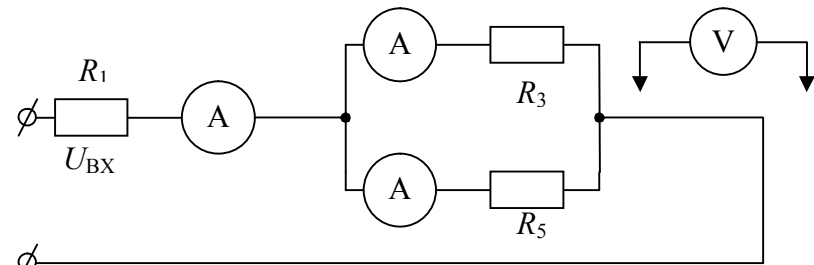


Рисунок 4 – Схема эксперимента

4.9. Напряжения на резисторах измерить вольтметром в дежурном режиме. т.е. одним вольтметром измеряются напряжения на различных элементах. В дежурном режиме для вольтметра можно использовать провода, например, только красного цвета, в других частях схемы красные провода не использовать.

4.10. Показания амперметров и вольтметра занести в строку «Эксперимент» таблицы 2.

4.11. Собрать цепь согласно рисунку 5.



4.12. Подать напряжение $U_{\text{вх}}$ от регулируемого источника постоянного напряжения так, чтобы ток любого амперметра не превышал бы 0.3 А.

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные данные

Способ получения результата	Значения величин						
	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_3, \text{А}$	$I_5, \text{А}$
Эксперимент							
Расчет							

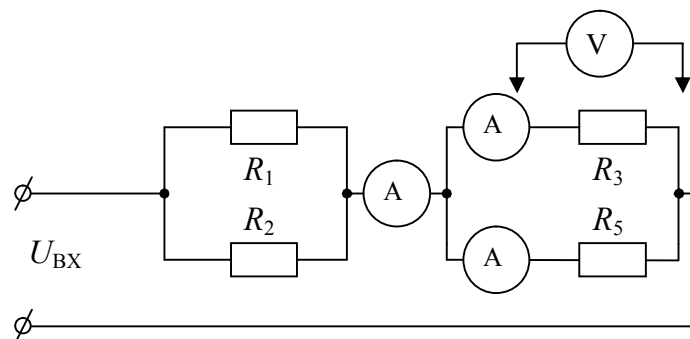


Рисунок 5 – Схема эксперимента

4.13. Напряжения на резисторах измерить вольтметром в дежурном режиме.

4.14. Показания амперметров и вольтметра занести в строку «Эксперимент» таблицы 3.

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные данные

Способ получения результата	Значения величин							
	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$U_5, \text{В}$	$I_{12}, \text{А}$	$I_3, \text{А}$	$I_5, \text{А}$
Эксперимент								
Расчет								

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1. Рассчитать токи и напряжения на элементах цепей, изображенных на рисунках 4 и 5 методом эквивалентных преобразований. Значение напряжения $U_{\text{вх}}$ взять из результатов экспериментов. Результаты расчетов занести в таблицы 2 и 3.

5.2. Сравнить экспериментальные и расчетные данные обеих таблиц и обосновать расхождения.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Название и цель работы.
- 6.2. Схемы экспериментов с указанием типов приборов.
- 6.3. Таблицы с экспериментальными и расчетными данными.
- 6.4. Последовательность расчетных формул и расчет токов и напряжений для схем на рисунках 4 и 5.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Что такое двухполюсник, и какова связь между током и напряжением на его зажимах?
- 7.2. В чем заключается метод эквивалентных преобразований?
- 7.3. Какие эквивалентные преобразования в линейных электрических цепях Вы знаете?
- 7.4. По полученным экспериментальным данным проиллюстрируйте выполнение законов Кирхгофа.
- 7.5. Как изменятся токи и напряжения в цепях, если амперметры удалить, а появившиеся разрывы - замкнуть?
- 7.6. Как изменятся токи и напряжения в цепях, если параллельно всем сопротивлениям подключить вольтметры?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение параметров схемы замещения и исследование режимов работы реального источника напряжения.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Источником электрической энергии называется техническое устройство, в котором неэлектрические виды энергии (механическая, химическая, световая и т. д.) преобразовываются в электрическую энергию.

С точки зрения потребления электрической энергии наиболее полной характеристикой источника является внешняя характеристика, которая связывает ток и напряжение источника.

Различают две разновидности источников электрической энергии: источник напряжения и источник тока. В свою очередь, в каждой из этих разновидностей выделяют идеальные и реальные источники.

Идеальным источником напряжения (источником ЭДС) называется источник, напряжение на зажимах которого не зависит от тока источника (рисунок 1) и равно ЭДС источника E . Идеальный источник напряжения является удобной идеализацией, которая удовлетворяет опыту только в некоторых пределах.

Например, в режиме короткого замыкания мощность идеального источника напряжения была бы равна бесконечности, что невозможно.

Линеаризованная внешняя характеристика реального источника напряжения имеет вид, представленный на рисунке 2.

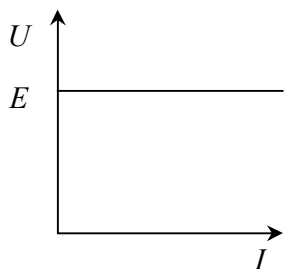


Рисунок 1- Внешняя характеристика идеального источника напряжения

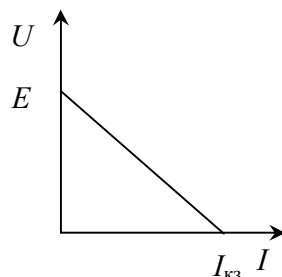


Рисунок 2- Внешняя характеристика реального источника напряжения

Точка пересечения внешней характеристики с осью напряжения соответствует режиму холостого хода. В этом режиме зажимы источника разомкнуты, и напряжение на них равно ЭДС источника E , а ток равен нулю.

Точка пересечения внешней характеристики с осью тока соответствует режиму короткого замыкания. В этом режиме зажимы источника замкнуты, и напряжение на них равно нулю. Ток $I_{KЗ}$ – это максимально возможный ток источника.

Зависимость, представленная на рисунке 2, выражается формулой

$$U = E - R_{вн} I. \quad (1)$$

Коэффициент $R_{вн}$, стоящий перед током в (1), имеет размерность сопротивления и называется внутренним сопротивлением источника.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа, формуле (1) соответствует эквивалентная схема замещения реального источника напряжения (рисунок 3).

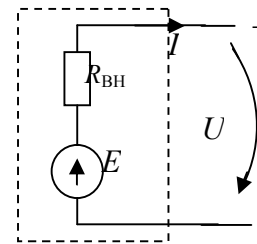


Рисунок 3 – Эквивалентная схема замещения реального источника напряжения

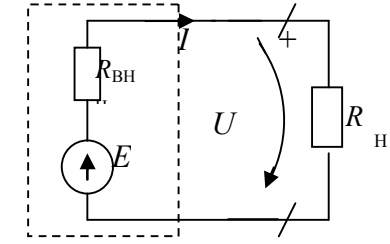


Рисунок 4 – Эквивалентная схема замещения реального источника напряжения с нагрузкой

Экспериментально параметры реального источника напряжения проще всего определить из опытов холостого хода ($E = U_{ХХ}$) и короткого замыкания. При коротком замыкании напряжение на зажимах источника равно нулю и из формулы (1) получают $R_{вн}$:

$$R_{вн} = \frac{E}{I_{KЗ}}. \quad (2)$$

При подключении к источнику напряжения сопротивления нагрузки $R_н$ (рисунок 4) ток источника может быть рассчитан по формуле

$$I = \frac{E}{R_{вн} + R_н}. \quad (3)$$

Важное значение имеет величина мощности, потребляемой нагрузкой $P_н$, которая определяется по формуле



$$P_{\text{н}} = UI. \quad (4)$$

Если в (4) вместо U подставить правую часть формулы (1) и раскрыть скобки, получится следующее выражение

$$P_{\text{н}} = EI - R_{\text{вн}} I^2, \quad (5)$$

которое связывает мощность нагрузки с параметрами реального источника ЭДС. График зависимости мощности нагрузки от тока представляет собой перевернутую параболу (рисунок 5).

Из рисунка 5 видно, что мощность в нагрузке при некотором значении тока $I_{P_{\text{max}}}$ достигает максимума. Режим работы, при котором в нагрузке выделяется максимальная мощность, называется согласованным.

Исследовав выражение (5) на максимум ($dP_{\text{н}}/dI=0$), можно получить значение тока $I_{P_{\text{max}}}$:

$$I_{P_{\text{max}}} = \frac{E}{2R_{\text{вн}}} = \frac{I_{\text{кз}}}{2}, \quad (6)$$

где $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания источника, А.

При согласованном режиме справедливо соотношение $R_{\text{вн}} + R_{\text{н}} = 2R_{\text{вн}}$. Следовательно, согласованный режим устанавливается в случае, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника

$$R_{\text{вн}} = R_{\text{н}}. \quad (7)$$

Подставив правую часть (6) в формулу (5), получим максимальную мощность в нагрузке, которую может обеспечить данный источник

$$P_{\text{нmax}} = \frac{E^2}{4R_{\text{вн}}}. \quad (8)$$

В мощных электрических цепях немаловажное значение имеет коэффициент полезного действия реального источника:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{Е}}} = \frac{EI - R_{\text{вн}} I^2}{EI} = 1 - \frac{R_{\text{вн}} I}{E} = 1 - \frac{I}{I_{\text{кз}}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{Е}}$ – мощность источника, Вт.

График зависимости КПД от тока источника представлен на рисунке 6.

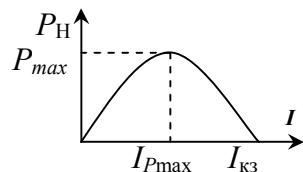


Рисунок 5 – График зависимости мощности нагрузки источника ЭДС от тока

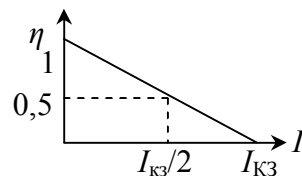


Рисунок 6 – График зависимости КПД источника ЭДС от тока

Из рисунка видно, что при согласованном режиме коэффициент полезного действия равен 0,5.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов используется аналоговый амперметр. Напряжение измеряется аналоговым вольтметром.

В качестве идеального источника ЭДС E взят регулируемый источник постоянного напряжения. В качестве внутреннего сопротивления $R_{вн}$ реального источника напряжения взяты параллельно соединенные резисторы R_1 и R_2 . Нагрузкой источника R_H служат параллельно соединенные резисторы $R_1 - R_6$, расположенные в верхней части наборного поля.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Собрать цепь в соответствии с рисунком 7.

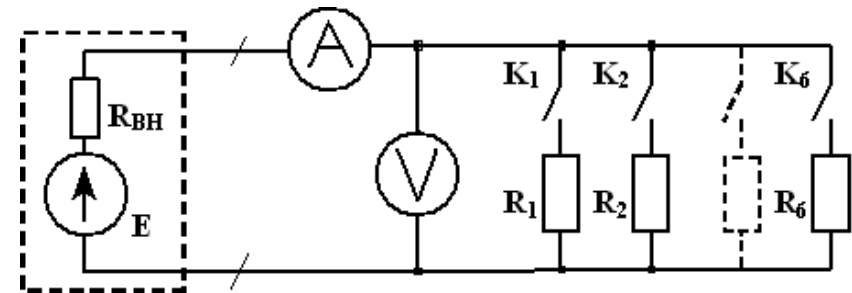


Рисунок 7 – Схема эксперимента

4.2. Подготовить цепь к проведению опыта. Для этого все тумблеры $K_1 - K_6$ установить в верхнее положение (включено).

