

Министерство образования и науки Украины

Севастопольский национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплинам
«Теоретические основы электротехники»
и «Основы теории электрических цепей»
для студентов второго и третьего курсов
направлений 6.050702 – Электромеханика
и 6.050102 – Компьютерная инженерия
дневной и заочной форм обучения

Часть 1

Севастополь
2010

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Теоретические основы электротехники» и «Основы теории электрических цепей» для студентов второго и третьего курсов дневной и заочной форм обучения. Направления: 6.050702 – Электромеханика; 6.050102 – Компьютерная инженерия – в 2 ч. / Сост. к.т.н., доц. Л.Н.Канов. – Севастополь: Изд – во СевНТУ, 2010. – Ч.1. – 48 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам в подготовке и выполнении лабораторных работ, а также для самостоятельной работы по индивидуальным графикам по дисциплинам «Теоретические основы электротехники» и «Основы теории электрических цепей».

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры СПЭМС (протокол № 6 от 10 декабря 2009 г.).

Допущены учебно – методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний.

Рецензент: Олейников А.М., доктор техн. наук, проф.,
заведующий кафедрой СПЭМС СевНТУ

СОДЕРЖАНИЕ

Условные обозначения.	4
1. Лабораторная работа № 1. Двухполюсник в режиме постоянного тока.	5
2. Лабораторная работа № 2. Четырехполюсник в режиме постоянного тока.	9
3. Лабораторная работа № 3. Катушка, конденсатор и резистор в режиме синусоидального тока.	12
4. Лабораторная работа № 4. Резонанс.	16
5. Лабораторная работа № 5. Электромагнитные цепи со взаимной индукцией.	22
6. Лабораторная работа № 6. Трехфазные цепи, соединенные в звезду.	27
7. Лабораторная работа № 7. Трехфазные цепи, соединенные в треугольник.	34
8. Лабораторная работа № 8. Электрические цепи несинусоидального напряжения.	39
9. Лабораторная работа № 9. Переходный процесс заряда конденсатора через резистор в цепи постоянного напряжения.	41
10. Лабораторная работа № 10. Переходный процесс включения и отключения катушки индуктивности в цепи постоянного напряжения.	44
Библиографический список.	47

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

α – поворотный множитель, град.;
 B – магнитная индукция, Тл;
 β – коэффициент загрузки;
 C – емкость, Ф;
 E, e – электродвижущая сила (ЭДС), В;
 E_A, E_B, E_C – трехфазная система ЭДС, В;
 ε – коэффициент пульсаций;
 φ – потенциал, В;
 F – магнитодвижущая сила, А;
 H – напряженность магнитного поля, А/м;
 δ – немагнитный зазор, м;
 g – активная проводимость, См;
 I, i – ток, А;
 J – источник тока, А;
 L – индуктивность, Гн;
 $KЗ$ – знак короткого замыкания;
 ψ – начальная фаза, град.;
 ν – частота, Гц;
 η – коэффициент полезного действия;
 P – активная мощность, Вт;
 R, r – активное сопротивление, Ом;
 R_m – магнитное сопротивление, Гн⁻¹;
 Q – реактивная мощность, ВАр;
 S – комплексная мощность, ВА;
 t – время, с;
 T – период колебания, с;
 τ – постоянная времени, с;
 Φ – магнитный поток, Вб;
 U, u – напряжение, В;
 U_m – магнитное напряжение, А;
 X, x – реактивное сопротивление, Ом;
 XX – знак холостого хода;
 Y – комплексная проводимость, См;
 w – число витков;
 ω – круговая частота;
 Z – комплексное сопротивление, Ом;
 $*$ – знак комплексного сопряжения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ДВУХПОЛЮСНИК В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: изучение режимов работы активного двухполюсника постоянного тока под нагрузкой; построение схем замещения двухполюсника; исследование его внешних нагрузочных характеристик.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Двухполюсником (ДП) является любая электрическая цепь или система, рассматриваемая относительно двух своих выводов; это одно из глобальных понятий электротехники. Двухполюсник называется активным (АДП), если содержит независимые источники энергии, рисунок 1,а. Любой генератор, аккумулятор, датчик, комнатная розетка, вообще любой источник электроэнергии является активным двухполюсником.

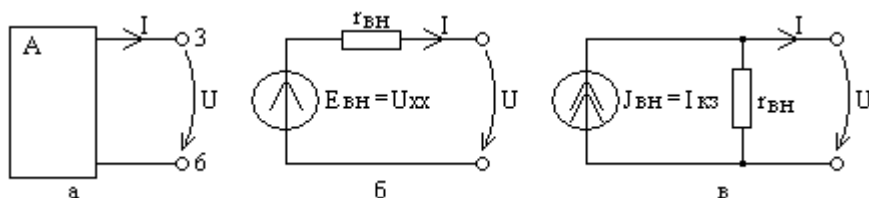


Рисунок 1 – Активный двухполюсник и его схемы замещения
а) обозначение; б) схема Тевенина; в) схема Нортон

Самый простой – линейный двухполюсник может быть представлен двумя схемами замещения: последовательной схемой Тевенина, рисунок 1,б и параллельной схемой Нортон, рисунок 1,в. Последовательная схема состоит из источника постоянной внутренней ЭДС E_{BH} и внутреннего сопротивления r_{BH} ; параллельная схема состоит из источника постоянного внутреннего тока J_{BH} и того же сопротивления r_{BH} . Внутренняя ЭДС равна напряжению холостого хода АДП: $E_{BH} = U_{XX}$ (напряжению на разомкнутых контактах АДП); внутренний источник тока равен току короткого замыкания АДП: $J_{BH} = I_{KЗ}$ (току на короткозамкнутых выводах АДП). Внутреннее сопротивление определяется из простого соотношения: $E_{BH} = r_{BH} \cdot J_{BH}$. Наибольшее распространение получила последовательная схема Тевенина.

Режим АДП под нагрузкой описывается внешней или нагрузочной характеристикой, представляющей зависимость выходного напряжения от тока при изменении сопротивления нагрузки. Уравнение этой характеристики (применительно к схеме Тевенина) имеет вид

$$U = E_{BH} - r_{BH} \cdot I \quad (1)$$

и представляет собой падающую прямую (линия 1, рисунок 2). Уменьшение выходного напряжения объясняется ростом падения напряжения $U_{BH} = r_{BH} \cdot I$ на внутреннем сопротивлении с ростом тока (линия 2, рисунок 2).

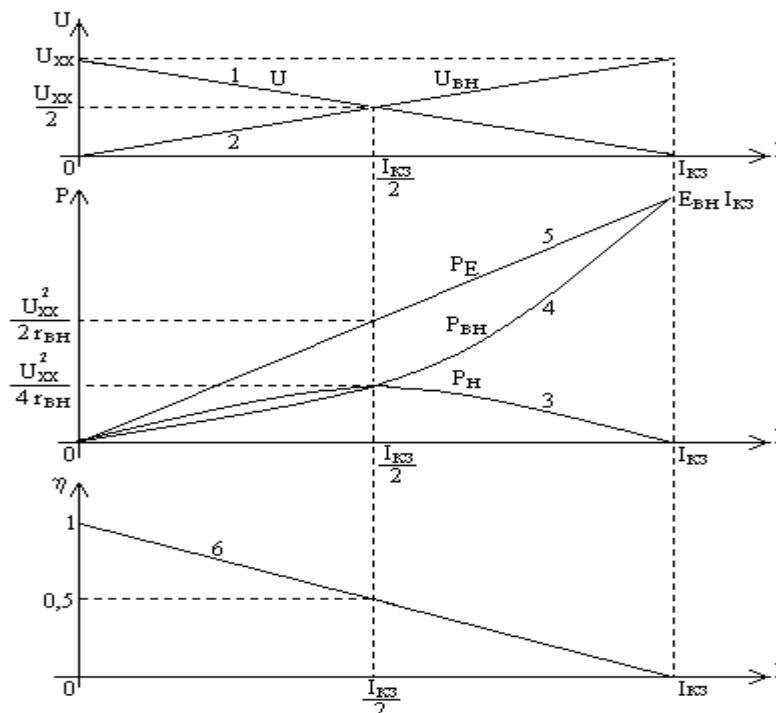


Рисунок 2 – Внешние характеристики активного двухполюсника

Выходная мощность АДП определяется выражением (для схемы Тевенина)

$$P = UI = E_{BH}I - r_{BH}I^2 \quad (2)$$

и имеет максимум при токе нагрузки, равном половине тока короткого замыкания $I_M = 0,5I_{K3}$, когда сопротивление нагрузки r_H равно внутреннему сопротивлению АДП: $r_H = r_{BH}$. Максимальная мощность находится из выражения

$$P_M = 0,25 \cdot U_{XX} I_{K3} = \frac{U_{XX}^2}{4r_{BH}}. \quad (3)$$

График зависимости выходной мощности АДП от тока нагрузки изображен на рисунке 2, кривая 3. На том же рисунке изображен график зависимости мощности потерь на внутреннем сопротивлении АДП

$$P_{BH} = r_{BH} \cdot I^2 \quad (4)$$

(кривая 4, парабола!) и график мощности, генерируемой внутренней ЭДС

$$P_E = E_{BH} I, \quad (5)$$

(прямая 5). Графики показывают, что уменьшение выходной мощности АДП объясняется опережающим ростом мощности потерь на внутреннем сопротивлении АДП по сравнению с генерируемой мощностью.

Эффективность работы АДП на нагрузку характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД), равном отношению выходной и генерируемой мощностей

$$\eta = \frac{P}{P_E} = \frac{U}{E_{BH}}. \quad (6)$$

График зависимости КПД от тока изображен на рисунке 2, прямая 6. Анализ рисунка 2 показывает, что АДП наиболее эффективно по КПД работает вблизи режима ХХ при малом токе (большом сопротивлении нагрузки), однако выходная мощность при этом невелика. Режим же работы с максимальной мощностью характеризуется небольшим КПД (около 50%).

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. АДП имитируется многополюсником с выводами 3 – 6. Внутри АДП подается питание 50 В с регулятора постоянного напряжения. Переносной ваттметр типа Д522 предназначен для измерения мощности нагрузки; аналоговый вольтметр типа Ц330 измеряет выходное напряжение, миллиамперметр типа М265 измеряет выходной ток.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Для анализа работы АДП соберите схему эксперимента по рисунку 3, установите напряжение питания 50 В. Ввиду нестабильности напряжения сети регулятором далее постоянно поддерживайте это напряжение на неизменном уровне. Вначале установите режим холостого хода, для чего в любом месте разомкните цепь нагрузки, подрегулируйте напряжение питания АДП. Измерьте и запишите в таблицу 1 напряжение холостого хода, обратите внимание на то, что в этом режиме ток и мощность нагрузки равны нулю. Далее установите режим короткого замыкания нагрузки (в нашем случае это безопасный режим!), снова подрегулируйте напряжение питания, измерьте и запишите в таблицу 1 ток короткого замыкания. Обратите внимание на то, что в этом режиме напряжение и мощность нагрузки равны нулю. Подсчитайте внутреннее сопротивление АДП и максимально возможную выходную мощность по выражению (3).

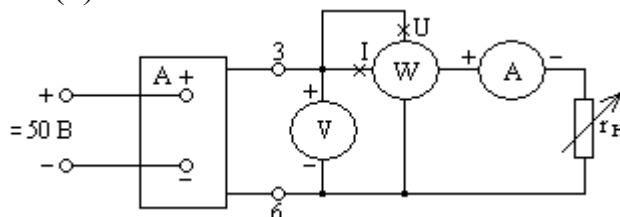


Рисунок 3 – Схема эксперимента

2. Верните схему в исходное состояние (подсоедините нагрузку) и, изменяя сопротивление нагрузки, в таблицу 1 запишите напряжение, ток и мощность нагрузки для всех положений ручек переменного резистора (не забывайте поддерживать неизменным напряжение питания АДП). Среди прочих постарайтесь установить режим максимальной мощности: $U = 0,5U_{XX}$; $I = 0,5I_{K3}$. Сравните в этом режиме максимальную мощность с расчетной, а сопротивление нагрузки – с внутренним сопротивлением АДП.

Таблица 1 – Характеристики активного двухполюсника

Режим	КЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	XX
U , В	0										
I , А											0
P , Вт	0										0
R_n , Ом	0										∞
η	0										1

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Определите величины источников ЭДС и тока в схемах замещения АДП, а также внутреннее сопротивление; начертите эти схемы и подпишите их параметры.

2. Для каждой позиции переключателя переменного сопротивления рассчитайте и занесите в таблицу 1 значения сопротивления нагрузки (по закону Ома) и КПД по выражению (6).

2. В координатах I, U по точкам $I_{кз}$ и $U_{хх}$ проведите теоретический график внешней нагрузочной характеристики АДП по выражению (1); на этом же чертеже проведите график зависимости напряжения на внутреннем сопротивлении АДП от тока; рекомендуемые масштабы: по напряжению m_U 10 В/см; по току m_I 10 мА/см. Нанесите на график внешней характеристики опытные точки по данным из таблицы 1, сравните опытные и теоретические результаты.

3. В координатах I, P постройте теоретические графики зависимости мощности на нагрузке от тока по выражению (2), мощности на внутреннем сопротивлении от тока по выражению (4) и мощности, генерируемой источником ЭДС, по выражению (5); рекомендуемый масштаб m_P 0,5 Вт/см. Нанесите на график мощности на нагрузке опытные точки по данным из таблицы 1, сравните опытные и теоретические результаты.

4. В координатах I, η постройте теоретический график зависимости КПД от тока; рекомендуемый масштаб m_η 25 %/см. Нанесите на этот график расчетные точки по данным из таблицы 1, сравните опытные и теоретические результаты.

5. Сделайте выводы о влиянии сопротивления и тока нагрузки на выходное напряжение, мощность и КПД АДП.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы замещения АДП с подписанными параметрами элементов.
3. Схема эксперимента с подписанными типами электроизмерительных приборов.
4. Теоретические графики внешних нагрузочных характеристик, построенные по выражениям (1) – (6), с нанесенными на них опытными точками.
5. Выводы о влиянии сопротивления и тока нагрузки на выходное напряжение, мощность и КПД АДП, а также о соответствии опытных и теоретических результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Выведите соотношения (1) – (6).
2. Почему выходное напряжение АДП падает с ростом тока?
3. Почему кривая выходной мощности имеет максимум?
4. Почему максимум выходной мощности возникает при сопротивлении нагрузки, равном внутреннему сопротивлению АДП?

5. Почему график выходной мощности пересекается с графиком мощности на внутреннем сопротивлении в точке $0,5I_{K3}$?

6. Как можно оценить ток короткого замыкания, если он не доступен непосредственному измерению?

7. Оцените вид нагрузочных характеристик и параметров схем замещения таких источников энергии, как обычная комнатная розетка, батарейка, источник питания для компьютера, аккумулятор.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК В РЕЖИМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: исследование режима работы активного четырехполюсника под нагрузкой; определение Z – параметров четырехполюсника; построение его схемы замещения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Четырехполюсник (ЧП) – это любая электрическая система или цепь, рассматриваемая относительно двух пар своих выводов. Четырехполюсник является активным (АЧП), если он содержит независимые источники энергии, рисунок 1,а. Так же как двухполюсник, четырехполюсник – одно из глобальных понятий электротехники.

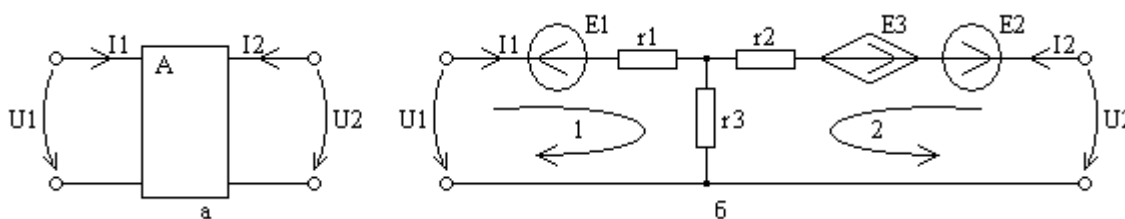


Рисунок 1 – Активный четырехполюсник а) и его T – схема замещения б)

Одним из распространенных способов описания режима постоянного тока АЧП являются уравнения в Z – параметрах:

$$U_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + U_{01}; \quad U_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + U_{02}, \quad (1)$$

где Z_{11}, Z_{22} – входные сопротивления АЧП со стороны входных и выходных выводов; Z_{12}, Z_{21} – передаточные сопротивления; U_{01}, U_{02} – напряжения одновременного холостого хода на выводах АЧП.

