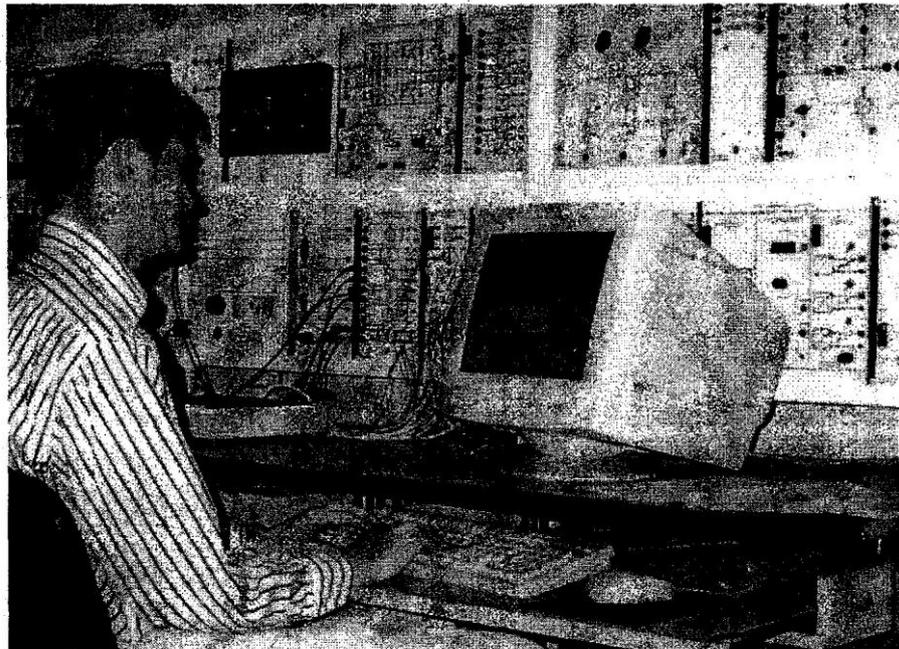


# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**Руководство по выполнению базовых экспериментов ЭЦПЕТ.002 РБЭ (902.1)**



Беглецов Н.Н., Галишников Ю.П., Сенигов П.Н. Электрические цепи переменного тока. Руководство по выполнению базовых экспериментов. ЭЦПЕТ.002 РБЭ (902.1). -Челябинск: ООО «Учебная техника», 2005. - 109 с.

Описаны состав и отдельные компоненты типового комплекта оборудования для проведения лабораторных работ по учебному разделу «Электрические цепи переменного тока». Представлены общие сведения, схемы экспериментов и их описания, перечни аппаратуры и указания по проведению и оформлению результатов базовых экспериментов.

Руководство предназначено для использования при подготовке к проведению лабораторных занятий в высших и средних профессиональных образовательных учреждениях.

## Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Описание комплекта типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники» .....</b>	<b>9</b>
1.1 <i>Общие сведения .....</i>	9
1.1.1 <i>Компоновка оборудования.....</i>	9
1.1.2 <i>Блок генераторов напряжений .....</i>	10
1.1.3 <i>Наборная панель .....</i>	11
1.1.4 <i>Набор миниблоков по теории электрических цепей и основам электроники .</i>	12
1.1.5 <i>Набор трансформаторов .....</i>	13
1.1.6 <i>Блок мультиметров .....</i>	13
1.1.7 <i>Ваттметр.....</i>	15
1.1.8 <i>Набор миниблоков по теории электромагнитного поля .....</i>	15
1.1.9 <i>Набор планшетов для моделирования электрических и магнитных полей ....</i>	18
1.1.10 <i>Набор устройств для моделирования поверхностного эффекта и эффекта     близости .....</i>	20
1.2 <i>Экспериментальная часть .....</i>	21
<b>2. Параметры синусоидального напряжения (тока).....</b>	<b>23</b>
2.1. <i>Общие сведения .....</i>	23
2.2. <i>Экспериментальная часть .....</i>	24
<b>3. Активная мощность цепи синусоидального тока.....</b>	<b>27</b>
3.1. <i>Общие сведения .....</i>	27
3.2. <i>Экспериментальная часть .....</i>	27
<b>4. Цепи синусоидального тока с конденсаторами .....</b>	<b>29</b>
4.1. <i>Напряжение, ток, сопротивление и мощность конденсатора .....</i>	29
4.1.1. <i>Общие сведения .....</i>	29
4.1.2. <i>Экспериментальная часть .....</i>	30
4.2. <i>Последовательное и параллельное соединения конденсаторов .....</i>	33
4.2.1. <i>Общие сведения .....</i>	33
4.3.2. <i>Экспериментальная часть .....</i>	33
<b>5. Цепи синусоидального тока с катушками индуктивности.....</b>	<b>36</b>
5.1. <i>Напряжение, ток, сопротивление и мощность катушки     индуктивности .....</i>	36
5.1.1. <i>Общие сведения .....</i>	36
5.1.2. <i>Экспериментальная часть.....</i>	37
5.2. <i>Последовательное и параллельное соединения катушек     индуктивности .....</i>	40
5.2.1. <i>Общие сведения .....</i>	40
5.2.2. <i>Экспериментальная часть .....</i>	40
<b>6. Цепи синусоидального тока с резисторами, конденсаторами и катушками индуктивности .....</b>	<b>42</b>
6.1. <i>Мощности в цепи синусоидального тока .....</i>	42