Регулятором постоянного напряжения постепенно увеличивать напряжение источника. Увеличение напряжения источника прекратить при достижении амперметром тока 1 А.

4.3. Исследование источника в различных режимах. Отключая последовательно по одному тумблеру, довести количество включенных тумблеров до нуля (опыт холостого хода). Измеряя ток и напряжение во всех случаях, результаты эксперимента записать в таблицу 1.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1. Из опыта холостого хода определить величину ЭДС реального источника напряжения



$$E=U_{xx}. \quad (10)$$

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

Количество включенных тумблеров	Измерено		Вычислено		
	U , В	I , А	$P_E=EI$, Вт	$P_H=UI$, Вт	$\eta=P_H/P_E$
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0					

5.2. Опыт короткого замыкания, из которого можно определить ток короткого замыкания I_{K3} , крайне нежелателен, так как связан с перегрузками по току. Поэтому для определения тока короткого замыкания необходимо построить внешнюю характеристику по экспериментальным данным (рисунок 2). На оси ординат отложить величину ЭДС, отметить остальные экспериментальные точки. Через точку ЭДС и экспериментальные точки провести прямую. Точка пересечения прямой с осью тока дает величину I_{K3} .

5.3. Из формулы (2) определить внутреннее сопротивление реального источника напряжения.

5.4. На построенной характеристике разбить интервал по оси абсцисс от нуля до тока I_{K3} на десять равных участков:

$$\Delta I = I_{K3}/10. \quad (11)$$

5.5. Для значений токов $I_k = k\Delta I$ ($k=1 \div 10$) по формуле (5) рассчитать значения мощности в нагрузке, результаты расчета занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Мощности в нагрузке

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_k = k\Delta I$										
$P_H = EI_k - R_{BH} I_k^2$										

5.6. По найденным E , R_{BH} и данным таблицы 2 построить теоретические графики зависимостей $U=f(I)$, $P_E=f(I)$, $P_H=f(I)$, $\eta=f(I)$.

5.7. На теоретические графики нанести экспериментальные точки.

5.8. По формуле (8) рассчитать максимально возможную мощность в нагрузке реального источника напряжения.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Название и цель работы.
- 6.2. Схемы эксперимента с указанием типов приборов.
- 6.3. Таблицы 1, 2 с экспериментальными и расчетными данными.
- 6.4. Теоретические графики $U=f(I)$, $P_E=f(I)$, $P_H=f(I)$, $\eta=f(I)$ с нанесенными экспериментальными значениями.
- 6.5. Выводы.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Как классифицируются источники электрической энергии?
- 7.2. Как изменится внешняя характеристика реального источника напряжения, если при неизменной ЭДС его внутреннее сопротивление увеличится в два раза?
- 7.3. Как изменится график мощности в нагрузке $P_H=f(I)$, если при неизменном внутреннем сопротивлении величина ЭДС уменьшится в два раза?
- 7.4. Как изменится график КПД $\eta=f(I)$, если внутреннее сопротивление увеличится в два раза?
- 7.5. Каково значение КПД источника, если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника?
- 7.6. Для исследуемого Вами источника определите КПД в режиме, когда сопротивление нагрузки в два раза больше внутреннего сопротивления источника.



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ РЕАЛЬНЫХ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение параметров схем замещения реальных пассивных элементов электрической цепи.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Если не рассматривать источники электрической энергии, то в пассивных элементах электрической цепи (резисторы, катушки и конденсаторы) происходит два процесса – превращение электрической энергии в другие виды энергии (например, в тепловую) и накопление электрической энергии. Накопление электрической энергии в пассивных элементах осуществляется в форме магнитного и электрического полей. Причем эти процессы в реальных элементах происходят одновременно. Однако бывают ситуации, когда некоторый энергетический процесс преобладает над остальными. Элемент, в котором учитывается только один энергетический процесс, называется идеальным. К идеальным элементам электрической цепи относят:

- сопротивление, в котором учитывается только превращение электрической энергии в другие виды энергии;
- индуктивность, в которой учитывается только накопление элементом энергии в форме магнитного поля;
- емкость, в которой учитывается только накопление элементом энергии в форме электрического поля.

Замена реального элемента идеальными называется составлением схемы замещения реального элемента. Для определения параметров идеальных элементов существует несколько способов (метод амперметра – вольтметра – ваттметра, метод трех вольтметров и т. д.). Наличие в схеме замещения того или иного идеального элемента определяется не только интенсивностью энергетического процесса, но и точностью измерительных приборов.

В данной лабораторной работе необходимо построить схемы замещения трех реальных элементов: резистора, катушки и конденсатора. Для определения параметров идеальных элементов схемы замещения используем метод переменного и постоянного тока. Каждый из реальных элементов вначале подключается к источнику постоянного напряжения, и измеряются ток и напряжение каждого элемента. Найдя отношение постоянного напряжения к постоянному току, найдем R – активное сопротивление, отражающее процесс превращения электрической энергии в другие виды энергии:

$$r = \frac{U}{I}. \quad (1)$$

Постоянный ток конденсатора может оказаться равным нулю. Это означает, что амперметр оказался недостаточно точным для измерения малого тока утечки в изоляторе конденсатора. Следовательно, в схеме замещения конденсатора будет отсутствовать такой идеальный элемент, как сопротивление.

Затем каждый из реальных элементов подключают к источнику переменного (синусоидального) напряжения, и измеряются ток и напряжение каждого из элемента. Найдя отношение переменного напряжения к переменному току, определяется Z – полное сопротивление, отражающее все энергетические процессы:

$$Z = \frac{U}{I} . \quad (2)$$

Может оказаться, что для резистора активное сопротивление будет равно полному сопротивлению. Следовательно, точность измерительных приборов не позволяет обнаружить процессы, связанные с накоплением энергии, а значит, в схеме замещения резистора будут отсутствовать индуктивность и емкость.

Если же активное сопротивление оказалось меньше полного, значит в реальном элементе процессы превращения и накопления энергии соизмеримы и, следовательно, в схеме замещения будут присутствовать как сопротивление, так и индуктивность или емкость (идеальный реактивный элемент).

Сопротивление и идеальный реактивный элемент можно соединить двумя способами – параллельно и последовательно. Поэтому существует две схемы замещения – параллельная и последовательная.

Для катушки физически более наглядной представляется последовательная схема замещения, так как на постоянном токе индуктивность можно заменить идеальным проводником и, следовательно, параллельная схема замещения не учитывала бы в этом случае сопротивление. Поэтому в данной работе необходимо определить параметры именно последовательной схемы замещения катушки (рисунок 1).



Рисунок 1 – Последовательная схема замещения катушки

Зная активное и полное сопротивления, можно определить индуктивное сопротивление

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} . \quad (3)$$



По известному индуктивному сопротивлению находится индуктивность катушки

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f}, \quad (4)$$

где $f=50$ Гц – циклическая частота тока в сети.

Для конденсатора физически более наглядной является параллельная схема замещения, т. к. на постоянном токе емкость – это разрыв, и тогда в последовательной схеме наличие тока утечки невозможно объяснить. Поэтому в данной работе необходимо определить параметры именно параллельной схемы замещения конденсатора (рисунок 2).

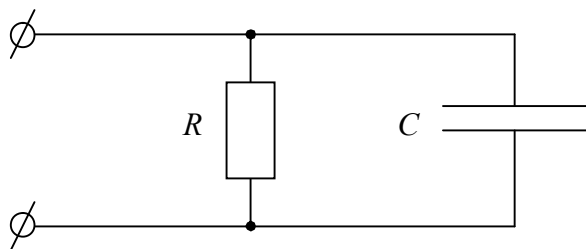


Рисунок 2 – Параллельная схема замещения конденсатора

Зная активное и полное сопротивления, можно определить емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{rz}{\sqrt{-z^2 + r^2}}. \quad (7)$$

По известному емкостному сопротивлению находится емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{X_C \omega}. \quad (8)$$

Зная ток, который одинаков во всех элементах последовательной схемы замещения катушки, можно определить напряжения на идеальных элементах:

$$U_r = rI, \quad (9)$$

$$U_L = X_L I. \quad (10)$$

Зная напряжение, которое одинаково на всех элементах параллельной схемы замещения конденсатора, можно определить токи каждого идеального элемента:

$$I_r = \frac{U}{r}, \quad (11)$$

$$I_C = \frac{U}{X_C}. \quad (12)$$

Построение векторных диаграмм для синусоидальных напряжений и токов удобно начинать с вектора, который одинаков на обоих элементах схемы замещения. Длины векторов определяются из формул (9)–(12).

При определении направления векторов необходимо учитывать, что на емкости вектор тока опережает вектор напряжения на 90° , а на индуктивности – наоборот, отстает на те же 90° .

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов используются аналоговый амперметр, а напряжения – аналоговый вольтметр.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Исследование реальных элементов (резистора, катушки и конденсатора) на постоянном токе.

4.1.1. Собрать электрическую цепь, согласно рисунку 3, и подключить ее к источнику постоянного регулируемого напряжения.

4.1.2. Поочередно подключая в цепь резистор R , катушки L_{0-9} , конденсатор C_7 и постепенно увеличивая подаваемое напряжение, необходимо следить, чтобы ток не превышал 1 А.

Внимание! При эксперименте с катушкой необходимо особенно медленно увеличивать напряжение, т.к. на постоянном токе катушка имеет очень маленькое сопротивление.

Для каждого элемента значения токов и напряжений занести в таблицу 1.

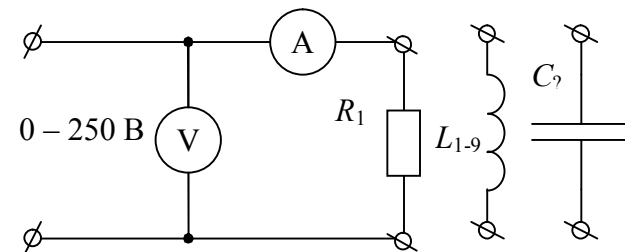


Рисунок 3 – Схема эксперимента для исследования элементов на постоянном токе



Таблица 1 – Результаты эксперимента на постоянном токе

Элемент Параметр	Резистор	Катушка	Конденсатор
U , В			
I , А			
R , Ом			

4.2. Исследование тех же реальных элементов на переменном (синусоидальном) токе.

4.2.1. Собрать электрическую цепь, согласно рисунку 4, и подключить ее к источнику регулируемого синусоидального напряжения.

4.2.2. Поочередно подключая в цепь резистор R_1 , катушки L_{0-9} , конденсатор $C_?$ и постепенно увеличивая подаваемое напряжение, необходимо следить, чтобы ток не превышал 1 А.

Для каждого элемента значения токов и напряжений занести в таблицу 2.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1. По результатам экспериментов вычислить R – активное (1) и Z – полное (2) сопротивления реальных элементов. Результаты вычислений занести в таблицы 1, 2 и 3.

5.2. Выбрать схемы замещения реальных элементов и рассчитать параметры элементов выбранных схем, результаты расчета занести в таблицу 3.