Для определения пары параметров Z_{11}, Z_{21} выполняется опыт прямого холостого хода на выводах 2 пассивного ЧП: $I_2 = 0$; $U_{01} = U_{02} = 0$; на выводы 1 подсоединяется пробный источник напряжения U_{1np} . Тогда из уравнений (1) получаем

$$Z_{11} = \frac{U_{1np}}{I_1}; \quad Z_{21} = \frac{U_2}{I_1}. \quad (2)$$

Для определения пары параметров Z_{12} , Z_{22} выполняется опыт обратного холостого хода на выводах 1 пассивного ЧП: $I_1 = 0$; $U_{01} = U_{02} = 0$; на выводы 2 подсоединяется пробный источник напряжения U_{2np} . Тогда из уравнений (1) получаем

$$Z_{22} = \frac{U_{2np}}{I_2}; \quad Z_{12} = \frac{U_1}{I_2}. \quad (3)$$

Рассмотренным Z – параметрам АЧП соответствует T – схема замещения (модель), изображенная на рисунке 1,б. Схема состоит из трех сопротивлений $r_1 - r_3$, двух независимых E_1 , E_2 и одного зависимого источника ЭДС E_3 . Параметры элементов схемы выражаются через Z – параметры четырехполюсника следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} r_1 &= Z_{11} - Z_{12}; \quad r_2 = Z_{22} - Z_{12}; \quad r_3 = Z_{12}; \\ E_1 &= U_{01}; \quad E_2 = U_{02}; \quad E_3 = k \cdot I_1; \quad k = Z_{21} - Z_{12}. \end{aligned} \quad (4)$$

В пассивном ЧП $U_{01} = U_{02} = 0$, и источники ЭДС E_1, E_2 в T – схеме отсутствуют. Если ЧП не содержит управляемых источников, то $Z_{12} = Z_{21}$, следовательно, $k = 0$, и управляемый источник ЭДС E_3 отсутствует. В симметричном АЧП $U_{01} = U_{02}$; $Z_{11} = Z_{22}$, и T – схема симметрична.

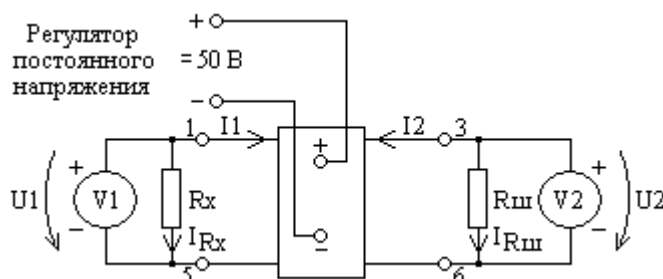


Рисунок 2 – Нагрузочный режим активного четырехполюсника

Расчет нагрузочного режима АЧП может быть выполнен по T – схеме с нагрузочными резисторами R_X и $R_{ш}$ на выводах 1 и 2 (рисунок 2) с помощью уравнений контурных токов или узловых потенциалов. Выбирая, например, обходы контуров 1 и 2 по указанные на рисунке 1,б, получаем уравнения контурных токов

$$I_{\kappa 1} R_{11} + I_{\kappa 2} R_{12} = E_{\kappa 1}; \quad I_{\kappa 1} R_{21} + I_{\kappa 2} R_{22} = E_{\kappa 2}, \quad (5)$$

где $R_{11} = R_X + r_1 + r_3$ – собственное сопротивление 1 контура;
 $R_{22} = R_{ш} + r_2 + r_3$ – собственное сопротивление 2 контура;
 $R_{12} = R_{21} = r_3$ – взаимное сопротивление между контурами;
 $E_{\kappa 1} = -E_1$; $E_{\kappa 2} = -(E_2 + E_3)$ – контурные ЭДС.

Из соотношений (5) определяются контурные токи $I_{\kappa 1}$, $I_{\kappa 2}$, а затем и токи нагрузок: $I_{RX} = -I_{\kappa 1}$, $I_{R_{III}} = -I_{\kappa 2}$.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном стенде. Активный ЧП имитируется многополюсником с выводами на левой стороне 1 – 5, на правой стороне – 3 – 6. Внутрь ЧП подается постоянное напряжение питания 50 В с регулятора постоянного напряжения. Для измерений используются цифровые приборы типа Ц4313 или аналоговые типов Ц330, М265М.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Для исследования АЧП под нагрузкой соберите схему по рисунку 2, запишите сопротивления нагрузочных резисторов R_X и R_{III} . Измерьте напряжения на этих резисторах (обратите внимание на правильную полярность подключения вольтметра); по закону Ома рассчитайте токи в нагрузках I_{RX} , $I_{R_{III}}$.

2. Для определения напряжений одномерного холостого хода U_{01} , U_{02} освободите выводы АЧП от нагрузочных сопротивлений и измерьте эти напряжения, питание АЧП поддерживайте на уровне 50 В.

3. Чтобы определить входное и передаточное сопротивления Z_{11} , Z_{21} прежде всего переведите ЧП в пассивный режим. Для этого отсоедините ЧП от питающего регулятора напряжения и выводы ЧП (+) и (–) замкните проводником. Схема опыта изображена на рисунке 3,а, обращайте внимание на полярности подключаемых приборов. Установив входное напряжение $U_1 = 50$ В, измерьте I_1 , U_2 , подсчитайте Z_{11} , Z_{21} по выражениям (2).

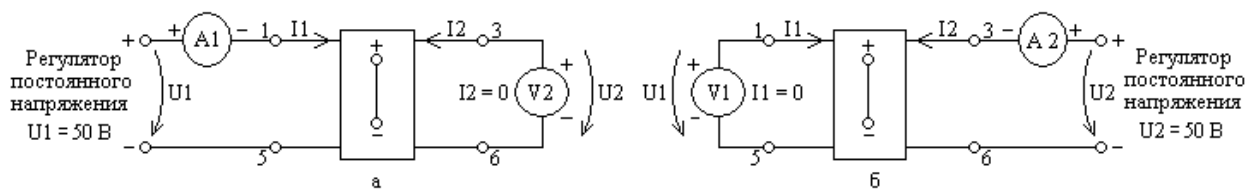


Рисунок 3 – Схемы экспериментов для определения входных и передаточных сопротивлений пассивного четырехполюсника:
 а) прямое включение; б) обратное включение

4. Для определения параметров Z_{12} , Z_{22} соберите схему по рисунку 3,б (обратное включение пассивного ЧП), установите напряжение $U_2 = 50$ В, измерьте I_2 , U_1 , по выражениям (3) подсчитайте Z_{12} , Z_{22} . При правильном ходе работы Вы заметите, что $Z_{12} \approx Z_{21}$, кроме того, все найденные Z – параметры должны быть положительными.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Рассчитайте параметры T – схемы замещения АЧП по выражениям (4); коэффициент k управляемого источника, а следовательно и ЭДС E_3 должны быть близки к нулю. Начертите T – схему и подпишите все параметры ее элементов.

2. Подсоедините к полученной схеме нагрузочные резисторы R_X и R_{III} так, как в опыте 1. По выражениям (5) подсчитайте токи и напряжения на этих резисторах, сравните с данными нагрузочного режима в опыте 1. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема эксперимента по исследованию работы АЧП под нагрузкой, сопротивления нагрузок и параметры нагрузочного режима, типы измерительных приборов.
3. Схемы экспериментов для определения всех Z – параметров АЧП и расчет этих параметров.
4. T – схема замещения АЧП с подписанными параметрами элементов, проверочный расчет напряжений и токов нагрузочного режима, выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Является ли исследованный АЧП симметричным?
2. Содержит ли он управляемые источники?
3. Какова будет T – схема замещения пассивного ЧП?
4. Почему при определении входных и передаточных сопротивлений выводы питания ЧП замыкают проводником (закорачивают)?
5. При каких условиях их можно было бы оставить разомкнутыми?
6. По рассчитанной схеме замещения спрогнозируйте напряжения и токи на выводах АЧП при аварийном режиме одновременного короткого замыкания на выводах АЧП; при коротком замыкании на выводах 1 – 5 и одновременно обрыве на выводах 3 – 6.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

КАТУШКА, КОНДЕНСАТОР И РЕЗИСТОР В РЕЖИМЕ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: изучение работы катушки индуктивности, конденсатора и резистора в режиме синусоидального тока промышленной частоты; построение их схем замещения и определение параметров этих схем.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Катушка индуктивности в режиме синусоидального тока может быть представлена двумя схемами замещения – последовательной и параллельной. Наиболее часто применяется последовательная схема, рисунок 1,а. Резистор в этой схеме имеет смысл сопротивления обмотки катушки $r_{обм}$. Параметры этой схемы находятся по результатам измерения напряжения U , тока I и активной мощности P : сопротивление обмотки $r_{обм} = \frac{P}{I^2}$; полное сопротивление $z = \frac{U}{I}$; реактивное сопротивление $x = \sqrt{z^2 - r_{обм}^2}$; индуктивность $L = \frac{x}{\omega}$, где $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ – круговая частота; разность фаз между входными напряжением и током $\phi = \arctg \frac{x}{r_{обм}}$; качество катушки оценивается добротностью $Q = \frac{x}{r_{обм}}$. На рисунке 1,б изображен треугольник сопротивлений катушки.

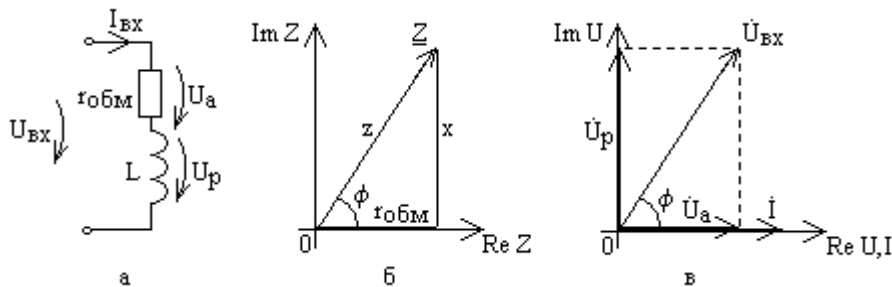


Рисунок 1 – Катушка индуктивности в режиме синусоидального тока
а) последовательная схема замещения; б) треугольник сопротивлений;
в) векторная диаграмма

Входное напряжение представляется суммой двух составляющих: активное напряжение $U_a = r_{обм}I$, возникающее на сопротивлении обмотки и совпадающее с током по фазе, и реактивное напряжение $U_p = xI$, возникающее на индуктивности и опережающее ток на 90° . Векторная диаграмма последовательной схемы изображена на рис. 1,в.

Конденсатор в режиме синусоидального тока может быть представлен также двумя схемами замещения, наиболее часто из которых применяется параллельная схема, рисунок 2,а. Резистор в этой схеме имеет смысл сопротивления утечки изоляции r_{ym} между обкладками конденсатора. Параметры этой схемы также находятся по результатам измерения напряжения U , тока I и активной мощности P : проводимость утечки $g_{ym} = \frac{1}{r_{ym}} = \frac{P}{U^2}$; полная проводимость $y = \frac{I}{U}$; реактивная проводимость $b = \sqrt{y^2 - g_{ym}^2}$; емкость $C = \frac{b}{\omega}$; разность фаз между входными напряжением и

током $\varphi = \arctg \frac{b}{g_{yt}}$; качество конденсатора оценивается добротностью $Q = \frac{b}{g_{yt}}$.

На рисунке 2,б изображен треугольник проводимостей конденсатора.

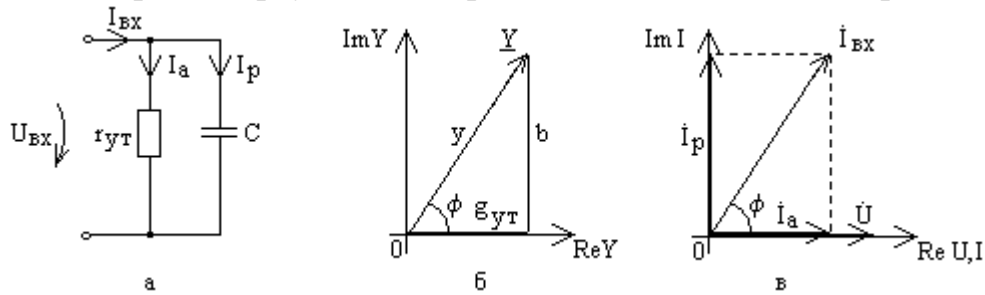


Рисунок 2 – Конденсатор в режиме синусоидального тока
а) параллельная схема замещения; б) треугольник проводимостей;
в) векторная диаграмма

Входной ток конденсатора представляется суммой двух составляющих: активный ток $I_a = g_{yt} U$, возникающий в сопротивлении утечки и совпадающий с входным напряжением по фазе, и реактивный ток $I_p = bU$, возникающий в емкости и опережающий напряжение на 90° . Векторная диаграмма параллельной схемы изображена на рис. 2,в.

Резистор в режиме синусоидального тока промышленной частоты не имеет схемы замещения; напряжение и ток в нем совпадают по фазе. Сопротивление резистора является активным и определяется по выражениям $r = \frac{U}{I}$ или $r = \frac{P}{I^2}$.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде; для анализа предлагается катушка L_x , конденсатор C_x и резистор R_x . Источником питания служит регулятор переменного напряжения. Ток измеряется аналоговым амперметром типа Э377, активная мощность – переносным ваттметром Д552.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования катушки L_x соберите схему по рисунку 3. Установите ток, например, 0,3 А и измерьте входное напряжение и мощность. Выведите напряжение на ноль, подсоедините к схеме вместо катушки конденсатор C_x и повторите измерения при том же токе; убедитесь, что активная мощность конденсатора мала. Аналогично измерьте параметры режима резистора R_x , убедитесь, что активная мощность резистора достаточно велика.

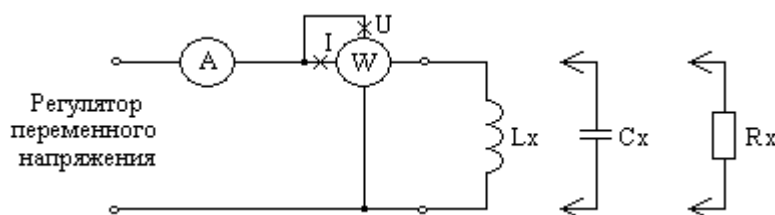


Рисунок 3 – Схема эксперимента

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Рассчитайте сопротивление обмотки катушки, ее полное и реактивное сопротивления и индуктивность, сравните с данными стенда. Определите угол разности фаз между входным напряжением и током и добротность катушки, оцените ее качество. Постройте треугольник сопротивлений катушки; рекомендуемый масштаб по осям абсцисс и ординат 20 Ом/см . Для принятого значения тока подсчитайте активное и реактивное напряжения, постройте векторную диаграмму, отметьте на ней угол разности фаз между входным напряжением и током, рекомендуемые масштабы: для напряжения 10 В/см ; для тока $0,1 \text{ А/см}$.

2. Рассчитайте проводимость и сопротивление утечки изоляции конденсатора, его полную и реактивную проводимости и емкость, сравните с данными стенда. Определите угол разности фаз между входным напряжением и током и добротность конденсатора, оцените его качество. Постройте треугольник проводимостей конденсатора; рекомендуемый масштаб по осям абсцисс и ординат $0,001 \text{ Ом}^{-1}/\text{см}$. Для полученного в опыте значения входного напряжения подсчитайте активный и реактивный токи; в прежних масштабах постройте векторную диаграмму, отметьте на ней угол разности фаз между входным напряжением и током.