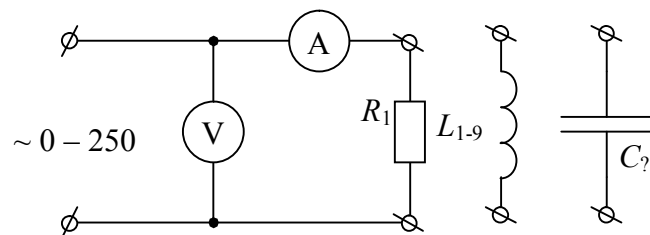


Рисунок 4 – Схема эксперимента для исследования элементов на переменном токе

Таблица 2 – Результаты эксперимента на переменном токе

Элемент Параметр	Резистор	Катушка	Конденсатор
U , В			
I , А			
Z , Ом			

Параметр Элемент	Z	X	R	L	C
Резистор					
Катушка					
Конденсатор					

5.3. По известному входному синусоидальному напряжению и параметрам элементов схем замещения рассчитать токи и напряжения на всех элементах схем замещения.

5.4. Для каждой из схем замещения построить векторные диаграммы напряжений и токов, найденных в п. 5.3.

6. СОДЕЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Название и цель работы.
- 6.2. Схемы экспериментов с указанием токов измерительных приборов.
- 6.3. Схемы замещения реальных элементов.
- 6.4. Данные экспериментальных исследований.
- 6.5. Параметры элементов схем замещения.
- 6.6. Расчеты токов и напряжений идеальных элементов.
- 6.7. Векторные диаграммы найденных токов и напряжений идеальных элементов.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. В чем отличие понятий «катушка индуктивности» и «индуктивность»?
- 7.2. В чем отличие понятий «конденсатор» и «емкость»?
- 7.3. Приведите схемы замещения реальных катушки и конденсатора.
- 7.4. Какие ограничения накладывают измерительные приборы на схемы замещения?
- 7.5. Для катушки назовите физические явления, которые соответствуют идеальным элементам ее схемы замещения.
- 7.6. Для конденсатора назовите физические явления, которые соответствуют идеальным элементам его схемы замещения.

Таблица 3 – Результаты обработки экспериментов

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ ТОКЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование режимов работы последовательно соединенных сопротивлений, индуктивности и емкости.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При последовательном соединении сопротивления, индуктивности (активным сопротивлением катушки пренебрегаем) и емкости комплексное выходное сопротивление имеет вид:

$$z = z_r + z_L + z_C = r + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = z e^{j\varphi}, \quad (1)$$

где $z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$ – полное сопротивление;

$\varphi = \arctg \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \right)$ – сдвиг фаз между напряжением и током.

Комплексное действующее значение тока в такой цепи определяется по формуле

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{z} = \frac{U e^{j\psi_u}}{z e^{j\varphi}} = \frac{U}{z} e^{j(\psi_u - \varphi)} = I e^{j\psi_i}. \quad (2)$$

Напряжение на сопротивлении определяется по формуле

$$\dot{U}_r = z_r \dot{I} = r I e^{j\psi_i}. \quad (3)$$

Напряжение на индуктивности находится из формулы

$$\dot{U}_L = z_L \dot{I} = X_L e^{j90^\circ} \cdot I e^{j\psi_i} = \omega L I e^{j(\psi_i + 90^\circ)}. \quad (4)$$

Напряжение на емкости вычисляется по формуле

$$\dot{U}_C = z_C \dot{I} = X_C e^{-j90^\circ} \cdot I e^{j\psi_i} = \frac{I}{\omega C} e^{j(\psi_i - 90^\circ)}. \quad (5)$$

В пассивных линейных двухполюсниках, включающих в себя индуктивности и емкости возможен специфический режим, при котором мощности ин-

дуктивности и емкости компенсируют друг друга. Такой режим называется резонансом. При резонансе двухполюсник ведет себя как чисто активное сопротивление. Поэтому общее условие резонансного режима можно сформулировать так: мнимая часть комплексного входного сопротивления равна нулю. Математически это запишется в виде:

$$\operatorname{Im}(Z)=0. \quad (6)$$

Если двухполюсник включает последовательно соединенные сопротивление, индуктивность и емкость, условие резонанса (6) имеет вид:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0. \quad (7)$$

Из формул (4) и (5) следует, что при резонансе действующие значения напряжений на индуктивности и емкости одинаковы. Поэтому резонанс в этом случае называют резонансом напряжений.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов в работе используется аналоговый амперметр типа А301. Для измерения напряжения применяется цифровой вольтметр А301. В качестве источника используется регулируемый источник переменного напряжения. В качестве емкости - батарея переменных конденсаторов.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Исследование при резонансном режиме

4.1.1. Собрать электрическую цепь, схема которой приведена на рисунке

2.

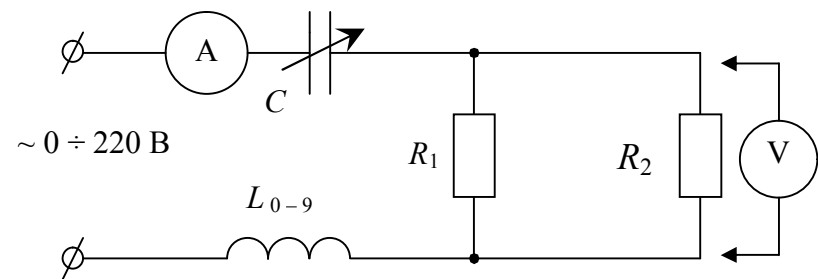


Рисунок 2 – Схема эксперимента

4.1.2. Из данных, приведенных на стенде, вычислить величину индуктивности катушки L_{0-9} , активное сопротивление катушки не учитывать.

4.1.3. Из условия резонанса (7) по формуле



$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L_{0-9}} \quad (9)$$

вычислить значение емкости C_p , при которой наступает резонанс.

Установить на батарее конденсаторов C_p .

4.1.4. Медленно источником переменного регулируемого напряжения увеличивать входное напряжение, контролируя при этом изменение тока. Увеличение входного напряжения прекратить при достижении тока 1 А.

4.1.5. Записать величину достигнутого входного напряжения U и в дальнейшем поддерживать его неизменным.

4.1.6. Вольтметром в дежурном режиме измерить напряжения на элементах схемы. Результаты занести в строку № 4 таблицы 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента

№ режима	Режим	C , мкФ	I , А	U_R , В	U_L , В	U_C , В	Z , Ом
1	$C=0$						
2	$C=C_p/3$						
3	$C=2C_p/3$						
4	$C=C_p$						
5	$C=2C_p$						
6	$C=3C_p$						

4.2. Исследование при нерезонансных режимах

4.2.1. Поочередно устанавливать на батарее конденсаторов величины емкостей, указанных в столбце «Режим» таблицы 1.

4.2.2. При каждом режиме измерять ток и напряжение и данные занести в таблицу 1.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1. По известному входному напряжению U рассчитать полное сопротивление Z двухполюсника для всех режимов

$$Z = \frac{U}{I}, \quad (9)$$

и результаты занести в таблицу 1.

5.2. По данным таблицы 1 построить графики зависимости C , I , U_R , U_L , U_C , Z от емкости.

5.3. Для строк 2, 4, 6 таблицы 1 построить векторные диаграммы токов и напряжений.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Название и цель работы.
- 6.2. Схема эксперимента с указанием типов измерительных приборов.
- 6.3. Таблица экспериментальных и расчетных данных.
- 6.4. Графики зависимостей $I(C)$, $U_R(C)$, $U_L(C)$, $U_C(C)$, $Z(C)$.
- 6.5. Векторные диаграммы для строк 2, 4, 6 таблицы 1.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Кроме изменения емкости, какие еще возможны способы получения резонанса?
- 7.2. Чему равно полное сопротивление при резонансе последовательно соединенных сопротивления, индуктивности и емкости?
- 7.3. Почему напряжение на реактивном элементе может превосходить входное напряжение?
- 7.4. Используя векторные диаграммы, найти напряжение на последовательно соединенных:
 - а) индуктивности и емкости;
 - б) индуктивности и сопротивлении;
 - в) емкости и сопротивлении.
- 7.5. Как выглядят графики зависимостей $r(C)$ и $x_L(C)$?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ ТОКЕ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование режимов работы параллельно соединенных сопротивлений, индуктивности и емкости.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью. По известным параметрам элементов можно определить комплексные проводимости этих элементов:

– для сопротивления

$$Y_r = \frac{1}{z_r} = \frac{1}{r} = g, \quad (1)$$

– для индуктивности

$$Y_L = \frac{1}{z_L} = \frac{1}{j\omega L} = -j\frac{1}{\omega L} = -jb_L = b_L e^{-j90^\circ}, \quad (2)$$

– для емкости

$$Y_C = \frac{1}{z_C} = \frac{1}{j\frac{1}{\omega C}} = j\omega C = jb_C = b_C e^{j90^\circ}. \quad (3)$$

При параллельном соединении сопротивления, индуктивности (активным сопротивлением катушки пренебрегаем) и емкости комплексная выходная проводимость составляет

$$Y = Y_r + Y_L + Y_C = g - jb_L + jb_C = g - (b_L - b_C). \quad (4)$$

В показательной форме комплексная проводимость имеет вид:

$$Y = ye^{-j\varphi}, \quad (5)$$

где $y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}$ – полная проводимость;

$\varphi = \arctg\left(\frac{b_L - b_C}{g}\right)$ – сдвиг фаз между входным напряжением и током.

ком.

Комплексное действующее значение тока в такой цепи определяется по формуле

$$\dot{I} = \dot{U}Y = Ue^{j\psi_u} \cdot ye^{-j\varphi} = yUe^{j(\psi_u - \varphi)} = Ie^{j\psi_u} \quad (6)$$

Ток в сопротивлении определяется по формуле

$$\dot{I}_r = \dot{U}Y_r = gUe^{j\psi_u} \quad (7)$$

Ток в индуктивности находится по формуле

$$\dot{I}_L = \dot{U}Y_L = Ue^{j\psi_u} \cdot b_L e^{-j90^\circ} = b_L Ue^{j(\psi_u - 90^\circ)} \quad (8)$$

Ток в емкости вычисляется по формуле

$$\dot{I}_C = \dot{U}Y_C = Ue^{j\psi_u} \cdot b_C e^{j90^\circ} = b_C Ue^{j(\psi_u + 90^\circ)} \quad (9)$$

Векторные диаграммы напряжения и токов можно построить по их найденным комплексным действующим значениям. Но в простых цепях для построения векторных диаграмм достаточно иметь только показания приборов. Выбрав масштабы напряжения и тока, векторную диаграмму в таких цепях удобно начинать построения с вектора, который является одинаковым для нескольких элементов цепи. При параллельном соединении элементов таким вектором является напряжение. При построении векторов токов необходимо учитывать, что вектор тока на сопротивлении совпадает по направлению с вектором напряжения, на индуктивности – отстает на 90° , а на емкости – опережает на 90° вектор напряжения.

Считается, что вектора вращаются против часовой стрелки с частотой $\omega = 2\pi f$.

При параллельном соединении сопротивления, индуктивности и емкости векторная диаграмма может выглядеть так, как показано на рисунке 1.

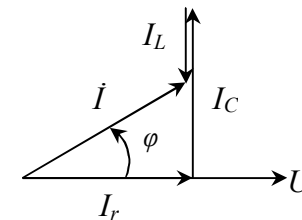


Рисунок 1 – Возможная векторная диаграмма напряжения и токов при параллельном соединении R, L, C

Длины векторов зависят от соотношения $R, b_L = 1/\omega L$ и $b_C = \omega C$.

В пассивных линейных двухполюсниках, в состав которых входят индуктивности и емкости, возможен специфический режим, при котором мощности индуктивностей и емкостей компенсирует друг друга. Такой режим называется резонансным. При резонансе двухполюсник ведет себя как активное сопротивление. Поэтому общее условие резонансного режима можно

сформулировать так: мнимая часть комплексной входной проводимости равна нулю. Математически это условие запишется в виде:

$$\operatorname{Im}(Y) = 0. \quad (9)$$

Если двухполюсник состоит из параллельно соединенных сопротивлений, индуктивности и емкости, это условие имеет вид:

$$\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = 0. \quad (10)$$

Из формул (7) и (8) следует, что при резонансе действующие значения токов в индуктивности и емкости одинаковы. Поэтому резонанс в этом случае называют резонансом токов.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов в работе используется аналоговый амперметр типа А301. Для измерения напряжения применяется цифровой вольтметр А301. В качестве источника используется регулируемый источник переменного напряжения. В качестве емкости - батарея переменных конденсаторов.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Исследование при резонансном режиме.

4.1.1. Собрать электрическую цепь, как показано на рисунке 2.

4.1.2. Из данных, приведенных на стенде, выписать величину индуктивности катушки L_{0-9} . Активное сопротивление катушки не учитывать.

4.1.3. Из условия резонанса (10) по формуле

$$C_P = \frac{1}{\omega^2 L_{0-9}} \quad (11)$$

вычислить значение емкости C_P , при которой наступает резонанс. Установить на батарее конденсаторов емкость, равную C_P .

4.1.4. Источником переменного регулируемого напряжения медленно увеличивать напряжение, контролируя при этом изменение токов. Увеличение напряжения прекратить при достижении любым из токов значения 0,7 А.

4.1.5. Записать величину достигнутого входного напряжения и в дальнейшем поддерживать его неизменным.

4.1.6. В строку 4 таблицы 1 записать величину емкости и значения токов всех амперметров.

4.2. Исследование при нерезонансных режимах.

4.2.1. Поочередно устанавливать на батарее конденсаторов величины емкостей, указанных в столбце «Режим» таблицы 1.

4.2.2. Оставляя неизменным входное напряжение, при каждом режиме

величины измеренных токов заносить в таблицу 1.

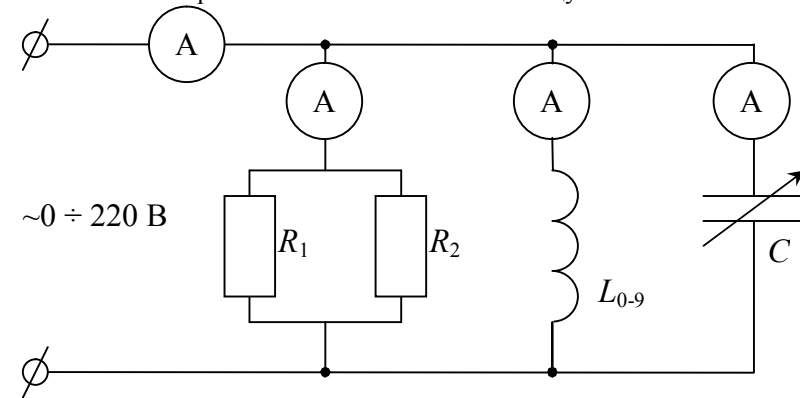


Рисунок 2 – Схема эксперимента

Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

№ режима	Режим	C , мкФ	I , А	I_R , А	I_L , А	I_C , А	y , См
1	$C = 0$						
2	$C = C_p/3$						
3	$C = 2C_p/3$						
4	$C = C_p$						
5	$C = 2C_p$						
6	$C = 3C_p$						

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1. По известному входному напряжению U рассчитать полную проводимость y двухполюсника для всех режимов

$$y = \frac{I}{U}, \quad (12)$$

и результаты занести в таблицу 1.

5.2. По данным таблицы 1 построить графики зависимости I , I_R , I_L , I_C , y от емкости.

5.3. Для строк 2, 4, 6 таблицы 1 построить векторные диаграммы токов и напряжения.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Название и цель работы.

6.2. Схема эксперимента с указанием типов измерительных приборов.



6.3. Таблица экспериментальных и расчетных данных.

6.4. Графики зависимостей $I(C)$, $I_R(C)$, $I_L(C)$, $I_C(C)$, $y(C)$.

6.5. Векторные диаграммы для строк 2, 4, 6 таблицы 1

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Какие существуют способы получения резонанса, кроме изменения емкости?

7.2. Чему равна общая проводимость при резонансе параллельно соединенных сопротивления, индуктивности и емкости?

7.3. Почему ток реактивного элемента может превосходить входной ток?

7.4. Используя векторные диаграммы, найдите суммарный ток параллельно соединенных:

а) индуктивности и емкости;

б) индуктивности и сопротивления;

в) емкости и сопротивления;

7.5. Как по построенным графикам определить величину резонансной емкости?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальная проверка анализа разветвленной цепи гармонического тока.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Анализ электрических цепей гармонического тока удобно проводить в комплексной форме. Если в цепи действует один источник гармонического напряжения или тока, то такую цепь проще анализировать методом эквивалентных преобразований. Анализ проводится по следующему алгоритму.

Заданному мгновенному значению, например, гармонического источника ЭДС, ставится в соответствие комплексное действующее значение ЭДС. Если мгновенное значение ЭДС

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \Psi_e), \quad (1)$$

то соответствующее ему комплексное действующее значение

$$\dot{E} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\Psi_e}. \quad (2)$$

Если же известно действующее значение входного напряжения U , то начальную фазу Ψ_U этого напряжения можно выбирать произвольно (удобно выбрать $\Psi_U = 0$). В этом случае комплексное действующее значение входного напряжения запишется в виде

$$\dot{U} = U e^{j\Psi_U}.$$

Определяются комплексные сопротивления пассивных элементов:

а) сопротивления

$$Z_r = R; \quad (3)$$

б) индуктивности

$$Z_L = j\omega L = \omega L e^{j90^\circ}; \quad (4)$$

в) емкости

$$Z_c = -j \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{\omega c} e^{-j90^\circ}. \quad (5)$$

Сворачивая схему, определяется комплексное эквивалентное сопротивление схемы (относительно зажимов источника) Z .

Используя закон Ома в комплексной форме



$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U e^{j\psi_U}}{z e^{j\varphi}} = \frac{U}{z} e^{j(\psi_U - \varphi)} = \quad (6)$$

$$= \check{I} e^{j\psi_i},$$

разворачиваем схему, определяя комплексные действующие значения напряжений и токов.

От комплексных действующих значений напряжений и токов возвращаются к мгновенным значениям.

Наглядным средством при анализе гармонического тока являются векторные диаграммы. Если известно комплексное действующее значение, например, тока

$$\dot{I} = \check{I}_B + j\check{I}_M = \check{I} e^{j\psi_i}, \quad (7)$$

то этот вектор можно построить на комплексной плоскости – рисунок 1.

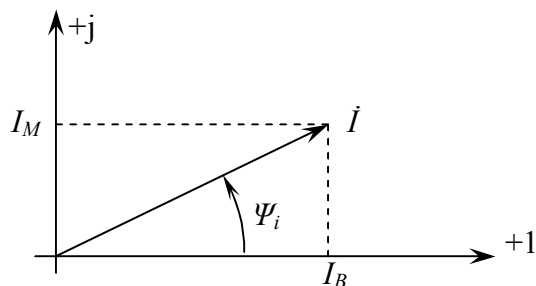


Рисунок 1 – Векторная диаграмма тока

Построить его можно двумя способами. При первом способе используется алгебраическая форма записи комплексного числа, когда по вещественной оси откладывается вещественная, а по мнимой – мнимая часть.

При втором способе используется показательная форма записи. При этом от положительной вещественной оси против часовой стрелки откладывается положительный угол ψ_i , и под этим углом проводится луч. На луче от начала координат откладывается отрезок длиной I .

Для комплексных действующих значений токов и напряжений справедливы оба закона Кирхгофа.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов в работе используются аналоговые амперметры.



Лабораторная работа проводится на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов в работе используются аналоговые амперметры. Для измерения напряжения применяется аналоговый вольтметр в дежурном режиме. В качестве источника энергии взять регулируемый источник переменного напряжения.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

4.1. Собрать электрическую цепь, схема которой приведена на рисунке 2.

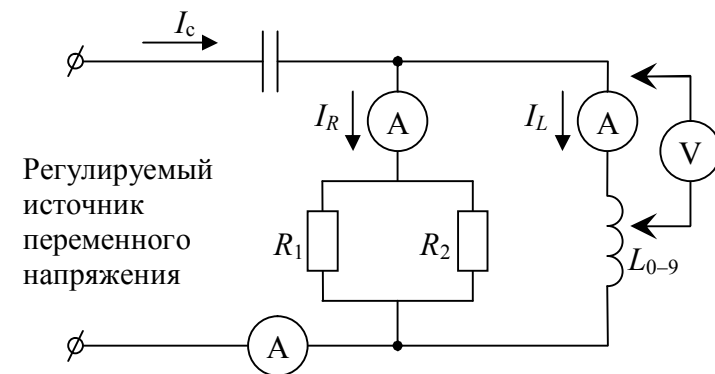


Рисунок 2 – Схема эксперимента

4.2. На переменном конденсаторе выставить значение емкости $C=20$ мкФ. Из данных, приведенных на стенде, выписать величины индуктивности L_{0-9} , а величины сопротивлений R_1 , R_2 взять из лабораторной работы № 1.

4.1. Медленно увеличивая входное напряжение, контролируйте ток и в ветвях схемы. Увеличение входного напряжения прекратить при достижении одним из токов значения 0,5А.

4.2. Вольтметром в дежурном режиме измерять входное напряжение и напряжения на элементах схемы.

4.3. Величины измеренных напряжений и токов занести в строку «Эксперимент» таблицы 1

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. При известных параметрах элементов и входном напряжении рассчитать в комплексной форме методом эквивалентных преобразований все токи и напряжения схемы, изображенной на рисунке 2.

5.2 Построить векторную диаграмму токов и напряжений.



Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

Способ получения результатов	Величины						
	$U_{вх},$ В	$U_C,$ В	$U_r,$ В	$U_L,$ В	$I_C,$ А	$I_r,$ А	$I_L,$ А
Эксперимент							
Расчет							

5.3. Представив все токи и напряжения, найденные в пункте 5.1, в показательной форме, записать модули соответствующих величин в строку «Расчет» таблицы 1.

5.4. Сравнить опытные и расчетные данные в таблице 1. Сделать вывод об их соответствии.

5.5. Для одного из узлов схемы проверить выполнение первого закона Кирхгофа.

5.6. Для внешнего контура схемы на рисунке 2 проверить выполнение второго закона Кирхгофа.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Название и цель работы.

6.2. Схема эксперимента с указанием типов используемых приборов.

6.3. Расчет исследуемой электрической цепи комплексным методом.

6.4. Таблица экспериментальных и расчетных данных.

6.5. Векторная диаграмма токов и напряжений исследуемой электрической цепи.

6.6. Проверка правильности расчетов по законам Кирхгофа.

6.7. Выводы о соответствии экспериментальных и расчетных данных.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. В чем идея расчета электрической цепи методом эквивалентных преобразований?

7.2. Чем отличаются методы расчета цепей гармонического тока от методов расчета цепей постоянного тока?

7.3. Задано комплексное число $3+j5$. Запишите это число в показательной форме.

7.4. Задано комплексное число $5e^{j40^\circ}$. Запишите это число в алгебраической форме.

7.5. С помощью векторных диаграмм докажите, что выполняется первый закон Кирхгофа.