3. Подсчитайте сопротивление резистора, сравните с данными стенда. Отрезком на горизонтальной оси изобразите сопротивление резистора и двумя сонаправленными векторами – его векторную диаграмму.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы замещения катушки, конденсатора и резистора.
3. Схема опыта с указанием типов приборов.
4. Вычисления параметров катушки, конденсатора и резистора.
5. Треугольники сопротивлений и проводимостей исследуемых элементов.
6. Векторные диаграммы токов и напряжений.
7. Выводы о соответствии опытных результатов и данных стенда, а также о качестве элементов по результатам расчета добротности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните физический смысл параметров схем замещения катушки и конденсатора.
2. Объясните построение треугольников сопротивлений и проводимостей катушки и конденсатора и их векторных диаграмм.
3. В чем состоит отличие реальных катушки и конденсатора от идеальных?
4. Как соотносятся по фазе напряжение и ток в катушке? В конденсаторе? В резисторе?
5. Как по данным опыта для резистора оценить точность измерения его напряжения, тока и мощности?

РЕЗОНАНС

Цель работы: изучение явления резонанса в цепи, состоящей из последовательно и параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора; исследование зависимости режима цепи от величины емкости конденсатора.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Резонанс – это явление полной взаимной компенсации реактивных емкостных и индуктивных сопротивлений или проводимостей в электрической цепи. Эквивалентное входное сопротивление или проводимость цепи имеют при резонансе чисто резистивный характер. Наиболее ярко резонанс проявляется в цепи, состоящей из последовательно или параллельно соединенных конденсатора и катушки индуктивности.

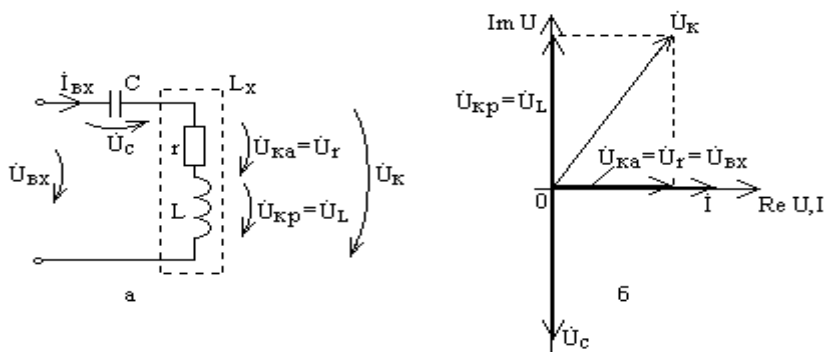


Рисунок 1 – Последовательная RLC-цепь и ее векторная диаграмма

В цепи, состоящей из последовательно соединенных конденсатора и катушки индуктивности (рисунок 1,а) входное сопротивление имеет вид: $Z = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$, где r – сопротивление обмотки катушки. Условие резонанса заключается в равенстве реактивного сопротивления нулю: $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. При неизменной частоте напряжения и параметрах катушки режима резонанса можно достичь подбором емкости

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L}. \quad (1)$$

В режиме резонанса полное сопротивление цепи определяется только активным сопротивлением обмотки катушки $z = r$ и минимально; а ток принимает максимальное значение $I = \frac{U}{z} = \frac{U}{r}$. Напряжение на конденсаторе $\dot{U}_C = -j\frac{1}{\omega C}I$ и реактивное напряжение на катушке $\dot{U}_{Kp} = \dot{U}_L = j\omega LI$ равны по величине и противофазны (рисунок 1,б), поэтому компенсируют друг друга: $\dot{U}_C + \dot{U}_{Kp} = 0$. Резонанс в такой цепи называется резонансом напряжений.

Входное напряжение совпадает с активной составляющей напряжения на катушке, т.е. с напряжением на активном сопротивлении обмотки $\dot{U}_{BX} = \dot{U}_{Ka} = \dot{U}_r = rI$.

Характеристическое сопротивление цепи $\rho = \frac{1}{\omega C_p} = \omega L$ совпадает с индуктивным сопротивлением катушки; добротность цепи также совпадает с добротностью катушки $Q = \frac{\rho}{r}$. Добротность показывает, во сколько раз напряжение на конденсаторе и реактивное напряжение катушки превышают входное напряжение $Q = \frac{U_C}{U} = \frac{U_{KP}}{U}$.

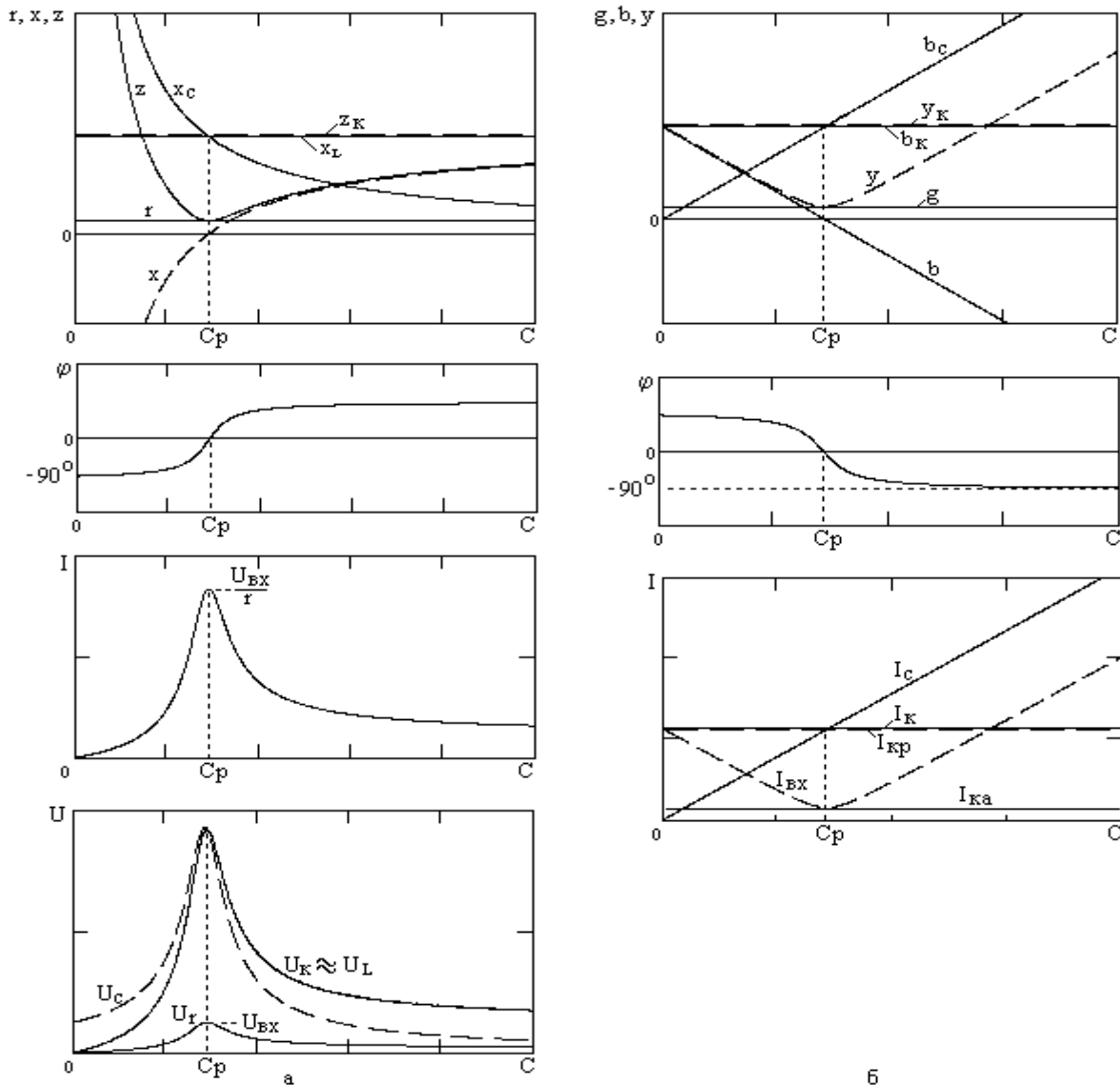


Рисунок 2 – Зависимости параметров режима последовательной а) и параллельной б) RLC – цепей от емкости

Графики параметров режима цепи при изменении емкости C от 0 до ∞ показаны на рисунке 2,а: индуктивное (реактивное) сопротивление катушки $x_L = x_K = \omega L$; емкостное сопротивление конденсатора $x_C = \frac{1}{\omega C}$; реактивное сопротивление цепи $x = x_L - x_C$; полное сопротивление цепи $z = \sqrt{r^2 + x^2}$; угол разности фаз между входным напряжением и током $\varphi = \arctg \frac{x}{r}$; ток в цепи $I = \frac{U}{z}$; напряжение на конденсаторе $U_C = x_C I$; активное напряжение катушки $U_{KA} = U_r = rI$; реактивное на-

пряжение катушки $U_{KP} = U_L = x_L I$; общее напряжение на катушке $U_K = z_K I$, где $z_K = \sqrt{r^2 + x_L^2}$ – полное сопротивление катушки. При нулевой емкости $I = 0$; $U_K = 0$; $U_C = U_{BX}$; при очень большой емкости $I = \frac{U}{z_K}$; $U_C = 0$; $U_K = U_{BX}$.

В цепи, состоящей из параллельно соединенных конденсатора и катушки индуктивности (рисунок 3,а) входная проводимость имеет вид

$$Y = Y_K + Y_C = \frac{1}{r + j\omega L} + j\omega C = \frac{r}{z_K^2} - j\left(\frac{\omega L}{z_K^2} - \omega C\right) = g - jb.$$

Условие резонанса заключается в равенстве реактивной проводимости нулю:

$b = \omega C - \frac{\omega L}{z_K^2} = 0$. При неизменных частоте напряжения и параметрах катушки режима резонанса можно достичь подбором емкости

$$C_p = \frac{L}{z_K^2}. \quad (2)$$

В режиме резонанса полная проводимость цепи определяется выражением $y = \sqrt{g^2 + b^2} = g$ и минимальна, поэтому входной ток также минимален

$I = yU = gU = \frac{r}{z_K^2} U$. Ток в конденсаторе $I_C = j\omega C U$ и реактивный ток в катушке

$I_{KP} = -j\frac{\omega L}{z_K^2} U$ равны по величине и противофазны (рисунок 3,б), поэтому компенсируют друг друга: $I_C + I_{KP} = 0$. Резонанс в такой цепи называется резонансом токов. Входной ток совпадает с активной составляющей тока в катушке, т.е. с током в

активной проводимости катушки $I_{BX} = I_{KA} = gU$; добротность цепи $Q = \frac{b_C}{g} = \frac{\omega C z_K^2}{r}$

показывает, во сколько раз ток в конденсаторе и реактивный ток катушки превышают входной ток $Q = \frac{I_C}{I_{BX}} = \frac{I_{KP}}{I_{BX}}$.

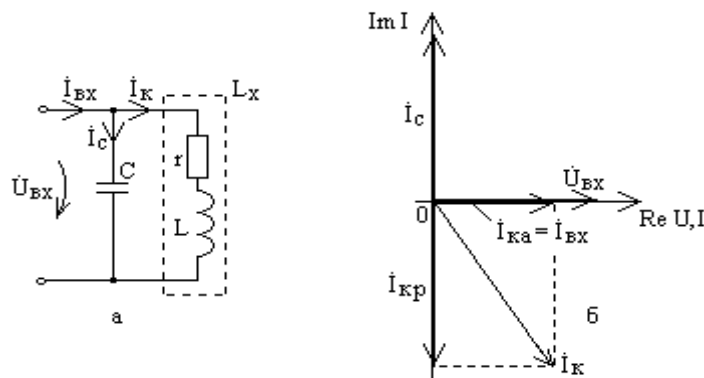


Рисунок 3 – Параллельное соединение катушки и конденсатора

Графики параметров режима цепи при изменении емкости C от 0 до ∞ показаны

на рисунке 2,б: индуктивная (реактивная) проводимость катушки $b_L = b_K = \frac{\omega L}{z_K^2}$; емкостная проводимость конденсатора $b_C = \omega C$; реактивная проводимость цепи $b = b_L - b_C$; полная проводимость цепи $y = \sqrt{g^2 + b^2}$; угол разности фаз между входными напряжением и током $\varphi = \arctg \frac{-b}{g}$; ток в цепи $I = yU$; ток в конденсаторе $I_C = \omega CU$; активный ток катушки $I_{KA} = I_g = gU$; реактивный ток катушки $I_{KP} = I_{bL} = \frac{\omega L}{z_K^2} U$; общий ток катушки $I_K = y_K U$, где $y_K = \sqrt{g^2 + b_K^2}$ – полная проводимость катушки. При нулевой емкости $I_C = 0$; $I_K = I_{BX} = y_K U$; при очень большой емкости $I_{BX} \rightarrow I_C$ и неограниченно нарастает. Ток в катушке и его составляющие в этой схеме не зависят от емкости.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Входное напряжение подается с регулятора переменного напряжения. Катушка индуктивности обозначена L_X , запишите ее индуктивность и сопротивление обмотки. Для измерения тока используется аналоговый амперметр с пределом 1...2 А типа Э377. Для измерения напряжения применяется цифровой вольтметр Щ4313 Переменная емкость набирается на батарее конденсаторов.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Для исследования резонанса напряжений соберите схему по рисунку 4,а. Подсчитайте резонансную емкость C_p по выражению (1). Наберите на батарее конденсаторов резонансную емкость, входное напряжение поддерживайте на заданном неизменном уровне. Измерьте параметры резонансного режима: ток, напряжения на конденсаторе U_C и катушке U_K , обратите внимание на то, что эти напряжения близки по величине и гораздо больше входного; входной ток также велик. Данные занесите в таблицу 1.

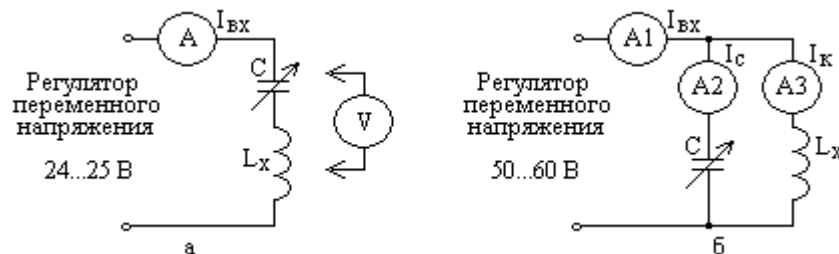


Рисунок 4 – Схемы экспериментов

Отстройтесь от резонанса, установив на батарее конденсаторов еще несколько значений емкостей: $C_1 < C_p$ (например, 12 мкФ), $C_2 > C_p$ (например, 25 мкФ), $C_3 > C_2$ (например, 35 мкФ), $C = 0$ (выключите все конденсаторы), $C \rightarrow \infty$ (для имитации этого режима замкните контакты батареи конденсаторов проводником (почему?)).

Занесите результаты измерений тока и напряжений в таблицу 1, обратите внимание на снижение уровней напряжений и тока при отстройке схемы от резонанса. Во время опыта не забывайте поддерживать входное напряжение на заданном неизменном уровне.