7.6. С помощью векторных диаграмм докажите, что выполняется второй закон Кирхгофа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Освоение методов измерения и расчета мощностей в цепях гармонического тока.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Электромагнитные процессы в электрических цепях связаны с поглощением и выделением энергии как отдельными элементами, так и всей цепью. Скорость изменения энергии характеризуется мощностью. Различают несколько видов мощности. Наиболее полно энергетические изменения характеризует мгновенная мощность p .

Мгновенная мощность пассивного линейного двухполюсника может быть найдена как произведение мгновенного значения напряжения u на мгновенное значение тока i

$$p=ui. \quad (1)$$

Так как мгновенная мощность – величина, изменяющаяся во времени, ею не всегда удобно пользоваться.

Поэтому в цепях гармонического тока вводятся другие виды мощностей: активная, реактивная и полная.

Активной мощностью P называется среднее за период значение мгновенной мощности

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt. \quad (2)$$

Активная мощность измеряется в ваттах (Вт).

Реактивные элементы индуктивность и емкость не только поглощают энергию от источника, но и возвращают ее, т.е. обмениваются энергией с источником.

Максимальная скорость обмена энергией реактивного элемента с внешней цепью за период называется реактивной мощностью. Реактивная мощность обозначается прописной буквой Q и измеряется в вольт-амперах реактивных (ВАР).

Полной мощностью называется амплитуда переменной составляющей мгновенной мощности - рисунок 1. Полная мощность обозначается прописной буквой S и измеряется в вольт-амперах (В·А).

Все названные выше мощности можно найти, пользуясь мгновенными значениями токов и напряжений. Но проще это сделать, если известны комплексные действующие значения тока и напряжения двухполюсников



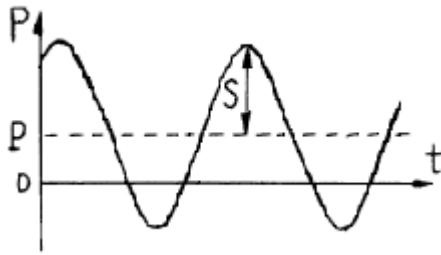


Рисунок 1 – Временная диаграмма мгновенной мощности

$$\dot{I} = I e^{j\Psi_I}, \dot{U} = U e^{j\Psi_U}. \quad (3)$$

Комплексной мощностью называется комплексное число $\underline{S}$, равное произведению комплексного действующего значения напряжения на комплексно-сопряженное действующее значение тока

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = U e^{j\Psi_U} \cdot I e^{-j\Psi_I} = UI e^{j(\Psi_U - \Psi_I)} = S e^{j\varphi}. \quad (4)$$

Здесь $\underline{S}$ - полная мощность, а φ - сдвиг фаз между напряжением и током. Комплексная мощность в алгебраической форме, имеет вид

$$\underline{S} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + jQ. \quad (5)$$

Здесь $P = S \cos \varphi$ - активная мощность, а $Q = S \sin \varphi$ - реактивная мощность двухполюсника.

В цепях гармонического тока справедлив баланс комплексной мощности.

$$\sum \underline{S}_{\text{ист}} = \sum \underline{S}_{\text{потреб}}. \quad (6)$$

Проиллюстрируем приведенные выше соотношения на примере последовательно соединенных сопротивления R , индуктивности L и емкости C .

В этом случае активная мощность вычисляется по формуле

$$P = I^2 R. \quad (7)$$

Реактивная емкость определяется из выражения

$$Q = Q_L - Q_C. \quad (8)$$

Здесь Q_L - реактивная мощность индуктивности

$$Q_L = X_L I^2, \quad (9)$$

Q_C - реактивная мощность емкости

$$Q_C = X_C I^2. \quad (10)$$

Переход от алгебраической формы записи комплексной мощности (5) к показательной форме (4) дает связь между мощностями

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}. \quad (11)$$

Комплексную мощность, как и любое комплексное число, можно построить на комплексной плоскости. При этом значение активной мощности откладывается по вещественной оси, значение Q_L – по мнимой положительной, а значение Q_C – по мнимой отрицательной оси. Тогда длина вектора $\underline{S}$ равна полной мощности, а угол φ – это угол между напряжением и током (рисунок 2).

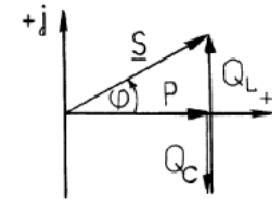


Рисунок 2 – Векторная диаграмма мощностей

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов в работе используется аналоговый амперметр. Для измерения напряжения применяется аналоговый вольтметр в дежурном режиме.

Для измерения активной мощности служит астатический ваттметр, механизм которого состоит из двух обмоток: токовой и напряжения. Токовая обмотка включается последовательно с двухполюсником, ее выводы обозначены на ваттметре «5 A» и «I*». Обмотка напряжения включается параллельно двухполюснику, ее выводы обозначаются «150 V» и «U*».

В ваттметрах направление отклонения указателя зависит от относительного направления токов в обеих обмотках. Поэтому зажимы имеют разметку: зажимы, которые должны быть подключены к источнику питания, называют генераторными и обозначают звездочкой (*) или точкой (·). Цена деления ваттметра 5 Вт.

В качестве источника энергии используется регулируемый источник переменного напряжения.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Собрать электрическую цепь, схема которой изображена на рисунке 3.

4.2. Из данных лабораторной работы № 3 или приведенных на стенде, выписать величины сопротивлений резисторов R_1 и R_2 и индуктивность катушки L_{0-9} , и сопротивление катушки R_K .



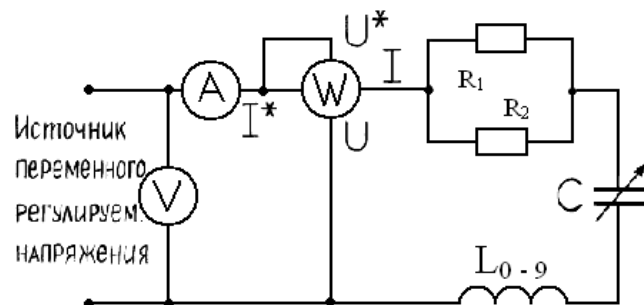


Рисунок 3 – Схема эксперимента

4.3. Рассчитать резонансное значение емкости по формуле

$$C_P = \frac{1}{\omega^2 L_{0-9}} \quad (12)$$

и установить резонансную емкость на батарее конденсаторов.

4.4. Источником переменного регулируемого напряжения увеличивать входное напряжение и контролировать при этом изменение тока. Увеличение входного напряжения прекратить при достижении током величины 1 А.

4.5. Записать величину достигнутого входного напряжения $U_{вх}$ и в дальнейшем поддерживать это напряжение неизменным.

4.6. Значение тока и активной мощности записать в строку $C=C_P$ таблицы 1 в части «измерено».

Таблица 1– Экспериментальные и расчетные данные

Режим цепи	Измерено			Вычислено				
	C , мкФ	I , А	P , Вт	$S=UI$	$P=RI^2$	$Q_L=X_L I^2$	$Q_C=X_C I^2$	$S=\sqrt{P^2+Q^2}$
$C=C_P/2$								
$C=C_P$								
$C=2C$								

4.7. Изменяя значение емкости в соответствии с требованиями таблицы 1, повторить измерения и результаты занести в таблицу 1.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1. Для всех значений емкостей подсчитать полную, активную и реактивные мощности и заполнить таблицу в части «Вычислено». При этом величины сопротивлений определяются:

активного

$$r = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + r_K ; \quad (13)$$

индуктивного

$$X_L = \omega L ; \quad (14)$$

емкостного

$$X_C = \frac{1}{\omega C} . \quad (15)$$

5.2. Для всех значений емкостей построить векторные диаграммы комплексных мощностей.

5.3. Записать значение комплексных мощностей в показательной и алгебраической формах для всех значений емкостей

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Название и цель работы.
- 6.2. Схема эксперимента с указанием типов используемых приборов.
- 6.3. Таблица экспериментальных и расчетных данных.
- 6.4. Векторные диаграммы комплексных мощностей для трех значений емкостей.
- 6.5. Значения комплексных мощностей в показательной и алгебраической формах.
- 6.6. Выводы о соотношении расчетных и экспериментальных данных.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1. Какая характеристика наиболее полно описывает энергетические изменения в электрической цепи и как ее можно рассчитать?
- 7.2. Какую характеристику измеряет ваттметр и каков ее физический смысл ?
- 7.3. Каков физический смысл величин Q_L , Q_C и $Q = Q_L - Q_C$?
- 7.4. Комплексная мощность равна $\underline{S} = 10 + j5$. Определите сдвиг фаз между напряжением и током.
- 7.5. Каков физический смысл баланса комплексной мощности?
- 7.6. Если $C < C_p$, какой математический знак будет иметь Q ? Какой физический смысл этого знака?
- 7.7. В чем особенности включения в цепь ваттметра?



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ЗВЕЗДОЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование различных режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Трехфазной называется электрическая цепь, в которой действует три синусоидальных ЭДС с одинаковыми амплитудами, одинаковыми частотами, и с разными начальными фазами. Если начальные фазы ЭДС отличаются друг от друга на 120° , то такая система ЭДС называется симметричной. В подавляющем большинстве случаев используется симметричная система ЭДС.

Три источника ЭДС можно соединить несколькими способами. Распространенным является способ соединения источников ЭДС в виде звезды. Общая точка источников называется нейтралью источников.

Распространенным способом соединения нагрузки трехфазной цепи также является соединение звездой. Общая точка нагрузки называется нейтралью нагрузки. В общем случае нейтраль нагрузки и нейтраль источников соединяются проводом, который называется нейтральным, или нулевым.

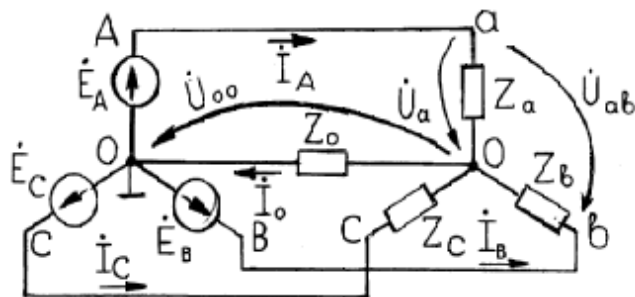


Рисунок 1 – Трехфазная цепь при соединении источников и нагрузки звездой

Провода, соединяющие выводы звезд нагрузки и источников, называются линейными.

Обозначим элементы цепи в соответствии с рисунком 1. Если выполняется условие

$$Z_a = Z_b = Z_c, \quad (1)$$

то такая нагрузка называется симметричной. Токи в линейных проводах называются линейными и обозначаются I_A, I_B, I_C . Токи в сопротивлениях $Z_a, Z_b,$

Z_c называются фазными и обозначаются $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$. Ток в нулевом проводе обозначается $\dot{I}_0$ и направляется к нейтрали источников.

Напряжения между линейными и нулевым проводом называются фазными и обозначаются $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$. Напряжения между линейными проводами называются линейными и обозначаются $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$. Напряжение между нейтралью нагрузки $0'$ и нейтралью источников 0 $\dot{U}_{0'0}$ называется напряжением смещения нейтрали.

Анализ трехфазных цепей можно производить в комплексной форме любым методом. Но в случае, когда и источники, и нагрузка соединены звездой, это удобнее делать методом узловых потенциалов.