Таблица 1 – Экспериментальное исследование резонанса напряжений

C , мкФ	0	$C_1 < C_p$	C_p	$C_2 > C_p$	$C_3 > C_2$	$C \rightarrow \infty$
I , А						
U_C , В						
U_K , В						

2. Для исследования резонанса токов соберите схему по рисунку 4,б. Подсчитайте резонансную емкость C_p по выражению (2). Наберите на батарее конденсаторов резонансную емкость, входное напряжение поддерживайте на заданном неизменном уровне. Измерьте параметры резонансного режима: входной ток, ток на конденсаторе I_C и катушке I_K , обратите внимание на то, что эти токи близки по величине и гораздо больше входного; входной ток в этом режиме мал. Данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2 – Экспериментальное исследование резонанса токов

C , мкФ	0	$C_1 < C_p$	C_p	$C_2 > C_p$	$C_3 > C_2$
I_{BX} , А					
I_C , А					
I_K , А					

Отстройтесь от резонанса, установив на батарее конденсаторов еще несколько значений емкостей: $C_1 < C_p$ (например, 12 мкФ), $C_2 > C_p$ (например, 25 мкФ), $C_3 > C_2$ (например, 35 мкФ), $C = 0$ (выключите все конденсаторы). Занесите результаты измерений токов в таблицу 2, обратите внимание на увеличение входного тока при отстройке схемы от резонанса. Во время опыта не забывайте поддерживать входное напряжение на заданном неизменном уровне.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным опыта 1 для всех емкостей подсчитайте емкостное сопротивление конденсатора x_C ; индуктивное x_L и полное z_K сопротивления катушки; реактивное $x = x_L - x_C$ и полное z сопротивления цепи; угол разности фаз между напряжением и током φ ; ток I ; напряжение на конденсаторе U_C ; активное U_{KA} , реактивное U_{KP} и общее U_K напряжения на катушке. Результаты занесите в таблицу 3.

Таблица 3 – Расчетные параметры режима последовательной цепи

C , мкФ	0	$C_1 < C_p$	C_p	$C_2 > C_p$	$C_3 > C_2$	$C \rightarrow \infty$
x_C , Ом						
x , Ом						
z , Ом						
φ , град						
I , А						
U_C , В						
U_{KA} , В						
U_{KP} , В						
U_K , В						

По данным таблицы 3 постройте теоретические графики зависимостей всех этих параметров от емкости; рекомендуемые масштабы: по сопротивлению 50 Ом/см; по напряжению 20 В/см; по току 0,2 А/см; по углу 30 град/см; по емкости 4 мкФ/см. Нанесите на графики опытные точки тока и напряжений по таблице 1. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов. Для резонансного режима постройте треугольник сопротивлений и векторную диаграмму тока и напряжений, подсчитайте добротность цепи.

2. По данным опыта 2 для всех емкостей подсчитайте емкостную проводимость b_C ; активную g , реактивную b_K и полную y_K проводимости катушки; реактивную b и полную y проводимости цепи; угол разности фаз между входным напряжением и током; ток в емкости I_C ; активный I_{KA} , реактивный I_{KP} и общий ток I_K катушки, а также входной ток цепи I_{BX} . Все эти результаты занесите в таблицу 4.

Таблица 4 – Расчетные параметры режима параллельной цепи

C , мкФ	0	$C_1 < C_p$	C_p	$C_2 > C_p$	$C_3 > C_2$
b_C , См					
b , См					
y , См					
φ , град					
I_C , А					
I_{BX} , А					

По данным таблицы 4 постройте теоретические графики зависимостей всех этих параметров от емкости; рекомендуемые масштабы: по проводимости 0,001 См/см; по току 0,2 А/см; по углу 30 град/см; по емкости 4 мкФ/см. Нанесите на графики опытные точки токов по таблице 2. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов. Для резонансного режима постройте треугольник проводимостей и векторную диаграмму токов и напряжения, подсчитайте добротность цепи.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы последовательной и параллельной цепей, расчетные формулы.
3. Схемы опытов с указанием типов приборов, таблицы 1 и 2 с опытными данными, сопротивление обмотки катушки и ее индуктивность.
4. Таблицы 3 и 4 с расчетными данными, расчетные графики с нанесенными на них опытными точками, треугольники сопротивлений и проводимостей, векторные диаграммы токов и напряжений.
5. Выводы о соответствии опытных и расчетных результатов, а также о влиянии емкости на характер и величину входных сопротивлений и проводимости и на режимы работы последовательной и параллельной цепей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково общее условие резонанса?
2. Почему в последовательной цепи ток в режиме резонанса максимален, а в параллельной - минимален?
3. Чем определяется острота графика тока?
4. Почему в режиме резонанса напряжение на конденсаторе и катушке в последовательной цепи гораздо больше входного?
5. Каков характер эквивалентного сопротивления обеих цепей при разных емкостях?
6. Почему графики напряжения на емкости и реактивного напряжения на катушке в последовательной цепи пересекаются при C_p ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЦЕПИ СО ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИЕЙ

Цель работы: определение параметров магнитосвязанных обмоток; анализ последовательного согласного и встречного соединения таких обмоток; исследование режима работы простейшего трансформатора.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Магнитная связь между обмотками на магнитопроводе устанавливается системой точек, указывающих начала обмоток, и коэффициентом взаимной индукции M , который есть коэффициент пропорциональности между магнитным потокосцеплением одной обмотки и вызывающим его током другой обмотки; например, для пары обмоток: $\Psi_{21} = M_{21}i_1$ – магнитное потокосцепление во второй обмотке, вызываемое током первой обмотки; $\Psi_{12} = M_{12}i_2$ – потокосцепление в первой обмотке от тока во второй. Обычно $M_{12} = M_{21} = M$.

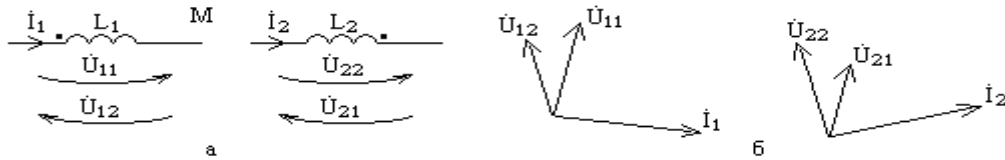


Рисунок 1 – Магнитная связь между обмотками

В режиме переменного тока между магнитосвязанными обмотками существует комплексное сопротивление взаимной индукции $Z_M = j\omega M$, и в этих обмотках возникают напряжения взаимной индукции: $\dot{U}_{21} = Z_M \dot{I}_1$ – напряжение, возникающее во второй обмотке от влияния тока в первой обмотке; аналогично $\dot{U}_{12} = Z_M \dot{I}_2$ – напряжение в первой обмотке от тока во второй. Напряжения взаимной индукции ориентированы относительно начал обмоток так же, как вызывающие их токи, рисунок 1,а и опережают их по фазе на 90° , рисунок 1,б. На рисунке обозначены напряжения самоиндукции $\dot{U}_{11} = Z_{L1} \dot{I}_1$; $\dot{U}_{22} = Z_{L2} \dot{I}_2$ и напряжения взаимной индукции $\dot{U}_{21}$, $\dot{U}_{12}$.

Полноту связи между обмотками характеризует коэффициент магнитной связи $k_M = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$, который меньше единицы из-за рассеяния магнитного потока. Рассеяние характеризуется индуктивностями рассеяния L_{S1} , L_{S2} .

Коэффициент взаимной индукции, сопротивления и индуктивности магнитосвязанных обмоток обычно определяются экспериментально, рисунок 2.

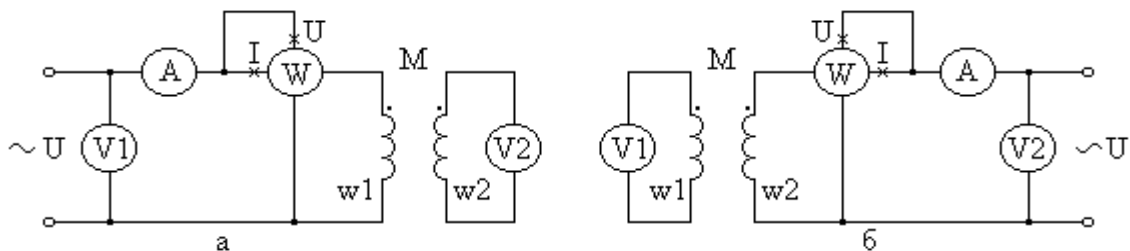


Рисунок 2 – Экспериментальное определение параметров магнитосвязанных катушек: а) прямое включение; б) обратное включение

В опыте прямого включения (рисунок 2,а) в первой обмотке измеряется ток I_1 , напряжение U_1 и активная мощность P . Вторая обмотка находится в режиме холостого хода, и в ней измеряется напряжение взаимной индукции $U_{21} = \omega M_{21} \cdot I_1$. Отсюда получаем $M_{21} = \frac{U_{21}}{\omega I_1}$. Далее получаем полное сопротивление первой обмотки

$z_1 = \frac{U_1}{I_1}$; активное и реактивное сопротивления этой обмотки $r_1 = \frac{P}{I_1^2}$; $x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}$ и ее индуктивность $L_1 = \frac{x_1}{\omega}$. Из опыта обратного включения, (рисунок 2,б) определяем

$M_{12} = \frac{U_{12}}{\omega I_2}$; $z_2 = \frac{U_2}{I_2}$; $r_2 = \frac{P_2}{I_2^2}$; $x_2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}$; $L_2 = \frac{x_2}{\omega}$. Коэффициент взаимной индук-

ции обычно усредняется $M = \frac{M_{12} + M_{21}}{2}$. Индуктивности рассеяния находятся из выражений $L_{S1} = L_1 - \frac{w_1}{w_2} M$; $L_{S2} = L_2 - \frac{w_2}{w_1} M$.

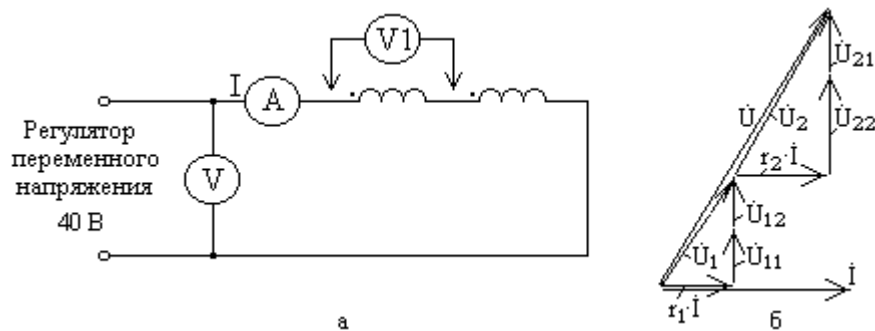


Рисунок 3 – Последовательное согласное соединение магнитосвязанных обмоток

Наиболее эффектно свойства магнитосвязанных обмоток проявляются при их последовательном соединении, когда они обтекаются одним и тем же током. Последовательное согласное соединение изображено на рисунке 3,а. В соответствии со вторым законом Кирхгофа получаем

$$\dot{U}_{BX} = r_1 I + j\omega L_1 I + j\omega M \cdot I + r_2 I + j\omega L_2 I + j\omega M \cdot I.$$

Эквивалентная индуктивность цепи $L_{\text{ЭКВС}} = L_1 + L_2 + 2M$ и эквивалентное сопротивление $Z_C = r_1 + r_2 + j\omega L_{\text{ЭКВС}}$ велики, а ток $I = \frac{\dot{U}_{BX}}{Z_C}$ в схеме мал. Векторная диаграмма напряжений при условии, что начальная фаза тока принята нулевой, изображена на рисунке 3,б.

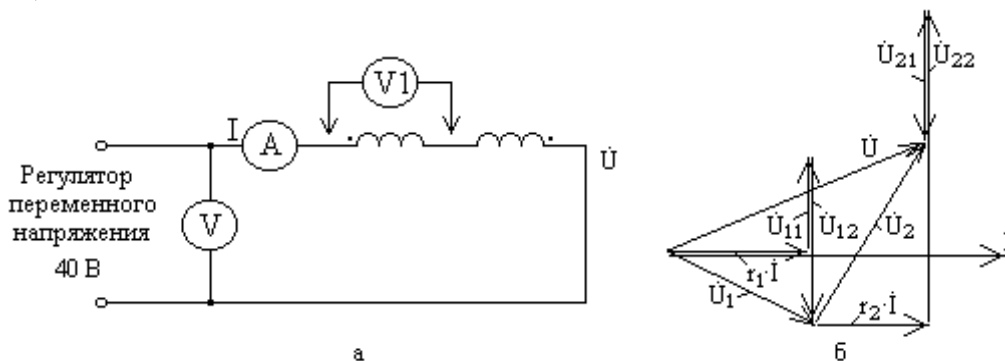


Рисунок 4 – Последовательное встречное соединение магнитосвязанных обмоток

Последовательное встречное соединение изображено на рисунке 4,а. Здесь напряжения взаимной индукции ориентированы встречно току и компенсируют напряжения самоиндукции

$$\dot{U}_{BX} = r_1 I + j\omega L_1 I - j\omega M \cdot I + r_2 I + j\omega L_2 I - j\omega M \cdot I.$$

Эквивалентная индуктивность цепи $L_{\text{ЭКВВ}} = L_1 + L_2 - 2M$ и эквивалентное сопротивление $Z_B = r_1 + r_2 + j\omega L_{\text{ЭКВВ}}$ малы, и ток $I = \frac{\dot{U}_{BX}}{Z_B}$ в схеме велик. Векторная диаграм-

ма напряжений при условии, что начальная фаза тока принята нулевой, изображена на рисунке 4,б.

На этой диаграмме хорошо заметен эффект ложной емкости, который проявляется в том, что на первой катушке напряжение отстает от тока, т.е. первая обмотка ведет себя как емкость. Это происходит из-за полной компенсации собственного индуктивного напряжения этой обмотки напряжением взаимной индукции от второй обмотки. Эквивалентное реактивное сопротивление первой обмотки $x_{\Sigma 1} = x_1 - x_M < 0$; эквивалентная «ложная» емкость первой обмотки находится из

$$\text{выражения } jx_{\Sigma 1} = -j \frac{1}{\omega C_{\Sigma 1}} \rightarrow C_{\Sigma 1} = \frac{1}{\omega x_{\Sigma 1}}.$$

Важнейшим устройством, основанным на явлении взаимной индукции, является трансформатор. На рисунке 5,а изображена схема включения простейшего трансформатора на резистивную нагрузку. Уравнения трансформатора в соответствии со вторым законом Кирхгофа имеют вид (обратите внимание на то, что $\dot{U}_H = r_H I_2 = -\dot{U}_2$ вследствие принятых условных положительных направлений напряжений и токов)

$$\dot{U}_1 = r_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M \cdot I_2; \dot{U}_2 = j\omega M \cdot I_1 + r_2 I_2 + j\omega L_2 I_2.$$

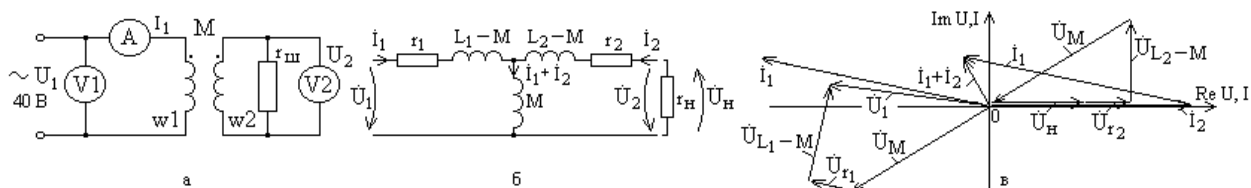


Рисунок 5 – Трансформатор: а) схема включения на резистивную нагрузку; б) Т–схема замещения; в) векторная диаграмма

Эти выражения представляют уравнения трансформатора как уравнения пассивного четырехполюсника для Z – параметров, в соответствии с которыми T – схема замещения трансформатора изображена на рисунке 5,б, а ее векторная диаграмма при условии равенства нулю начальной фазы тока I_2 – на рисунке 5,в. Для рассматриваемого трансформатора индуктивность $L_1 - M$ отрицательна, и вследствие эффекта ложной емкости напряжение на этой индуктивности отстает от тока I_1 . По T – схеме удобно анализировать различные эксплуатационные и аварийные режимы трансформатора.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Число витков первой обмотки $w_1 = 1444$; второй $w_2 = 1810$. Для измерения тока применяется аналоговый амперметр Э377 с пределом 1А; для измерения напряжения – цифровой вольтметр Щ4113. Мощность измеряется переносным ваттметром Д522.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Для определения параметров магнитосвязанных обмоток соберите схему по рисунку 2,а. Измерьте входные ток I_1 , мощность P_1 и напряжение взаимной индукции U_{21} при входном напряжении $U_1 = 40$ В промышленной частоты. Сбросьте входное напряжение на нуль, пересоедините катушки для обратного включения согласно рисунку 2,б и измерьте ток I_2 , мощность P_2 и напряжение взаимной индукции U_{12} при напряжении $U_2 = 40$ В. Для контроля запишите величины активных сопротивлений обмоток.

2. Для исследования последовательного соединения согласно включенных обмоток соберите схему по рисунку 3,а. Измерьте входной ток и напряжения на обмотках U_1, U_2 при входном напряжении 40 В. Вы заметите, что ток в этой цепи мал. Для анализа последовательного соединения встречно включенных обмоток соберите схему по рисунку 4,а, для чего при выведенном на нуль входном напряжении переключите контакты второй обмотки наоборот. Установите напряжение 40 В и измерьте ток и напряжения на обмотках; Вы заметите, что они превышают величину входного напряжения, а ток велик.

3. Для анализа работы трансформатора под резистивной нагрузкой соберите схему по рисунку 5,а; измерьте входной ток I_1 и выходное напряжение, запишите сопротивление нагрузки r_{III} . Обратите внимание на то, что хотя трансформатор и повышающий ($w_1 < w_2$), напряжение на выходе меньше, чем на входе из-за большого падения напряжения на внутреннем сопротивлении трансформатора.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным опыта 1 определите коэффициент взаимной индукции M , как среднее значение при прямом и обратном включении обмоток. Определите активное сопротивление обмоток r_1, r_2 , индуктивности обмоток L_1, L_2 , индуктивности рассеяния L_{S1}, L_{S2} и коэффициент магнитной связи k_M .

2. По данным опыта 2 для схемы с последовательным согласным и встречным включением обмоток подсчитайте эквивалентные индуктивности, входные сопротивления, входной ток и напряжения на обмотках. Сравните опытные и расчетные результаты. Постройте векторные диаграммы напряжений и токов для согласного и встречного соединений обмоток (рекомендуемые масштабы: по напряжению 5 В/см; по току 0,1 А/см). Определите разность фаз между напряжением и током на обеих обмотках; подсчитайте ложную емкость первой обмотки при встречном соединении. Сделайте выводы о влиянии способа соединения обмоток на режим их коллективной работы.

3. Подсчитайте параметры Т-схемы замещения трансформатора. Выполните расчет режима трансформатора при входном напряжении 40 В под нагрузкой r_{III} (наиболее удобно здесь применение метода пропорционального пересчета с предварительным заданием тока $I_2 = 1$ А). Сравните опытные и расчетные результаты; постройте векторную диаграмму токов и напряжений трансформатора под резистивной нагрузкой. Сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схемы экспериментов с указанием типов приборов и опытные данные по определению параметров магнитосвязанных катушек, их сравнение с данными стенда, выводы о соответствии опытных данных и данных стенда.
3. Схемы экспериментов с указанием типов приборов и опытные данные по исследованию последовательного соединения согласно и встречно включенных обмоток, расчеты режима коллективной работы таких обмоток, векторные диаграммы тока и напряжений, расчет ложной емкости, выводы о сравнении опытных и расчетных результатов, а также сравнительные выводы о влиянии соединения обмоток на режим их коллективной работы.
3. Схема эксперимента с указанием типов приборов по исследованию режима трансформатора, Т-схема замещения трансформатора, расчет режима по этой схеме, векторная диаграмма токов и напряжений трансформатора.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните физический смысл коэффициента взаимной индукции.
2. Оцените глубину магнитной связи между обмотками.
3. Как зависит характер эквивалентного сопротивления последовательного соединения обмоток от их согласного и встречного включения?
4. В чем состоит эффект ложной емкости?
5. В чем особенность построения векторных диаграмм напряжений согласного и встречного соединения обмоток?
6. Объясните принцип действия трансформатора.
7. Объясните построение Т-схемы замещения трансформатора.
8. Объясните построение векторной диаграммы трансформатора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННЫЕ В ЗВЕЗДУ

Цель работы: исследование симметричных, несимметричных и аварийных режимов трехфазной цепи, соединенной по схеме «звезда – звезда» с нулевым и без нулевого провода.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – звезда», состоит из трех источников ЭДС e_A, e_B, e_C и нагрузки r_a, r_b, r_c , соединенных тремя линейными проводами a, b, c и нейтральным (нулевым) проводом (рисунок 1,а). В линейных проводах протекают линейные токи I_a, I_b, I_c , которые в рассматриваемой цепи совпадают с фазными токами нагрузки. Далее не будем учитывать сопротивления проводов и нейтрального провода, а сопротивление нагрузки будем полагать чисто резистивным.

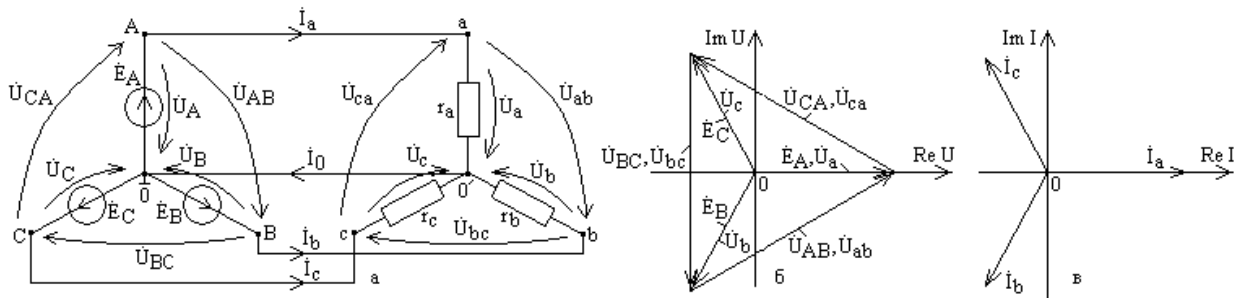


Рисунок 1 – Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – звезда» и ее векторные диаграммы напряжений и токов в симметричном режиме

Все три ЭДС равны между собой по величине $E_A = E_B = E_C = E$, смещены на 120° друг по отношению к другу и образуют симметричный трехфазный источник напряжения. В комплексной форме ЭДС имеют вид: $\dot{E}_A = E$; $\dot{E}_B = E e^{-j120^\circ}$; $\dot{E}_C = E e^{j120^\circ}$, рисунок 1,б. Между точками A и 0 возникает фазное напряжение источника $\dot{U}_A = \dot{E}_A$; между точками B и 0 – фазное напряжение $\dot{U}_B = \dot{E}_B$; между C и 0 – фазное напряжение $\dot{U}_C = \dot{E}_C$. Между точками A и B возникает линейное напряжение источника $\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$; между точками B и C – линейное напряжение $\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C$; между точками C и A – линейное напряжение $\dot{U}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A$, рисунок 1,б. Все фазные напряжения источника равны между собой по величине; все линейные напряжения источника также равны между собой по величине и превосходят фазные в $\sqrt{3}$.

Нагрузка, соединенная в звезду, состоит из трех сопротивлений r_a, r_b, r_c , одинаковых при симметричной нагрузке $r_a = r_b = r_c = r$. На каждом сопротивлении нагрузки возникает фазное напряжение нагрузки: $\dot{U}_a = r_a \dot{I}_a$; $\dot{U}_b = r_b \dot{I}_b$; $\dot{U}_c = r_c \dot{I}_c$; между выводами фаз a, b нагрузки существует линейное напряжение $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b$; между выводами b, c – линейное напряжение $\dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c$; между выводами c, a – линейное напряжение $\dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a$.

Если не учитывать сопротивления проводов, то линейные напряжения источника и нагрузки всегда равны между собой: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}$; $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}$; $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}$. При симметричной нагрузке все фазные напряжения равны между собой по величине, все линейные напряжения также равны между собой и превышают фазные в $\sqrt{3}$; также равны между собой фазные напряжения источника и нагрузки: $\dot{U}_A = \dot{U}_a$; $\dot{U}_B = \dot{U}_b$; $\dot{U}_C = \dot{U}_c$. Потенциал нейтральной точки симметричной нагрузки всегда равен нулю.

При симметричной нагрузке режим работы цепи не зависит от наличия нейтрального провода; токи образуют правильную трехлучевую звезду (рисунок 1,в) и определяются по закону Ома

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{r_a}; \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{r_b}; \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{r_c}. \quad (1)$$

При наличии нейтрального провода ток в нем равен нулю.

Если нагрузка несимметричная, то режим работы зависит от присутствия нейтрального провода. При наличии этого провода потенциал нейтральной точки $\phi_0 = 0$; фазные напряжения нагрузки по-прежнему равны соответствующим фазным

напряжениям источника, токи определяются по закону Ома (1). Вследствие несимметрии нагрузки эти токи уже не образуют правильной звезды, и возникает уравнивающий ток нейтрального провода $I_0 = I_a + I_b + I_c$.

При отсутствии нейтрального провода потенциал нейтральной точки нагрузки не равен нулю, возникает напряжение смещения нейтрали $U_{0'0} = \phi_{0'} - \phi_0 = \phi_{0'}$, которое определяется в соответствии с уравнением узловых потенциалов

$$\left(\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_c} \right) \phi_{0'} = \frac{E_A}{r_a} + \frac{E_B}{r_b} + \frac{E_C}{r_c}. \quad (2)$$

Фазные напряжения нагрузки определяются разностями

$$\dot{U}_a = E_A - \phi_{0'}; \dot{U}_b = E_B - \phi_{0'}; \dot{U}_c = E_C - \phi_{0'}.$$

Нормальный режим работы трехфазной цепи существует при симметричной нагрузке. В реальных условиях могут возникать несимметричные и аварийные режимы. Обычным несимметричным режимом является изменение сопротивления нагрузки одной из фаз. Например, в условиях отсутствия нейтрального провода при увеличении сопротивления фазы A вдвое $r_a = 2r$; $r_b = r_c = r$ потенциал нейтральной точки нагрузки в соответствии с (2) принимает значение $\phi_{0'} = -0,2E$; фазное напряжение $\dot{U}_a$ увеличивается $\dot{U}_a = 1,2E$, а фазные напряжения здоровых фаз уменьшаются до величины $0,2\sqrt{21} \cdot E$, рисунок 2,а. Фазный ток I_a уменьшается до значения $0,6 \frac{E}{r}$, токи в здоровых фазах – до значения $0,2\sqrt{21} \frac{E}{r}$.

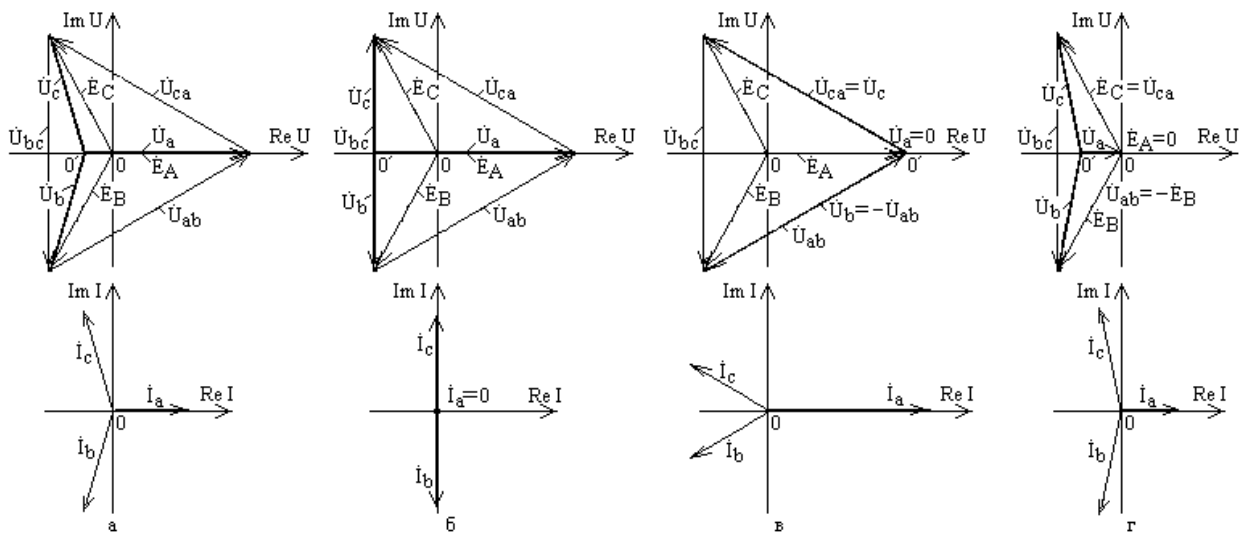


Рисунок 2 – Векторные диаграммы несимметричных режимов трехфазной цепи:

- а) удвоение сопротивления в фазе А; б) обрыв нагрузки в фазе А;
в) короткое замыкание нагрузки в фазе А; г) выпадение фазы А источника

При аварийном обрыве нагрузки фазы A $r_a \rightarrow \infty$; потенциал нейтральной точки в соответствии с (1) принимает значение $\phi_{0'} = -0,5E$, рисунок 2,б. Напряжения на здоровых фазах сокращаются до значений $\frac{\sqrt{3}}{2} E$; токи – до значений $\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{E}{r}$; напряжение на обрыве фазы A увеличивается в полтора раза $\dot{U}_a = 1,5E$ по сравнению с симметричным режимом.

При аварийном коротком замыкании нагрузки фазы A $r_a = 0$, потенциал нейтральной точки нагрузки становится равным ЭДС фазы A $\phi_0 = E$ (нейтраль садится на фазу), рисунок 2,в. Фазные напряжения на здоровых фазах увеличиваются до значений линейных напряжений $\sqrt{3}E$, а фазные токи – до значений $\sqrt{3} \frac{E}{r}$. Ток в короткозамкнутой фазе определяется из первого закона Кирхгофа $I_a = -I_b - I_c = 3 \frac{E}{r}$, т.е. возрастает в три раза по сравнению с симметричным режимом.

Еще одним распространенным аварийным режимом в условиях симметрии нагрузки является нарушение симметрии источника питания, связанное с потерей напряжения фазной ЭДС (выпадение фазы), например, $E_A = 0$, что приводит к снижению линейных напряжений $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{CA}$ в $\sqrt{3}$ раз до величины E . При симметричной нагрузке в соответствие с (2) потенциал нейтральной точки $\phi_0 = -\frac{1}{3}E$, рисунок 2,г; напряжение и ток фазы A уменьшаются втрое по сравнению с симметричным режимом: $\dot{U}_a = \frac{1}{3}E$; $I_a = \frac{1}{3} \frac{E}{r}$. Напряжения на здоровых фазах сокращаются до значений $\frac{\sqrt{7}}{3}E$; а токи – до значений $\frac{\sqrt{7}}{3} \frac{E}{r}$.