Заземлим нейтраль источников и будем считать, что в узле $0'$ существует неизвестный узловой потенциал $\phi_{0'}$. Уравнение для этого потенциала будет иметь вид

$$\left(\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_0} \right) \phi_{0'} = \frac{\dot{E}_A}{Z_a} + \frac{\dot{E}_B}{Z_b} + \frac{\dot{E}_C}{Z_c}. \quad (2)$$

Отсюда неизвестный узловой потенциал равен

$$\phi_{0'} = \frac{\frac{\dot{E}_A}{Z_a} + \frac{\dot{E}_B}{Z_b} + \frac{\dot{E}_C}{Z_c}}{\frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_0}}. \quad (3)$$

Далее определяется напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_{0'0} = \phi_{0'} - 0 = \phi_{0'}.$$

На основании второго закона Кирхгофа находятся фазные напряжения на нагрузке

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{E}_A - \dot{U}_{0'0}, \\ \dot{U}_b &= \dot{E}_B - \dot{U}_{0'0}, \\ \dot{U}_c &= \dot{E}_C - \dot{U}_{0'0}. \end{aligned} \quad (4)$$

По фазным напряжениям находятся фазные, они же линейные, токи

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}, \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}, \quad \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}. \quad (5)$$

Ток в нулевом проводе может быть найден или по закону Ома

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_{0'0}}{Z_0}, \quad (6)$$



или по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c. \quad (7)$$

Приведенная выше последовательность расчетов справедлива при любых значениях сопротивлений нагрузки.

Частным случаем является трехфазная цепь при сопротивлении нулевого провода равном нулю. При этом $1/Z_0 = \infty$ и $\varphi_0 = 0$, и

$$\begin{aligned} \dot{U}_a &= \dot{E}_A, \\ \dot{U}_b &= \dot{E}_B, \\ \dot{U}_c &= \dot{E}_C. \end{aligned} \quad (8)$$

Из уравнения (5) видно, что фазные токи не зависят от элементов, стоящих в других частях (фазах) цепи. Понятие «фаза» имеет теперь два значения, первое – это аргумент синуса, а второе – часть электрической цепи, в которой протекает одинаковый ток.

Следовательно, нейтральный провод с нулевым сопротивлением делает работу фаз (участков цепи) независимой друг от друга.

При соединении нагрузки звездой линейные токи соответствующих фаз равны фазным токам.

При симметричной нагрузке модули линейных напряжений U_L связаны с модулями фазных напряжений U_Φ соотношением

$$U_L = \sqrt{3} U_\Phi. \quad (9)$$

При несимметричной нагрузке из (4) следует, что сумма соответствующего фазного напряжения и напряжения смещения нейтрали дает соответствующую фазную ЭДС (рисунок 2).

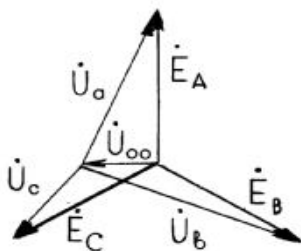


Рисунок 2 - Векторная диаграмма трехфазной цепи при несимметричной нагрузке

Эта особенность позволяет строить графически векторы фазных напряжений, если известны только действующие значения этих векторов. Для этого

в выбранном масштабе строим векторы ЭДС. Затем из конца вектора $\vec{E}_A$ проводим радиусом U_a дугу. Аналогично из конца вектора $\vec{E}_B$ проводим дугу радиусом U_b , а из конца вектора $\vec{E}_C$ проводим дугу радиусом U_c . Все три дуги должны пересечься в одной точке O' . Вектор, проведенный из точки O в точку O' , будет вектором напряжения смещения нейтрали $\vec{U}_{00'}$. Проведя из точки O' вектор в конце вектора $\vec{E}_A$, получим вектор фазного напряжения $\vec{U}_a$. Аналогично можно построить векторы других фазных напряжений $\vec{U}_b$ и $\vec{U}_c$.

Частным случаем несимметричной нагрузки является обрыв нагрузки, когда сопротивление нагрузки в одной из фаз равно бесконечности.

Еще одним частным случаем несимметричной нагрузки является короткое замыкание нагрузки одной из фаз. При наличии нулевого провода короткое замыкание нагрузки одной фазы приводит к бесконечному току в этой фазе, т.е. к аварии.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов используются аналоговые амперметры.

Для измерения напряжений применяется аналоговый вольтметр в дежурном режиме. В качестве источников энергии используется трехфазная система ЭДС, соединенная звездой.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Трехфазная цепь при наличии нулевого провода. Собрать электрическую цепь согласно схеме, показанной на рисунке 3. В случае отсутствия необходимого количества амперметров фазные токи можно рассчитать по закону Ома, используя значения сопротивлений $R_1 \div R_6$. Амперметр в нулевом проводе установить обязательно.

4.2. Симметричный режим. Включить все резисторы и измерить: фазные токи I_a, I_b, I_c ; ток в нулевом проводе I_0 ; фазные напряжения U_a, U_b, U_c ; линейные напряжения U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} . Данные опыта занести в таблицу 1.

4.3. Несимметричный режим. Увеличить сопротивление нагрузки фазы А, отключив резистор R_1 . Измерить все величины и результаты занести в таблицу 1.

4.4. Обрыв нагрузки фазы. Для обрыва нагрузки фазы А отключите также резистор R_2 . Измерить все величины и результаты занесите в таблицу 1.

4.5. Трехфазная цепь без нулевого провода.

4.5.1. Выключив источник питания, удалить из схемы нулевой провод.

4.5.2. Симметричный режим. Включить все резисторы и измерить линейные и фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали. Измерить



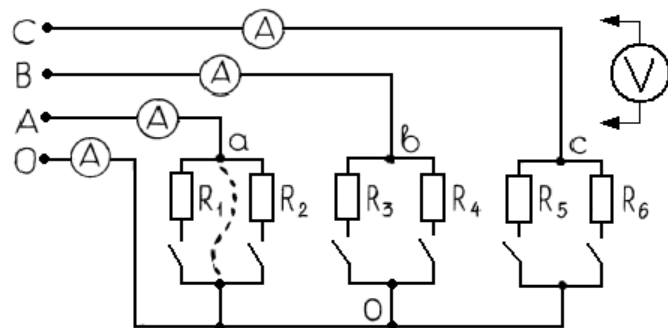


Рисунок 3 – Схема эксперимента

Таблица 1 - Экспериментальные исследования режимов с нулевым проводом

Измеряемая величина	Режим		
	Симметричный	Несимметричный	Обрыв фазы
$U_a, \text{В}$			
$U_b, \text{В}$			
$U_c, \text{В}$			
$U_{ab}, \text{В}$			
$U_{bc}, \text{В}$			
$U_{ca}, \text{В}$			
$I_a, \text{А}$			
$I_b, \text{А}$			
$I_c, \text{А}$			
$I_0, \text{А}$			

фазные (они же линейные) токи. Данные опыта занести в таблицу 2.

4.5.3. Несимметричный режим. Увеличить сопротивление нагрузки фазы A , отключив резистор R_1 . Измерить напряжения и токи и результаты занести в таблицу 2.

4.5.4. Обрыв нагрузки фазы. Для обрыва нагрузки фазы A отключить также резистор R_2 . Измерить напряжения и токи и результаты занести в таблицу 2.

4.5.5. Короткое замыкание – обязательно без нулевого провода.

Отключить питание и замкнуть нагрузку фазы A , как показано пунктиром на рисунке 3. Включить питание и измерить напряжения и токи, результаты занести в таблицу 2.

4.6. Выписать со стенда значения линейных и фазных ЭДС и величины сопротивлений нагрузки.

Таблица 2 –Исследования режима без нулевого провода

Измеряемая величина	Режим			
	Симметричный	Несимметричный	Обрыв фазы	Короткое замыкание
$U_a, \text{В}$				
$U_b, \text{В}$				
$U_c, \text{В}$				
$U_{ad}, \text{В}$				
$U_{bc}, \text{В}$				
$U_{ca}, \text{В}$				
$U_{00'}, \text{В}$				
$I_a, \text{А}$				
$I_b, \text{А}$				
$I_c, \text{А}$				

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1. Считая сопротивление нулевого провода равным нулю, в соответствии с таблицей 1, построить векторные диаграммы напряжений и токов.

5.2. На основании методики, изложенной в теоретической части, в соответствии с таблицей 2, построить векторные диаграммы напряжений и токов.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Название и цель работы.

6.2. Схема эксперимента с указанием типов используемых приборов.

6.3. Векторные диаграммы всех исследуемых режимов.

6.4. Таблицы экспериментальных данных.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. В чем сходство, и в чем различие ЭДС, действующих в трехфазных цепях?

7.2. Какие условия должны выполняться, чтобы трехфазная цепь была симметричной?

7.3. На схеме трехфазной цепи укажите точки, между которыми можно измерить линейные и фазные напряжения, а также напряжение смещения нейтрали.

7.4. Какова роль нулевого провода с нулевым сопротивлением?

7.5. В каких ситуациях в трехфазных цепях можно, а в каких - нельзя проводить опыт короткого замыкания??

7.6. Как на комплексной плоскости можно определить точку, соответствующую напряжению смещения нейтрали, если известны действующие значения фазных напряжений



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование различных режимов работы трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В трехфазной цепи (см. лабораторную работу №8, теоретическую часть) еще одним распространенным способом соединения нагрузки является соединение треугольником (рисунок 1).

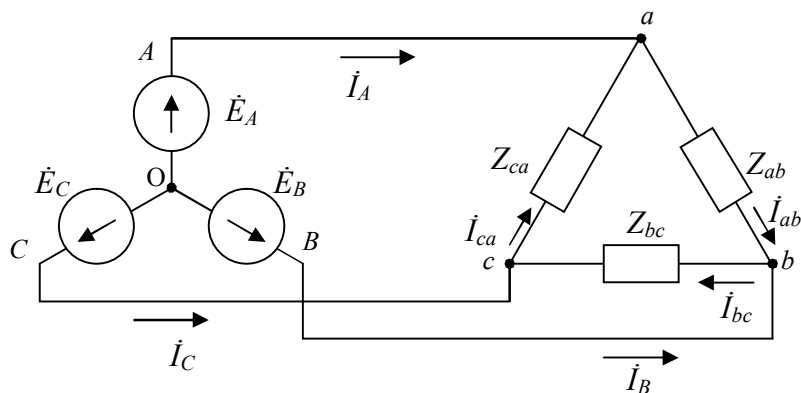


Рисунок 1 – Трехфазная цепь при соединении нагрузки треугольником

Провода, соединяющие вершины звезды источников ЭДС с вершинами треугольника нагрузки, называются линейными. Если для нагрузки выполняется условие

$$Z_{ab}=Z_{bc}=Z_{ca}, \quad (1)$$

то такая нагрузка называется симметричной.

Токи в линейных проводах называются линейными и обозначаются I_A, I_B, I_C . Токи в сопротивлениях Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} называются фазными и обозначаются I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} .

Напряжения между линейными проводами называются линейными и обозначаются $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$. Напряжения на сопротивлениях нагрузки, как и при соединении нагрузки звездой, называются фазными. Если нагрузка соединена треугольником, то фазные и линейные напряжения равны.

Записав первый закон Кирхгофа для вершин треугольника нагрузки, можно найти связь между линейными и фазными точками.

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}. \quad (2)$$

При симметричной нагрузке модули линейных токов I_L связаны с модулями фазных токов I_Φ соотношением

$$I_L = \sqrt{3} I_\Phi. \quad (3)$$

При несимметричной нагрузке не выполняется условие (1). Частным случаем несимметричной нагрузки является обрыв фазы, когда сопротивление одной из сторон треугольника равно бесконечности.

Аварийным режимом работы трехфазной сети является обрыв линии – когда оборван один из линейных проводов.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Для измерения токов используются аналоговые амперметры. Для измерения напряжений применяют аналоговый вольтметр в дежурном режиме.

В качестве источников энергии используется трехфазная система ЭДС, соединенная звездой.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Собрать электрическую цепь, как показано на рисунке 2.

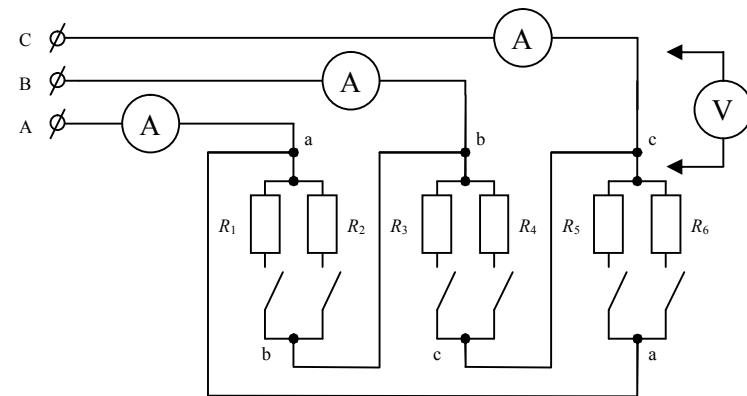


Рисунок 2 – Схема эксперимента

4.2. Симметричный режим. Включить все тумблеры и измерить линейные токи I_A , I_B , I_C и фазные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} . Данные опыта занести в таблицу 1.



Таблица 1 – Экспериментальные и расчетные данные

Режим		Симметричный	Несиммет- ричный	Обрыв фазы	Обрыв линии
Величина					
Измерено	$U_{ab}, \text{ В}$				
	$U_{bc}, \text{ В}$				
	$U_{ca}, \text{ В}$				
	$I_A, \text{ А}$				
	$I_B, \text{ А}$				
	$I_C, \text{ А}$				
Вычис- лено	$I_{ab}, \text{ А}$				
	$I_{bC}, \text{ А}$				
	$I_{Ca}, \text{ А}$				

4.3. Несимметричный режим. Увеличить сопротивление фазы ab , отключив резистор R_1 . Измерить все величины и данные занести в таблицу 1.

4.4. Обрыв фазы. В фазе ab отключить резистор R_2 , доведя тем самым сопротивление этой фазы до бесконечности. Измерить токи и напряжения.

4.5. Обрыв линии. Отключить трехфазную систему питания. Включить тумблеры сопротивлений R_1 и R_2 . Удалить линейный провод Aa . Включить питание и, измерив токи и напряжения, занести их в таблицу 1.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

5.1. Для всех исследуемых режимов вычислить действующие значения фазных токов:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}, I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}, I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}. \quad (3)$$

Результаты вычислений занести в таблицу 1 в строки «Вычислено».

5.2. Считая систему линейных напряжений симметричной, для всех режимов построить векторные диаграммы напряжений и токов.

5.3. Из построенных векторных диаграмм определить действующие значения линейных токов и сравнить с их измеренными значениями.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Название и цель работы.
- 6.2. Схема эксперимента с указанием типов измерительных приборов.
- 6.3. Таблица экспериментальных и расчетных данных.
- 6.4. Векторные диаграммы всех исследуемых режимов.
- 6.5. Выводы о соотношении экспериментальных и расчетных данных.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Какие условия должны выполняться, чтобы трехфазная цепь при соединении нагрузки треугольником была симметричной?

7.2. На схеме трехфазной сети укажите линейные и фазные токи и напряжения.

7.3. Какая связь между линейными и фазными токами при симметричной нагрузке, соединенной треугольником?

7.4. Какие и как изменятся токи, если сопротивление $Z_{ab}=R$ увеличится в два раза?

7.5. Какие и как изменятся токи при переходе от симметричного режима к режиму обрыва фазы?

7.6. Какие и как изменяются напряжения и токи при переходе от симметричного режима к режиму обрыва линии?



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование однофазного трансформатора в режимах холостого хода, опытного короткого замыкания и нагрузочном.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Трансформатором называется электротехническое устройство, в котором электрическая энергия передается между гальванически не связанными цепями посредством переменного магнитного поля.

Устройство простейшего трансформатора следующее. На ферромагнитном сердечнике (предназначенном для усиления магнитного поля) располагаются две обмотки. Обмотка, к которой подключается внешний источник, называется первичной (все параметры, относящиеся к этой обмотке, будут иметь индекс 1). К другой обмотке, называемой вторичной, подключается потребитель энергии. Все параметры, относящиеся ко вторичной обмотке, будут иметь индекс 2.

Проходящий по первичной обмотке переменный ток I_1 создает переменное магнитное поле, которое по сердечнику передается ко вторичной обмотке, создавая на ее зажимах напряжение U_2 . Если ко вторичной обмотке присоединить потребитель энергии (нагрузки) в ней возникает ток I_2 .

Важным параметром является коэффициент трансформации, который можно определить на холостом ходу (ХХ)

$$K = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_{2\text{ХХ}}}, \quad (1)$$

где W – количество витков обмоток.

Из (1) видно, что, меняя количество витков обмоток, можно менять соотношения между напряжениями обмоток.

Номинальным называется режим, в котором трансформатор может работать длительное время без аварий.

Коэффициент нагрузки β определяется из формулы

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{НОМ}}}. \quad (2)$$

Активная мощность в нагрузке может быть вычислена по известным току I_1 и напряжению U_2 вторичной обмотки

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_n, \quad (3)$$

где φ_n - угол сдвига между напряжением и током на нагрузке.

Качество передачи энергии определяется коэффициентом полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (3)$$

где P_1 – активная мощность, потребляемая трансформатором.

Коэффициент полезного действия зависит от режима работы трансформатора. Значение коэффициента нагрузки, при котором достигается максимум КПД, выражается формулой

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\text{IXX}}}{P_{\text{Iкз}}}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{Iкз}}$ – активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме опытного короткого замыкания (при пониженном напряжении U_1).

От режима работы трансформатора зависит и $\cos\varphi_1$ – коэффициент мощности, показывающий долю активной мощности в полной мощности, потребляемой трансформатором

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1}. \quad (5)$$

Зная коэффициент мощности, для каждого режима можно определить φ_1 – угол сдвига фаз между U_1 и I_1 – напряжением между первичной обмотки.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на универсальных стендах №5,7,8,10. Для измерения токов используются аналоговые амперметры Ц330, а для измерений напряжения – аналоговые вольтметры Ц330. Для измерения активной мощности используется астатический ваттметр, цена деления которого 5 Вт.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Из таблицы расположенной на стенде, переписать паспортные данные исследуемого трансформатора для номинального режима.

4.2. Режим холостого хода трансформатора.

4.2.1. Собрать электрическую цепь согласно схеме, изображенной на рисунке 1. Выводы первичной обмотки трансформатора обозначены прописными буквами (A, X), а вторичной – строчными буквами (a, x).

В качестве внешнего источника энергии взять источник переменного регулируемого напряжения.

4.2.2. Отключить все резисторы $R_1 - R_6$.



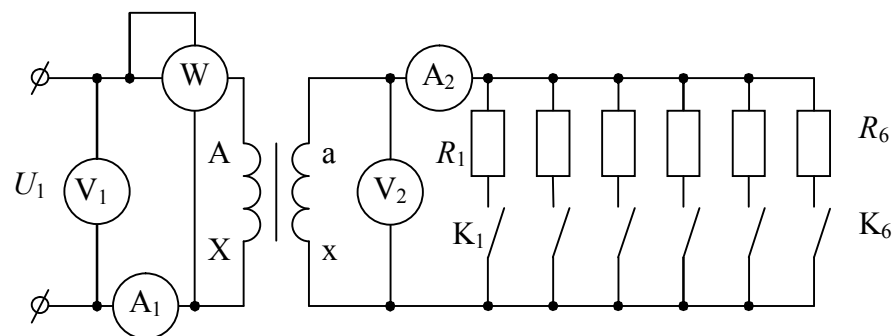


Рисунок 1 – Схема эксперимента

4.2.3. Регулируемым источником напряжения установить U_1 , равное его номинальному значению. Показания приборов занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты опыта холостого хода.

U_1 , В	$I_{1\text{ хх}}$, А	$P_{1\text{ хх}}$, Вт	U_2 , В	$I_{2\text{ хх}}$, А

4.3. Режим экспериментального короткого замыкания.

4.3.1. Регулятором установить напряжение U_1 равным нулю.

4.3.2. Замкнуть накоротко (соединить проводом) верхние и нижние выводы резисторов нагрузки $R_1 - R_6$.

4.3.3. Очень медленно увеличивая регулятором напряжение U_1 , контролировать показания амперметра A_1 . Увеличение напряжения U_1 прекратить при достижении показаний амперметра A_1 значения I_1 – номинального значения.

Показания приборов занести в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты опыта короткого замыкания.

$U_{1\text{ кз}}$, В	$I_{1\text{ кз}}$, А	$P_{1\text{ кз}}$, Вт	$U_{2\text{ кз}}$, В	$I_{2\text{ кз}}$, А

4.3.4. Уменьшить напряжение U_1 до нуля и удалить закорачивающий провод.

4.4. Нагрузочный режим трансформатора.

4.4.1. Ключами $K_1 - K_6$ отключить все резисторы нагрузки $R_1 - R_6$, плавно регулятором довести величину напряжения U_1 до значения U_1 номинального и далее положение регулятора не менять.

4.2.2. Включая каждый раз по одному тумблеру (не выключая ранее включенные) $K_1 - K_2$ исследовать работу трансформатора при различных сопротивлениях нагрузки. Для всех ситуаций показания приборов заносить в таблицу 3.

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные данные.

Количество включенных тумблеров	Измерено				Вычислено				
	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	β	P_2 , Вт	η	$\cos \varphi_1$	φ_1
1									
2									
3									
4									
5									
6									

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

5.1. По формулам, приведенным в теоретической части рассчитать коэффициент трансформации и коэффициент нагрузки, при котором достигается максимальный КПД.

5.2. Для каждой из ситуаций нагрузочного режима рассчитать β , P_2 , η , $\cos \varphi_1$, φ_1 . Результаты расчетов занести в таблицу 3.

5.3. Построить графики зависимости от коэффициента нагрузки следующих величин: I_1 , U_2 , I_2 , P_1 , P_2 , η , $\cos \varphi_1$, φ_1 .

5.4. Сравнить значения $\beta_{\max}$, найденные расчетным и графическим путем.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Наименование и цель работы.

6.2. Схема эксперимента с указанием типов измерительных приборов.

6.3. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.

6.4. Графики зависимости $I_1(\beta)$, $U_2(\beta)$, $I_2(\beta)$, $P_1(\beta)$, $P_2(\beta)$, $\eta(\beta)$, $\cos \varphi_1(\beta)$, $\varphi_1(\beta)$.

6.5. Выводы о сравнении значений $\beta_{\max}$, найденных расчетным и графическим путем.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. Назовите основные составляющие части трансформатора и укажите их назначение.

7.2. Необходимо, например, повысить напряжение. Какими конструктивными особенностями трансформатора этого можно добиться?



7.3. В каких пределах должен находиться коэффициент нагрузки для безаварийной работы трансформатора?