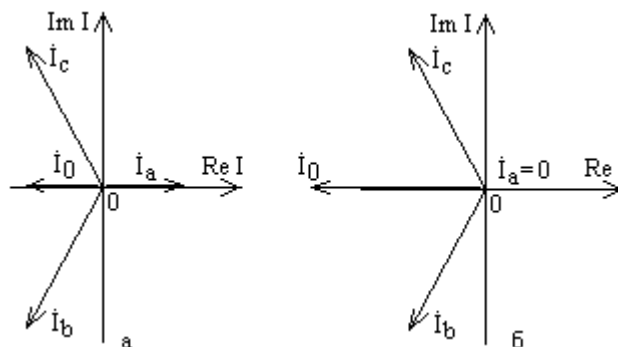


Рисунок 3 – Векторные диаграммы токов несимметричных режимов трехфазной цепи с нейтральным проводом

Если в цепи присутствует нейтральный провод, то несимметрия нагрузки (обрыв или изменение сопротивления фаз) не изменяет фазных напряжений нагрузки и не нарушает их симметрии, изменяются лишь соответствующие фазные токи, и возникает ток нейтрального провода. Так, при увеличении вдвое сопротивления в фазе A

$I_a = \frac{E}{2r}$; токи в здоровых фазах не изменяются по сравнению с симметричным режимом, ток в нейтральном проводе $I_0 = -\frac{E}{2r}$ компенсирует убывание тока в фазе A , рисунок 3,а. При обрыве нагрузки фазы A или при выпадении этой фазы ток нейтрального провода принимает значение $I_0 = -\frac{E}{r}$ и компенсирует исчезновение тока $I_a = 0$, рисунок 3,б. Режим короткого замыкания в фазе A в рассматриваемой цепи является катастрофическим и недопустим. Таким образом, нейтральный провод обеспечивает независимость работы фаз при изменении сопротивлений нагрузки,

что положительно сказывается на работе нагрузок, присоединенных к отдельным фазам.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде (А301). В качестве источника питания применяется трехфазное напряжение 127/220 В промышленной частоты: $E_A = E_B = E_C = E = 127 \text{ В}$. В качестве фазной нагрузки применяется параллельное соединение одинаковых резисторов $R_1, R_2; R_3, R_4; R_5, R_6$, каждый из которых имеет сопротивление 500 Ом. Таким образом, симметричная трехфазная нагрузка имеет вид $r_a = r_b = r_c = r = 250 \text{ Ом}$. Для измерения токов применяются аналоговые амперметры с пределом 3 А; напряжения измеряются аналоговым вольтметром с пределом 500 В.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Для исследования симметричного режима трехфазной цепи соберите схему по рисунку 4,а. Измерьте фазные напряжения источника $U_A = E_A; U_B = E_B; U_C = E_C$, убедитесь, что они близки к 127 В. Внесите их значения в таблицу 1 в теоретическую строку симметричного режима. Это значение E будет теоретической базой для дальнейшего анализа. Измерьте линейные напряжения источника U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ; убедитесь, что они также одинаковы, больше фазных в $\sqrt{3}$ и близки к 220 В. Впишите их значения также в теоретическую строку симметричного режима таблицы 1.

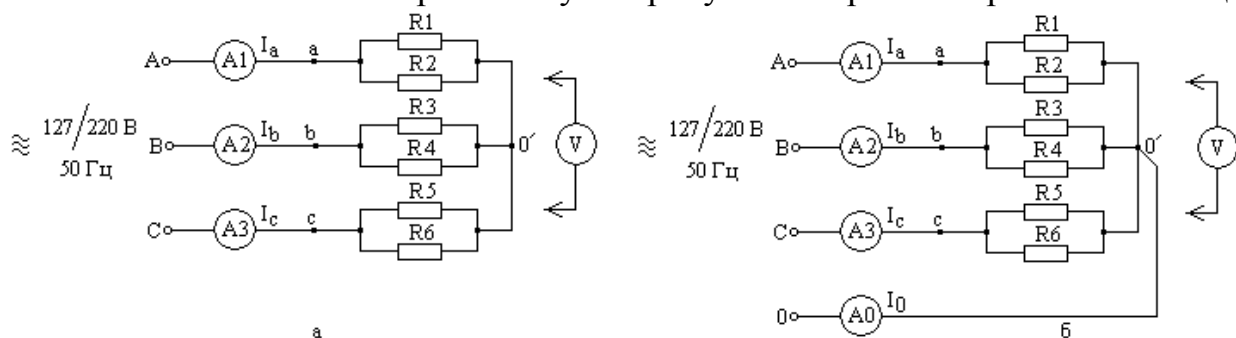


Рисунок 4 – Схемы эксперимента: а) трехфазная цепь без нейтрального провода; б) трехфазная цепь с нейтральным проводом

Измерьте фазные напряжения нагрузки U_a, U_b, U_c , убедитесь, что они совпадают с фазными напряжениями источника и близки к 127 В. Измерьте линейные напряжения нагрузки U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , убедитесь, что они совпадают с линейными напряжениями источника. Измерьте напряжение смещения нейтрали U_0 между точками 0 и $0'$, убедитесь, что оно близко к нулю. Измерьте фазные (они же линейные) токи. Все результаты занесите в опытную строку симметричного режима таблицы 1.

2. Для исследования несимметричного режима в фазе А отключите один из резисторов нагрузки этой фазы, например, R_1 . Повторите измерения фазных и линейных токов и напряжений нагрузки, убедитесь, что симметрия напряжений и токов нарушена, а напряжение смещения нейтрали отлично от нуля. Результаты опыта занесите в таблицу 1.

3. Для имитации аварийного режима обрыва фазы A нагрузки отключите оба резистора. Повторите измерения напряжений и токов, в том числе и напряжения на оборванной фазе. Убедитесь, что это напряжение возросло, а ток в ней стал равным нулю. Данные занесите в таблицу 1.

Таблица 1 – Исследование трехфазной цепи «звезда–звезда» без нейтрального провода

Режим		U_a , В	U_b , В	U_c , В	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{ca} , В	U_0 , В	I_a , А	I_b , А	I_c , А
Симм.	Опыт										
	Теор.										
Несим. $r_a = 2r$	Опыт										
	Теор.										
Обрыв: $r_a \rightarrow \infty$	Опыт										
	Теор.										
КЗ: $r_a = 0$	Опыт										
	Теор.										
Выпаден. фазы A : $E_A = 0$	Опыт										
	Теор.										

4. Для имитации аварийного режима короткого замыкания отдельным проводником замкните выводы нагрузочных резисторов фазы A и повторите измерения. Вы заметите резкое увеличение токов нагрузки, напряжений на здоровых фазах и напряжения смещения нейтрали. Данные занесите в таблицу 1.

5. Для имитации аварийного режима выпадения фазы A источника при симметричной нагрузке удалите замыкающий проводник, восстановите симметрию нагрузки, освободите линейный провод a из клеммы питания A и подсоедините его к нейтральной точке питания 0 . Повторите измерения, убедитесь в снижении напряжений и токов нагрузки, особенно заметном в фазе A . Данные занесите в таблицу 1.

6. Для исследования режима цепи с нейтральным проводом соберите схему по рисунку 4,б; повторите измерения симметричного и несимметричного режимов, режимов обрыва нагрузки и выпадения фазы A . ВНИМАНИЕ! Опыт короткого замыкания в этой схеме выполнять не следует. Данные занесите в таблицу 2. Обратите внимание на симметрирующее действие нейтрального провода.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для симметричного режима рассчитайте теоретические значения фазных токов $I_a = I_b = I_c = \frac{E}{r}$. Рассчитайте фазные и линейные напряжения и токи, а также напряжение смещения нейтрали для остальных исследованных несимметричных и аварийных режимов. В качестве величины E принимайте значение фазных напряжений из теоретической строки симметричного режима.

Таблица 2 – Исследование трехфазной цепи «звезда–звезда» с нейтральным проводом

Режим		U_a , В	U_b , В	U_c , В	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{ca} , В	I_0 , А	I_a , А	I_b , А	I_c , А
Симм.	Опыт										
	Теор.										
Несим. $r_a = 2r$	Опыт										
	Теор.										
Обрыв: $r_a \rightarrow \infty$	Опыт										
	Теор.										
Выпаден. фазы A : $E_A = 0$	Опыт										
	Теор.										

На одном чертеже в масштабе 20 В/см постройте векторные диаграммы напряжений всех исследованных режимов (разными цветами); на другом чертеже в масштабе 0,2 А/см постройте векторные диаграммы токов всех режимов по расчетным данным. По каждому пункту экспериментов сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов, а также о влиянии несимметрии нагрузки и источника питания на режим работы цепи; выводы о последствиях аварий и о влиянии нейтрального провода.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема трехфазной цепи, соединенной в звезду, и основные расчетные формулы для определения фазных напряжений и токов.
3. Схемы всех экспериментов с указанием типов приборов.
4. Таблицы опытных и расчетных результатов.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов.
6. Выводы по каждому опыту о влиянии несимметрии нагрузки и источника питания на режим цепи; выводы о последствиях аварий, о влиянии нейтрального провода и о соответствии опытных и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы характерные признаки симметричного режима?
2. Каковы последствия увеличения сопротивления фазы нагрузки?
3. Каковы последствия обрыва фазы нагрузки?
4. Каковы последствия короткого замыкания фазы нагрузки?
5. Каковы последствия нарушения симметрии источника питания при выпадении фазы?
6. Какова роль нейтрального провода?
7. Почему в цепи с нейтральным проводом в режиме обрыва нагрузки и выпадения фазы ток нейтрального провода одинаков?

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННЫЕ В ТРЕУГОЛЬНИК

Цель работы: исследование симметричных, несимметричных и аварийных режимов трехфазной цепи, соединенной по схеме «звезда – треугольник».

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – треугольник», состоит из трех источников ЭДС e_A, e_B, e_C и нагрузки r_{ab}, r_{bc}, r_{ca} , соединенных тремя линейными проводами a, b, c (рисунок 1,а). В линейных проводах протекают линейные токи I_a, I_b, I_c . Далее не будем учитывать сопротивления проводов, а сопротивление нагрузки будем полагать чисто резистивным.

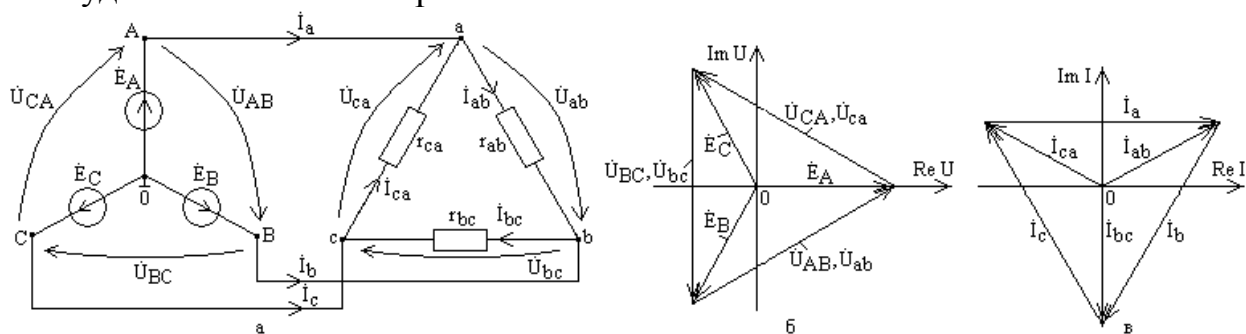


Рисунок 1 – Трехфазная цепь, соединенная по схеме «звезда – треугольник» и ее векторные диаграммы напряжений и токов в симметричном режиме

Все три ЭДС равны между собой по величине $E_A = E_B = E_C = E$, смещены на 120° друг по отношению к другу и образуют симметричный трехфазный источник напряжения. В комплексной форме ЭДС имеют вид: $E_A = E$; $E_B = Ee^{-j120^\circ}$; $E_C = Ee^{j120^\circ}$, рисунок 1,б. Между точками A и 0 возникает фазное напряжение источника $\dot{U}_A = \dot{E}_A$; между точками B и 0 – фазное напряжение $\dot{U}_B = \dot{E}_B$; между C и 0 – фазное напряжение $\dot{U}_C = \dot{E}_C$. Между точками A и B возникает линейное напряжение источника $\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$; между точками B и C – линейное напряжение $\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C$; между точками C и A – линейное напряжение $\dot{U}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A$, рисунок 1,б. Все фазные напряжения источника равны между собой по величине; все линейные напряжения источника также равны между собой по величине и превосходят фазные в $\sqrt{3}$.

Нагрузка, соединенная в треугольник, состоит из трех сопротивлений r_{ab}, r_{bc}, r_{ca} , одинаковых при симметричной нагрузке $r_{ab} = r_{bc} = r_{ca} = r$. В каждом сопротивлении нагрузки протекают фазные токи I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} и возникает фазное напряжение нагрузки: $\dot{U}_{ab} = r_{ab} I_{ab}$; $\dot{U}_{bc} = r_{bc} I_{bc}$; $\dot{U}_{ca} = r_{ca} I_{ca}$. Если не учитывать сопротивления линейных проводов, то эти напряжения всегда совпадают с линейными напряжениями источника $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}$; $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}$; $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}$. При симметричной нагрузке все фазные (они же линейные) напряжения равны между собой по величине.

Фазные токи нагрузки определяются по закону Ома

$$I_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{r_{ab}}; I_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{r_{bc}}; I_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{r_{ca}}, \quad (1)$$

и в условиях симметричной нагрузки образуют правильную трехлучевую звезду (рисунок 1,в). Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа в узлах треугольника нагрузки

$$I_a = I_{ab} - I_{ca}; I_b = I_{bc} - I_{ab}; I_c = I_{ca} - I_{bc} \quad (2)$$

и в симметричной цепи образуют правильный треугольник токов, рисунок 1,в. Все линейные токи равны между собой по величине и превосходят фазные токи в $\sqrt{3}$.

Нормальный режим работы трехфазной цепи существует при симметричной нагрузке. В реальных условиях могут возникать несимметричные и аварийные режимы. Обычным несимметричным режимом является изменение сопротивления нагрузки одной из фаз. Например, при увеличении сопротивления фазы ab вдвое $r_{ab} = 2r$; $r_{bc} = r_{ca} = r$ напряжения и токи здоровых фаз bc и ca сохраняются неизменными, а ток I_{ab} уменьшается вдвое по сравнению с симметричным режимом.

Это приводит к уменьшению линейных токов до значения $I_a = I_b = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{7}{3}} \cdot I_{\text{лин симм}}$, тогда как линейный ток I_c остается неизменным (рисунок 2,а). Векторная диаграмма напряжений нагрузки не зависит от сопротивления фаз и остается такой, как в симметричном режиме, рисунок 1,б.

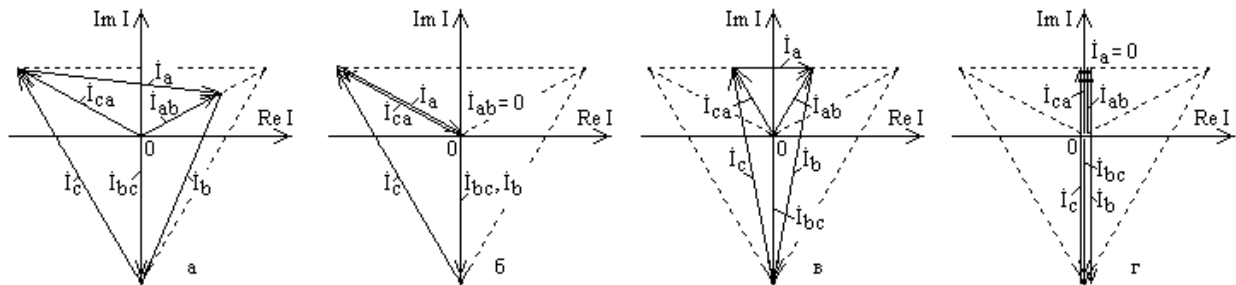


Рисунок 2 – Векторные диаграммы несимметричных режимов трехфазной цепи:

- а) удвоение сопротивления в фазе ab ; б) обрыв нагрузки в фазе ab ;
- в) выпадение фазы А источника; г) обрыв линейного провода а

При аварийном обрыве нагрузки фазы ab $r_{ab} \rightarrow \infty$, и ток I_{ab} исчезает. Фазные напряжения и токи здоровых фаз bc и ca сохраняются неизменными, как и при симметричном режиме. Линейные токи I_a, I_b уменьшаются до значений фазных токов здоровых фаз $I_a = -I_{ca}$; $I_b = I_{bc}$; линейный ток I_c остается неизменным, как и в симметричном режиме (рисунок 2,б).

Распространенным аварийным режимом в условиях симметрии нагрузки является нарушение симметрии источника питания, связанное с потерей напряжения фазной ЭДС (выпадение фазы), например, $\dot{E}_A = 0$, что приводит к снижению линейных напряжений источника $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{CA}$ и фазных напряжений нагрузки $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{ca}$ в $\sqrt{3}$ раз до величины E : $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = -\dot{E}_B$; $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca} = \dot{E}_C$. Напряжение и ток фазы bc оста-

ются прежними, как в симметричном режиме. Фазные токи I_{ab} и I_{bc} сокращаются в $\sqrt{3}$ по сравнению с симметричным режимом; линейные токи I_b и I_c сокращаются до значений $\frac{1}{3}\sqrt{7} \cdot I_{\text{лин симм}}$, а линейный ток I_a сокращается вдвое по сравнению с симметричным режимом, рисунок 2,в.

Еще одним распространенным аварийным режимом в условиях симметрии нагрузки является обрыв линейного провода. Например, при обрыве линейного провода a нагрузка получает питание только по двум оставшимся линейным проводам: $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}$. В этом случае фазные напряжение и ток bc остаются прежними, как в симметричном режиме, а напряжения ab и ca уменьшаются вдвое по сравнению с симметричным режимом: $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{ca} = -\frac{\dot{U}_{BC}}{2}$. Фазные токи I_{ab}, I_{ca} также сокращаются вдвое по сравнению с симметричным режимом. Линейные токи I_b и I_c сокращаются до значений $\frac{1}{2}\sqrt{3} \cdot I_{\text{лин симм}}$, а ток I_a исчезает, рисунок 2,г.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде (А301). В качестве источника питания применяется трехфазное напряжение 127/220 В промышленной частоты: $E_A = E_B = E_C = E = 127 \text{ В}$. В качестве фазной нагрузки применяется параллельное соединение одинаковых резисторов $R_1, R_2; R_3, R_4; R_5, R_6$, каждый из которых имеет сопротивление 500 Ом. Таким образом, симметричная трехфазная нагрузка имеет вид $r_{ab} = r_{bc} = r_{ca} = r = 250 \text{ Ом}$. Для измерения токов применяются аналоговые амперметры с пределом 3 А; напряжения измеряются аналоговым вольтметром с пределом 500 В.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Для исследования симметричного режима трехфазной цепи соберите схему по рисунку 3. Измерьте фазные напряжения источника $U_A = E_A; U_B = E_B; U_C = E_C$, убедитесь, что они близки к 127 В. Измерьте линейные напряжения источника U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ; убедитесь, что они также одинаковы,

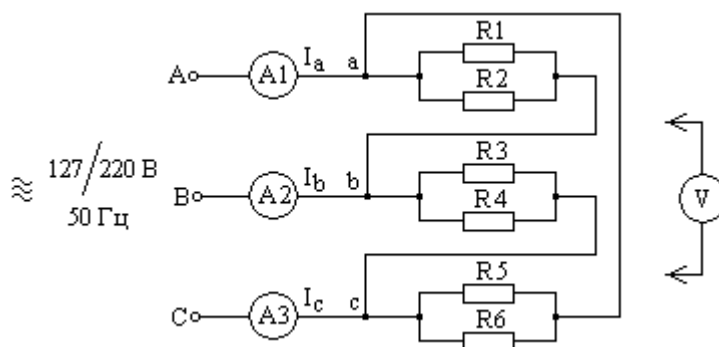


Рисунок 3 – Схема эксперимента по исследованию трехфазной цепи «звезда – треугольник»

больше фазных в $\sqrt{3}$ и близки к 220 В. Впишите их значения в теоретическую строку симметричного режима таблицы 1. Эти значения будут теоретической базой для дальнейшего анализа. Измерьте линейные напряжения нагрузки U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , убедитесь, что они совпадают с линейными напряжениями источника; впишите их значения в опытную строку симметричного режима таблицы 1.

Таблица 1 – Исследование трехфазной цепи «звезда–треугольник»

Режим		$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_a,$ А	$I_b,$ А	$I_c,$ А	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А
Симм.	Опыт							х	х	х
	Теор.									
Несим. $r_{ab} = 2r$	Опыт							х	х	х
	Теор.									
Обрыв: $r_{ab} \rightarrow \infty$	Опыт							х	х	х
	Теор.									
Выпаден. фазы A : $E_A = 0$	Опыт							х	х	х
	Теор.									
Обрыв провода a	Опыт							х	х	х
	Теор.									

Измерьте токи в линейных проводах I_a, I_b и I_c , убедитесь, что они одинаковы по величине; результаты занесите в опытную строку симметричного режима таблицы 1.

2. Для исследования несимметричного режима в фазе ab отключите один из резисторов нагрузки этой фазы, например, R_1 . Повторите измерения фазных напряжений нагрузки U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} и линейных токов I_a, I_b, I_c и убедитесь, что симметрия линейных токов нарушена; не изменились лишь фазные напряжения. Опытные данные занесите в таблицу 1.

3. Для имитации аварийного режима обрыва фазы ab нагрузки отключите оба резистора в этой фазе. Повторите измерения напряжений и токов, в том числе и напряжения на оборванной фазе. Убедитесь, что эти напряжения не изменились по сравнению с симметричным режимом, а линейные токи уменьшились. Опытные данные занесите в таблицу 1.

4. Для имитации аварийного режима выпадения фазы A источника при симметричной нагрузке восстановите симметрию нагрузки, освободите линейный провод a из клеммы питания A и подсоедините его к нейтральной точке питания 0 . Повторите измерения фазных напряжений и линейных токов, убедитесь в нарушении симметрии источника питания. Фазные напряжения U_{ab}, U_{ca} снизились по сравнению с симметричным режимом, сократились линейные токи I_b и I_c , а ток I_a уменьшился втрое. Опытные данные занесите в таблицу 1.

5. Для исследования аварийного режима обрыва линейного провода удалите линейный провод a из точки 0 питания и оставьте его разомкнутым. Повторите измерения фазных напряжений и линейных токов, обратите внимание на уменьшение

вдвое фазных напряжений $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{ca}$ по сравнению с симметричным режимом и на исчезновение тока I_a в оборванном проводе. Опытные данные занесите в таблицу 1.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании теоретических значений фазных (линейных) напряжений $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}$ симметричного режима по выражениям (1) рассчитайте теоретические значения фазных напряжений и токов I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} всех исследованных режимов цепи. Теоретические данные занесите в таблицу 1, сравните с опытными значениями. По выражениям (2) подсчитайте теоретические значения линейных токов I_a, I_b, I_c для всех исследованных режимов цепи, теоретические результаты занесите в таблицу 1, сравните с опытными данными.

На одном чертеже в одном масштабе 20 В/см постройте векторные диаграммы напряжений для всех исследованных режимов (разными цветами); на другом чертеже в масштабе 0,2 А/см постройте векторные диаграммы токов всех режимов по теоретическим данным. По каждому пункту опытов сделайте выводы о соответствии опытных и расчетных результатов, а также о влиянии несимметрии нагрузки и источника питания на режим работы цепи, выводы о последствиях аварий.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема трехфазной цепи, соединенной в треугольник, и основные расчетные формулы для определения фазных напряжений и токов.
3. Схемы всех экспериментов с указанием типов приборов.
4. Таблицы опытных и расчетных результатов.
5. Векторные диаграммы напряжений и токов.
6. Выводы по каждому опыту о влиянии несимметрии нагрузки и источника питания на режим цепи; выводы о последствиях аварий и о соответствии опытных и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы характерные признаки симметричного режима?
2. Каковы последствия увеличения сопротивления фазы нагрузки?
3. Каковы последствия обрыва фазы нагрузки?
4. Каковы последствия обрыва линейного провода?
5. Каковы последствия нарушения симметрии источника питания при выпадении фазы?
6. Почему в этой цепи нельзя делать опыт короткого замыкания фазного сопротивления нагрузки?
7. В чем преимущества трехфазной системы напряжений перед однофазной?
8. В чем отличительные особенности трехфазной цепи, соединенной в треугольник, от цепи, соединенной в звезду?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: исследование гармонического состава несинусоидального напряжения; наблюдение гармоник напряжения на осциллографе с помощью последовательного резонансного фильтра.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Периодическое несинусоидальное напряжение может быть представлено в виде суммы гармоник (ряда Фурье). Например, последовательность прямоугольных импульсов, рисунок 1,а, (меандр) имеет представление

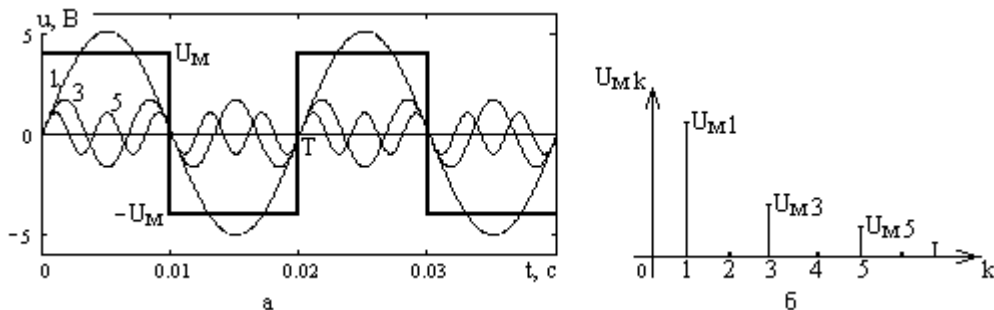


Рисунок 1 – Несинусоидальное напряжение а) и его спектр б)

$$u(t) = U_{M1} \sin \omega t + U_{M3} \sin 3\omega t + U_{M5} \sin 5\omega t + \dots = \frac{4U_M}{\pi} \sin \omega t + \frac{4U_M}{\pi \cdot 3} \sin 3\omega t + \frac{4U_M}{\pi \cdot 5} \sin 5\omega t + \dots \quad (1)$$

Спектр его изображен на рисунке 1,б. Отдельные гармоники несинусоидального напряжения можно наблюдать на экране осциллографа с помощью простейшего анализатора спектра в виде последовательного резонансного фильтра, рисунок 2,а. При настройке фильтра в резонанс на k – ю гармонику

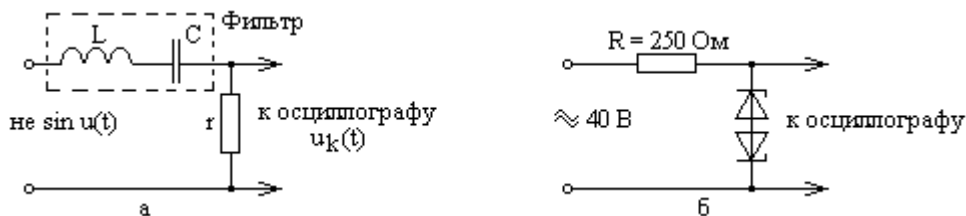


Рисунок 2 – Резонансный фильтр а); формирователь несинусоидального напряжения б)

по условию $k\omega L = \frac{1}{k\omega C}$ его сопротивление для этой гармоники $z = k\omega L - \frac{1}{k\omega C}$ становится малым, и эта гармоника свободно проходит через фильтр на сопротивление r и становится видной на осциллографе. Для других гармоник фильтр представляет большое сопротивление, они через него не проходят и на осциллографе не видны.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. В качестве источника питания используется регулятор переменного напряжения. Несинусоидальное напряжение возникает на выходе специальной схемы ограничителя амплитуды на стабилитронах. В качестве индуктивности используется катушка L_x , емкости – батарея конденсаторов; осциллограф типа С1–72.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Наблюдение несинусоидального напряжения.

Для наблюдения несинусоидального напряжения на выходе ограничителя соберите схему по рисунку 2,б. Установите регулятором напряжение 40 В. Установите на осциллографе масштаб по времени $2...5 \text{ мс/кл}$ и по напряжению 2 В/кл . Добейтесь устойчивого изображения, по клеткам срисуйте осциллограмму напряжения, определите его амплитуду U_M , период T и круговую частоту ω .

2. Для наблюдения отдельных гармоник несинусоидального напряжения подключите к схеме ограничителя резонансный фильтр, рисунок 3. Запишите индуктивность L и сопротивление r обмотки катушки L_x и сопротивление резистора $r_{ш}$.

Установите значение емкости $C_1 = \frac{1}{\omega^2 L}$, необходимое

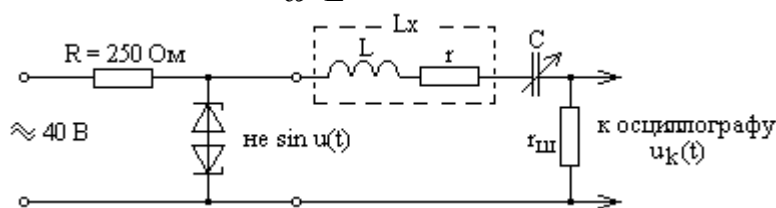


Рисунок 3 – Схема наблюдения отдельных гармоник

для наблюдения первой гармоники. Срисуйте осциллограмму, определите амплитуду, период и частоту первой гармоники. Установите емкости $C_3 = \frac{1}{(3\omega)^2 L}$ и

$C_5 = \frac{1}{(5\omega)^2 L}$ для наблюдения третьей и пятой гармоник напряжения. Срисуйте эти гармоники, не забудьте записать масштабы по осям изображения, если Вы их изменяли. Вы заметите, что с ростом номера гармоники ее амплитуда и период уменьшаются, а частота растет.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

По найденной в первом опыте амплитуде меандра U_M рассчитайте амплитуды гармоник U_{M1}, U_{M3}, U_{M5} по выражению (1), постройте дискретный спектр несинусоидального рассматриваемого напряжения.

Определите теоретические значения амплитуд гармоник на выходе фильтра по выражению

$$\frac{r_{III}}{r + r_{III}} \cdot U_{Mk}, \quad k = 1, 3, 5, \quad (2)$$

а также их период и частоту; сравните с величинами, полученными из опыта.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема опыта по наблюдению несинусоидального напряжения и осциллограмма этого напряжения в масштабе с подписанной амплитудой, частотой и периодом.
3. Схема опыта по наблюдению гармоник несинусоидального напряжения и осциллограммы этих гармоник в масштабе с определенными амплитудами, периодом и частотой.
4. Дискретный спектр несинусоидального напряжения, рассчитанный и построенный по выражению (1).
5. Теоретические значения амплитуд наблюдаемых гармоник, рассчитанные по выражению (2), а также их частот и периодов, их абсолютные и относительные ошибки.
6. Выводы о спектральном составе исследуемого несинусоидального напряжения и о соответствии опытных и теоретических результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните состав спектра исследуемого несинусоидального напряжения.
2. Объясните принцип действия последовательного резонансного фильтра.
3. Объясните определение амплитуд гармоник на выходе фильтра по выражению (2).
4. В чем, на Ваш взгляд, недостатки примененного простейшего, последовательного, резонансного фильтра для исследования спектрального состава несинусоидального напряжения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы: изучение переходного процесса заряда конденсатора через резистор от источника постоянного напряжения; изучение переходного процесса разряда конденсатора на резистор; исследование зависимостей этих переходных процессов от сопротивления резистора и емкости конденсатора.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Схема, в которой происходит заряд конденсатора C через резистор r от источника постоянного напряжения E , показана на рисунке 1,а. Дифференциальное урав-

нение для напряжения $u_C(t)$ имеет вид $rC \frac{du_C}{dt} + u_C = E$ с начальным условием $u_C(0) = 0$. Решение этого уравнения дает вид переходного процесса по напряжению $u_C(t) = E - Ee^{-\frac{t}{\tau}}$, где $\tau = rC$ – постоянная времени. Переходный процесс тока определяется выражением $i(t) = \frac{E}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}$, начальное значение тока $i(0) = \frac{E}{r}$. Графики напряжения и тока заряда конденсатора показаны на рисунке 1,б

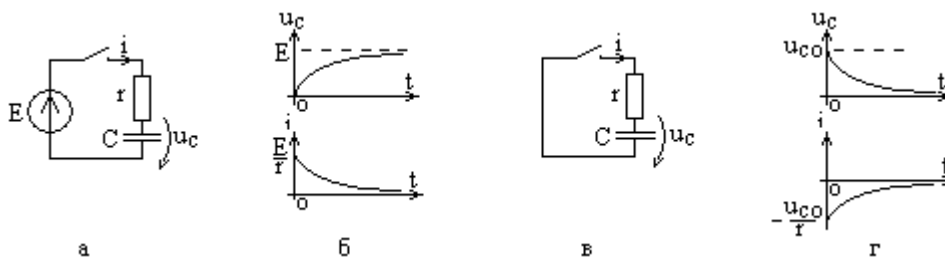


Рисунок 1 – Схема заряда конденсатора а); напряжение и ток заряда б); схема разряда конденсатора в); напряжение и ток разряда г)

Схема, в которой происходит разряд конденсатора C через резистор r , показана на рисунке 1,в, конденсатор предварительно заряжен до напряжения $u_C(0) = u_{C0}$.