7.4. Чему равен угол φ_n при активной, индуктивной или емкостной нагрузке?

7.5. КПД трансформатора всегда меньше единицы. Какие виды потерь обеспечивают это неравенство?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при холостом ходе и под нагрузкой.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Асинхронным двигателем называется машина переменного тока, частота вращения подвижной части (ротора) n которой при постоянной частоте переменного тока источника f , изменяется с изменением нагрузки и отличается от синхронной частоты, т.е. от частоты вращения магнитного поля n_1 неподвижной части (статора).

В сердечнике статора расположены по окружности три одинаковые обмотки так, что их оси находятся под углом 120° . Эти обмотки подключаются к трехфазной системе токов и создают в статоре вращающееся вокруг оси машины магнитное поле.

Обмотки на статоре можно располагать так, что у вращающегося магнитного поля будет 1, 2, 3 и т.д., а в общем случае P пар полюсов.

Тогда частота вращения магнитного поля (синхронная частота) n_1 , об/мин:

$$n_1 = 60 \frac{f_1}{P}. \quad (1)$$

На вращающейся части машины (роторе) расположены проводники, концы которых замкнуты. Поэтому ротор называется короткозамкнутым. Если ротор вращается с частотой, отличной от синхронной, это равносильно тому, что проводники ротора находятся в переменном магнитном поле. В этом случае в проводниках ротора возникает ЭДС. Так как проводники ротора замкнуты, то в них возникают токи. Это второе после вращающегося магнитного поля явление, на котором основана работа асинхронного двигателя. Третье явление состоит в том, что на проводники с током в магнитном поле действует сила (Ампера), которая заставляет ротор вращаться в ту же сторону, куда вращается магнитное поле.

Частота вращения ротора n принципиально не равна n_1 , т.к. в этом случае ротор покоился бы относительно магнитного поля и сила была бы равна нулю. Поэтому двигатель и называется асинхронным.

Количественно разность частот вращения магнитного поля n_1 , и ротора n определяется величиной, называемой скольжением S :

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (2)$$



Преобразование электроэнергии, потребляемой двигателем от сети, в механическую энергию неизбежно связано с потерями.

В асинхронном двигателе имеются потери: электрические $P_{об}$ в обмотках, магнитные P_c в сердечниках и механические P_m . Следовательно полные потери в двигателе

$$\Delta P = P_{об} + P_c + P_m. \quad (3)$$

Полные потери ΔP можно приблизительно оценить, считая их равными мощности, потребляемой двигателем на холостом ходу

$$P_{1xx} = \Delta P. \quad (4)$$

Тогда полезная мощность двигателя P_2 :

$$P_2 = P_1 - P_{1xx}. \quad (5)$$

Эффективность преобразования электрической энергии в механическую характеризуется коэффициентом полезного действия η

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (6)$$

Активная мощность P_1 , потребляемая двигателем от сети, может быть измерена ваттметром.

Полная мощность асинхронного двигателя S_1 может быть рассчитана

$$S_1 = \sqrt{3} U I, \quad (7)$$

где U – линейное напряжение, В.

I – линейный ток, А.

Активная мощность P_1 и полная мощность S_1 связаны соотношением

$$P_1 = S_1 \cos \varphi, \quad (8)$$

где φ – сдвиг фаз между напряжением и током статора двигателя.

Воспользовавшись формулой (8), можно определить угол сдвига фаз напряжения и тока двигателя φ

$$\varphi = \arccos \frac{P_1}{S_1}. \quad (9)$$

Из механики известно, что механическая мощность P_2 может быть выражена через вращающий момент M и угловую скорость ротора Ω

$$P_2 = \Omega M. \quad (10)$$

В свою очередь угловая скорость Ω связана с частотой вращения n [об/мин] следующим соотношением

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}. \quad (11)$$

Воспользовавшись (10) и (11), получим выражение для вращающего момента



$$M = \frac{9,55 P_2}{n}. \quad (12)$$

Важной характеристикой двигателя является механическая характеристика, т.е. зависимость частоты вращения n от вращающего момента M : $n(M)$. Вид этой характеристики представлен на рисунке 1.

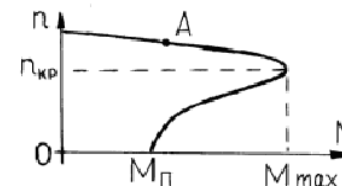


Рисунок 1- Механическая характеристика асинхронного двигателя

Точка А на характеристике соответствует номинальному режиму, т.е. режиму, при котором двигатель в нормальных условиях может выполнять свои функции длительное время с заданными параметрами.

Механическая характеристика является иным выражением зависимости вращающего момента от скольжения $M(S)$. Эта зависимость представлена на рисунке 2.

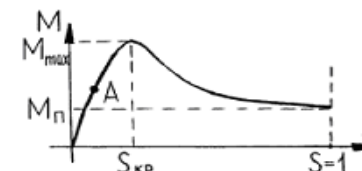


Рисунок 2 - Зависимость механического момента от скольжения

Возможности двигателя как источника механической энергии определяются его механической характеристикой.

Свойства двигателя как элемента цепи раскрываются его рабочими характеристиками, которые представляют собой зависимости φ , η , n , S , M , P_1 , I от полезной мощности (нагрузки на валу). Графики этих зависимостей показаны на рисунке 3.

Эти графики можно получить, воспользовавшись экспериментальными данными и расчетными формулами, приведенными выше.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа проводится на лабораторных стендах № 3, 5 и 9. На одном валу с асинхронным двигателем (Д) расположены тахогенератор (ТГ) и



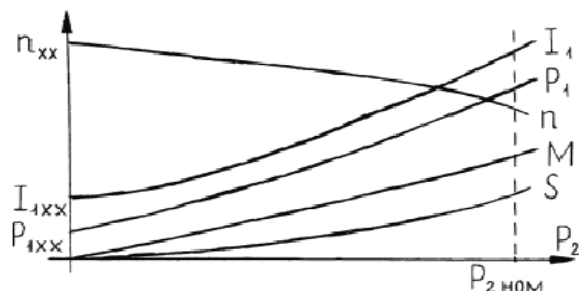


Рисунок 3 - Рабочие характеристики асинхронного двигателя

генератор (Г). Тахогенератор предназначен для измерения частоты оборотов двигателя, а генератор является нагрузкой двигателя. Активная мощность, потребляемая асинхронным двигателем, измеряется ваттметром. Нагрузкой генератора постоянного тока являются резисторы $R1 \div R6$.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

- 4.1. Переписать со стенда паспортные данные исследуемого двигателя.
- 4.2. Собрать экспериментальную цепь, схема которой изображена на рисунке 4.

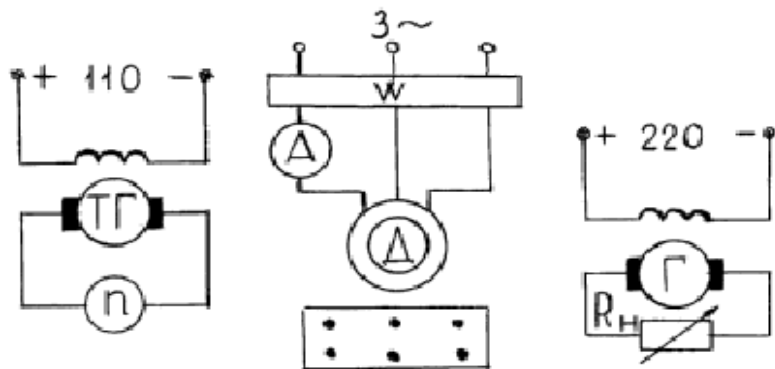


Рисунок 4 – Схема эксперимента

4.3. Исследование асинхронного двигателя при соединении обмоток статора треугольником.

4.3.1. При отключенном питании двигателя и генераторов соединить обмотки статора асинхронного двигателя треугольником, для этого гнезда панели, расположенной под двигателем, соединить согласно рисунку 5.

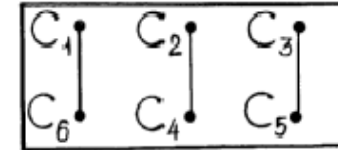


Рисунок 5 - Соединение обмоток статора треугольником

- 4.3.2. Отключить нагрузку R_H генератора Г.
- 4.3.3. Включить все источники питания.
- 4.3.4. Записать показания приборов при холостом ходе двигателя в таблицу №1.
- 4.3.5. Увеличивая нагрузку генератора добавлением включенных тумблеров сопротивлений нагрузки, записать данные пяти – шести режимов в таблицу 1.

Таблица 1 - Таблица экспериментальных и расчетных данных

Соединение обмоток	Включено R_H	Измерено			Вычислено				
		I , А	P_1 , Вт	n , об/мин	S , В·А	P_2 , Вт	η	φ , град.	M , Н·м
Треугольник	0								
	1								
	...								
	6								
Звезда	0								
	1								
	...								
	6								

- 4.4. Исследование асинхронного двигателя при соединении обмоток статора звездой.
- 4.4.1. Отключить питание двигателя и генераторов.
- 4.4.2. Соединить обмотки статора асинхронного двигателя звездой, для этого гнезда панели, расположенной под двигателем, соединить согласно рисунку 6.
- 4.4.3. Отключить нагрузку R_H генератора.
- 4.4.4. Включить все источники питания.
- 4.4.5. Записать показания приборов при холостом ходе двигателя в таблицу 1.
- 4.4.6. Увеличив нагрузку генератора добавлением включенных тумблеров сопротивлений нагрузки, записать данные пяти–шести режимов в таблицу 1.



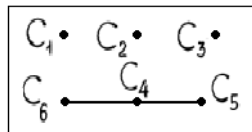


Рисунок 6 - Соединение обмоток статора звездой

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По формулам, приведенным в разделе 2, вычислить S , P_2 , η , φ , M для всех режимов, записанных в таблице 1.

5.1. Заполнить таблицу 1 в части «Вычислено».

5.2. По данным таблицы 1 построить механические $n(M)$, $n(S)$ и рабочие характеристики $\varphi(P_2)$, $\eta(P_2)$, $n(P_2)$, $S(P_2)$, $M(P_2)$, $P_1(P_2)$ или их фрагменты.

5.3. Проанализировать поведение графиков.

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Наименование и цель работы.

6.2. Схема эксперимента с указанием типов используемых приборов.

6.3. Формулы, необходимые для выполнения расчетов.

6.4. Таблица экспериментальных и расчетных данных.

6.5. Графики механических и рабочих характеристик.

6.6. Анализ полученных результатов.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

7.1. На каких физических явлениях основывается принцип действия асинхронного двигателя?

7.2. Почему двигатель называется асинхронным?

7.3. Что такое скольжение, и какие значения оно может принимать?

7.4. Какие виды потерь существуют в асинхронном двигателе?

7.5. Какая величина характеризует эффективность преобразования электрической энергии в механическую?

7.6. Как можно найти сдвиг фаз между напряжением и током в асинхронном двигателе?

7.7. Какие виды механических характеристик асинхронного двигателя Вы знаете?

7.8. Что такое рабочие характеристики асинхронного двигателя?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электротехника /Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.
2. Общая электротехника /Под ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высш. шк., 1970. – 383 с.
3. Трегуб А.П. Электротехника /А.П. Трегуб. – К.: Вища. шк., 1987. – 600 с.
4. Касаткин А.С. Электротехника /А.С. Касаткин, П.В. Немцов. – М.: Высш. шк., 2000. – 542 с.
5. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники /И.А.Данилов, П.М. Иванов. – М.: Высш. шк., 2000. – 752 с.