Дифференциальное уравнение для напряжения имеет вид $rC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$, а решение этого уравнения $u_C(t) = u_{C0} e^{-\frac{t}{\tau}}$; разрядный ток $i(t) = -\frac{u_{C0}}{r} e^{-\frac{t}{\tau}}$. Графики напряжения и тока разряда конденсатора показаны на рисунке 1,г

Сопротивление резистора влияет на величину зарядного и разрядного тока: чем больше сопротивление, тем меньше ток, формально это отражается в величине начального тока $i(0) = \frac{E}{r}$. Этим объясняется увеличение длительности переходного процесса: меньшим током конденсатор заряжается и разряжается дольше. В то же время при неизменном сопротивлении длительность переходного процесса зависит от емкости. Конденсатор большей емкости заряжается и разряжается медленнее. Формально это отражается в величине постоянной времени $\tau = rC$.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Так как переходный процесс обычно краток (доли секунды), и его трудно непосредственно наблюдать, применяется поляризованное реле РП7, с помощью которого процесс повторяется 50 раз в секунду, и на экране осциллографа возникает его неподвижное изображение. Выводы осциллографа обозначены символами: Υ – вход, $\perp$ – корпус, тип осциллографа С1-72.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Исследование переходного процесса напряжения.

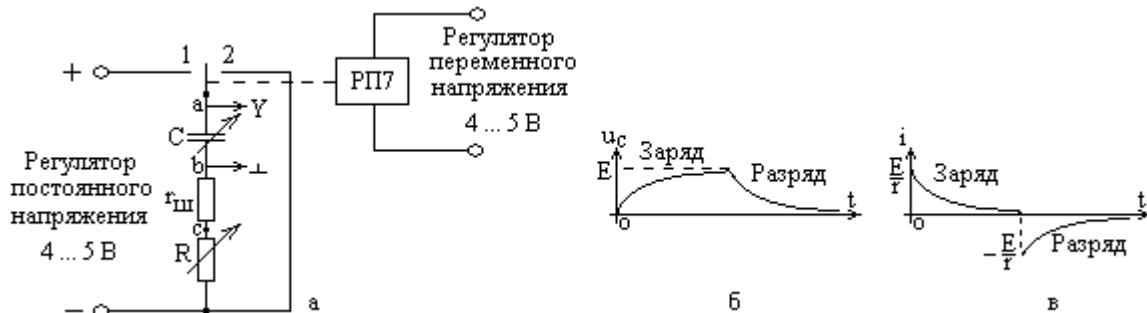


Рисунок 2 – Схема эксперимента а); осциллограмма напряжения б); осциллограмма тока в)

Соберите схему опыта по рисунку 2,а. Переходный процесс заряда вызывается переключением контактов в положение 1, а разряда – в положение 2. Установите исходное значение емкости 5 мкФ и переменного сопротивления $R \approx 150...200 \text{ Ом}$. Запишите сопротивление дополнительного резистора $r_{\text{ш}} = 50 \text{ Ом}$. Ручками управления осциллографом установите масштаб по времени 2 мс/кл , по напряжению – 1 В/кл . Вход осциллографа должен быть открыт, осциллограф подключен параллельно емкости. Установите напряжения обоих регуляторов по $4...5 \text{ В}$. Добейтесь крупной, устойчивой картинки, рисунок 2,б; срисуйте по клеткам осциллограмму напряжения заряда и разряда конденсатора, отчетливо зафиксируйте горизонтальную ось времени и уровень напряжения питания, до которого заряжается конденсатор, интервалы заряда и разряда конденсатора. Повторите исследование при вдвое увеличенном сопротивлении переменного резистора, а затем при нулевом его сопротивлении. Вы заметите, что чем больше сопротивление, тем дольше длится переходный процесс. Далее установите исходное сопротивление $R \approx 150...200 \text{ Ом}$ и повторите исследование для увеличенной емкости 10 мкФ , а затем для уменьшенной – 1 мкФ . Вы заметите, что с ростом емкости длительность переходного процесса увеличивается.

2. Исследование переходного процесса тока.

Для исследования тока переходного процесса заряда и разряда конденсатора переключите корпус осциллографа в точку с, вход Y в точку b. Установите вертикальный масштаб $0,2 \text{ В/кл}$. Добейтесь крупной устойчивой картинки тока на экране, рисунок 2,в. Обратите, пожалуйста, внимание на то, что на экране виден не сам ток, а то напряжение, которое он создает на резисторе $r_{\text{ш}} = 50 \text{ Ом}$. Поделите вертикальный масштаб $0,2 \text{ В/кл}$ на $r_{\text{ш}} = 50 \text{ Ом}$, получите вертикальный масштаб по току. Аккуратно, по клеточкам срисуйте осциллограммы тока при всех тех значениях сопротивления и емкости, которые Вы устанавливали ранее. Обратите внимание на увеличение амплитуды всплеска тока при уменьшении сопротивления.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассчитайте для всех случаев постоянную времени $\tau = rC$, начальный всплеск зарядного $i(0) = \frac{E}{r}$ и разрядного $i(0) = -\frac{u_{c0}}{r}$ тока, в последнем случае $u_c(0) \approx E$.

Подставьте значения всех параметров, использованных в опытах, и постройте на одном чертеже разными цветами расчетные графики напряжения, на другом – тока. Чтобы опытные и расчетные результаты удобнее было сравнивать, построение постарайтесь выполнить точно в тех масштабах, какие у Вас были записаны в опытах. Сделайте выводы о влиянии емкости и сопротивления на вид переходного процесса заряда и разряда конденсатора и о соответствии опытных и теоретических результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема эксперимента с указанием подключения осциллографа, осциллограммы всех опытов в масштабах, записанных по положению ручек управления осциллографом и пересчитанных для соответствующих токов.
3. Выражения для решений дифференциальных уравнений для всех опытов.
4. Теоретические графики переходных процессов в масштабах, полученных в опытах.
5. Выводы о зависимости вида и характера переходных процессов напряжения и тока заряда и разряда конденсатора от параметров цепи и о соответствии опытных и теоретических результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип работы схемы эксперимента.
2. Объясните пересчет вертикального масштаба для тока.
3. Как зависит длительность переходного процесса от емкости?
4. Как зависит длительность переходного процесса от сопротивления?
5. Как всплеск зарядного или разрядного тока зависит от сопротивления? От емкости? От источника напряжения питания?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС ВКЛЮЧЕНИЯ И ОТКЛЮЧЕНИЯ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Цель работы: исследование переходного процесса включения катушки индуктивности к источнику постоянного напряжения; процесса отключения катушки; исследование зависимости переходного процесса от параметров катушки.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Схема, в которой происходит переходный процесс включения (заряда) катушки с индуктивностью L и сопротивлением обмотки r через внешнее сопротивление R к источнику постоянного напряжения E изображена на рисунке 1,а.

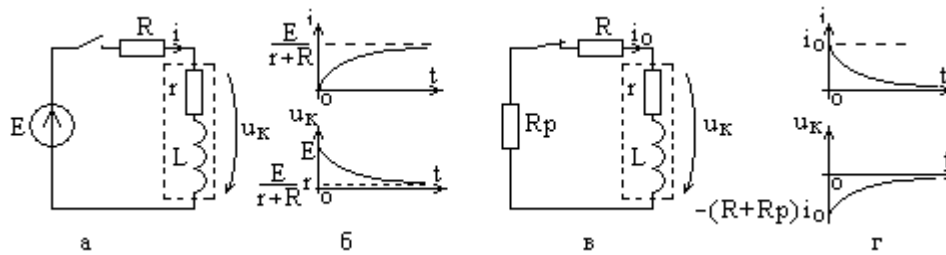


Рисунок 1 – Схема включения катушки а); ток и напряжение включения б); схема отключения катушки в); ток и напряжение отключения г)

Дифференциальное уравнение тока переходного процесса включения имеет вид

$L \frac{di}{dt} + (r + R)i = E$ с начальным условием $i(0) = 0$. Решение этого уравнения

$$i(t) = \frac{E}{r + R} - \frac{E}{r + R} e^{-\frac{t}{\tau_3}}, \text{ где } \tau_3 = \frac{L}{r + R} - \text{постоянная времени заряда (рисунок 1,б).}$$

Напряжение на катушке $u_K(t) = ri + L \frac{di}{dt} = \frac{E}{r + R} \left(r + R e^{-\frac{t}{\tau_3}} \right)$, его начальное значение

$$u_K(0) = E.$$

Схема, в которой происходит переходный процесс отключения (разряда) катушки с начальным током $i(0) = i_0$ на внешнее R и дополнительное, разрядное сопротивление R_p , изображена на рисунке 1,в. Дифференциальное уравнение тока переходного процесса

$L \frac{di}{dt} + (r + R + R_p)i = 0$ и его решение $i(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau_p}}$, где постоянная времени разряда

$\tau_p = \frac{L}{r + R + R_p}$; напряжение на катушке при отключении

$$u_K(t) = -(R + R_p)i = -(R + R_p)i_0 e^{-\frac{t}{\tau_p}}, \text{ рисунок 1,г.}$$

Переходный процесс зависит от индуктивности катушки: чем больше индуктивность катушки, тем катушка дольше заряжается и разряжается. Формально это выражается в увеличении постоянной времени. Длительность процесса зависит от сопротивлений в цепи катушки: с ростом сопротивлений длительность процесса сокращается. Кроме того, внешнее R и разрядное R_p сопротивления влияют на начальный скачок напряжения на катушке при ее отключении $u_K(0) = -(R + R_p)i_0$: с ростом этих сопротивлений амплитуда скачка увеличивается.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная работа выполняется на универсальном лабораторном стенде. Так как переходный процесс обычно краток (доли секунды), и его трудно непосред-

венно наблюдать, то для его изучения применяется поляризованное реле РП7. Контакты реле переключаются 50 раз в секунду, и на экране осциллографа возникает неподвижное изображение переходного процесса. Выводы осциллографа обозначены символами: Y – вход, $\perp$ – корпус, тип осциллографа С1-72. Обратный диод необходим для реализации процесса отключения катушки.

ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Исследование переходного процесса тока включения и отключения катушки. Соберите схему опыта по рисунку 2,а. Переходный процесс включения катушки возникает при переключении контактов в положение 1, а выключения – в положение 2. Установите исходную катушку L_{1-2} , запишите ее индуктивность L и сопротивление обмотки r ; сопротивление внешнего резистора $R_x = 100 \text{ Ом}$; установите сопротивление разрядного переменного резистора $R_p = 150...200 \text{ Ом}$; напряжение на обоих регуляторах напряжения $4...5 \text{ В}$. Ручками управления осциллографа установите масштаб по времени 2 мс/кл и масштаб по напряжению $m_u = 1 \text{ В/кл}$. Поделите этот масштаб на сопротивление внешнего резистора $R_x = 100 \text{ Ом}$ и получите масштаб по току. Вход осциллографа должен быть открыт. Аккуратно по клеткам срисуйте осциллограмму тока включения и отключения катушки (рисунок 2,б), отчетливо выделите ось времени и уровень установившегося тока, интервал включения и отключения катушки.

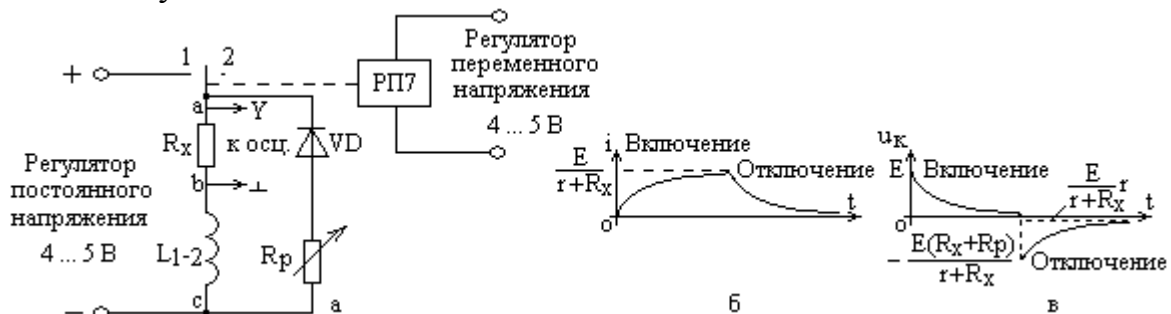


Рисунок 2 – Схема эксперимента а); осциллограмма тока б); осциллограмма напряжения в)

Повторите исследование для двух других катушек: L_{1-10} и L_{5-10} . Не забудьте записать индуктивности и сопротивления обмоток этих катушек. Вы заметите, что при увеличении индуктивности длительность переходного процесса возрастает. Повторите исследование при исходной индуктивности L_{1-2} и увеличенном сопротивлении разрядного резистора $R_p = 750...800 \text{ Ом}$. Вы заметите, что увеличение разрядного резистора приводит к сокращению длительности отключения.

2. Исследование переходного процесса напряжения на катушке. Переключите осциллограф параллельно катушке: корпус в точку c , вход Y – в точку b . Установите масштаб по напряжению $m_u = 2 \text{ В/кл}$. Проведите исследование переходного процесса на катушке при всех значениях индуктивности катушки и разрядного сопротивления, что и в п. 1 (рисунок 2,в). Обратите внимание на увеличение амплитуды напряжения на катушке при увеличении сопротивления разрядного резистора. Не забудьте записать масштаб по напряжению, если Вы его изменяли.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Подсчитайте постоянные времени и установившиеся значения тока для всех исследованных случаев. Постройте на одном чертеже разными цветами теоретические расчетные графики тока включения и отключения катушки для всех опытов в тех масштабах, которые были в экспериментах; $i_0 \approx \frac{E}{r + R_x}$. На другом чертеже постройте соответствующие графики напряжения на катушке. Сравните опытные и расчетные результаты, сделайте выводы об их взаимном соответствии и о влиянии индуктивности катушки и разрядного сопротивления на вид и характер переходного процесса.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название и цель работы.
2. Схема опыта с указанием включения осциллографа.
3. Осциллограммы всех опытов в масштабах, записанных по положению ручек управления осциллографом и пересчитанных для тока.
4. Теоретические расчетные графики тока и напряжения переходного процесса на катушке в принятых масштабах.
5. Выводы о влиянии индуктивности катушки и разрядного сопротивления на вид и характер переходного процесса и о соответствии теоретических и расчетных результатов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните принцип действия схемы опыта, назначение обратного диода.
2. Объясните пересчет масштаба для тока.
3. Как зависит длительность переходного процесса от индуктивности и сопротивления разрядного резистора?
4. Как зависит переходный процесс напряжения на катушке от сопротивления разрядного резистора?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теоретические основы электротехники / П.А.Ионкин [и др.] – М.: Высшая школа, 1976. – 514 с.
2. Основы теории цепей / Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 752 с.
3. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники / К.С.Демирчян, Л.Р.Нейман, Н.В.Коровкин, В.Л.Чечурин. – СПб.: Изд-во «Питер», 2009. – 463 с.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники / Г.И.Атабеков. – М.: Энергия, 1978. – 592 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А.Бессонов. – М.: Изд-во «Гардарики», 2006. – 701 с.

6. Улахович Д.А. Основы теории линейных электрических цепей / Д.А.Улахович. – Спб.: Изд-во «БХВ – Петербург», 2009. – 816 с.
7. Фриск В.В. Основы теории цепей / В.В.Фриск. – М.: Изд-во «Солон-Пресс», 2009. – 160 с.
8. Гаврилов Л.П. Расчет и моделирование линейных электрических цепей с применением ПК / Л.П.Гаврилов, Д.А.Соснин. – М.: Изд-во «Солон-Пресс», 2009. – 448 с.
9. Лоторейчук Е.А. Теоретические основы электротехники / Е.А.Лоторейчук. – М.: Изд-во «ИД ФОРУМ. ИНФРА», 2009. – 320 с.

Заказ № _____ от “_____” _____ 2010 г. Тираж _____ экз.
Изд-во СевНТУ