6.1.1. Общие сведения .....	42
6.1.2. Экспериментальная часть .....	43
6.2. Последовательное соединение резистора и конденсатора, резистора и катушки индуктивности .....	45
6.2.1. Общие сведения .....	45
6.2.2. Экспериментальная часть.....	46
6.3. Параллельное соединение резистора и конденсатора, резистора и катушки индуктивности .....	48
6.3.1. Общие сведения .....	48
6.3.2. Экспериментальная часть.....	49
6.4. Последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Понятие о резонансе напряжений .....	51
6.5.1. Общие сведения .....	51
6.4.2. Экспериментальная часть .....	52
6.5. Параллельное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Понятие о резонансе токов .....	54
6.5.1. Общие сведения .....	54
6.5.2. Экспериментальная часть .....	55
6.6. Частотные характеристики последовательного резонансного контура.....	57
6.6.1. Общие сведения .....	57
6.6.2. Экспериментальная часть .....	58
6.7. Частотные характеристики параллельного резонансного контура.....	61
6.7.1. Общие сведения .....	61
6.7.2. Экспериментальная часть.....	63
<b>7. Трансформаторы .....</b>	<b>66</b>
7.1. Коэффициент магнитной связи .....	66
7.1.1. Общие сведения .....	66
7.1.2. Экспериментальная часть.....	67
7.2. Коэффициент трансформации.....	69
7.2.1. Общие сведения .....	69
7.2.2. Экспериментальная часть.....	69
7.3. Преобразование сопротивлений с помощью трансформатора.....	71
7.3.1. Общие сведения .....	71
7.3.2. Экспериментальная часть.....	71
7.4. Определение параметров схемы замещения и построение векторной диаграммы трансформатора.....	73
7.4.1. Общие сведения .....	73
7.4.2. Экспериментальная часть.....	74
7.5. Внешняя характеристика и коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора.....	77
7.5.1. Общие сведения .....	77
7.5.2. Экспериментальная часть.....	77
<b>8. Трехфазные цепи синусоидального тока.....</b>	<b>79</b>
8.1. Напряжения в трехфазной цепи .....	79
8.1.1. Общие сведения .....	79
8.1.2. Экспериментальная часть .....	80

8.2. Трёхфазная нагрузка, соединенная по схеме «звезда» .....	82
8.2.1. Общие сведения .....	82
8.2.2. Экспериментальная часть .....	83
8.3. Трёхфазные нагрузки, соединенные по схеме «треугольник» .....	85
8.3.1. Общие сведения .....	85
8.3.2. Экспериментальная часть .....	86
8.4. Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду .....	88
8.4.1. Общие сведения .....	88
8.4.2. Экспериментальная часть .....	89
8.5. Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник .....	93
8.5.1. Общие сведения .....	93
8.5.2. Экспериментальная часть .....	94
<b>9. Расчёт и экспериментальное исследование цепи при несинусоидальном приложенном напряжении .....</b>	<b>97</b>
9.1. Общие сведения .....	97
9.2. Экспериментальная часть .....	99
<b>10. Переходные процессы в линейных электрических цепях .....</b>	<b>101</b>
10.1. Переходный процесс в цепи с конденсатором и резисторами .....	101
10.1.1. Общие сведения .....	101
10.1.2. Экспериментальная часть .....	101
10.2. Процессы включения и отключения цепи с катушкой индуктивности .....	114
10.2.1. Общие сведения .....	104
10.2.2. Экспериментальная часть .....	104
10.3. Затухающие синусоидальные колебания в R-L-C контуре .....	106
10.3.1. Общие сведения .....	106
10.3.2. Экспериментальная часть .....	107
<b>Литература .....</b>	<b>109</b>

## Введение

Комплект типового лабораторного оборудования «Теория электрических цепей и основы электроники» предназначен для проведения лабораторного практикума по одноимённым разделам курсов «Теоретические основы электротехники», «Теория электрических цепей», «Электротехника и основы электроники», «Общая электротехника» и т.п. в профессиональных высших и средних учебных учреждениях.

Основными компонентами «ручного» (т.е. некомпьютеризованного) варианта комплекта «Теория электрических цепей и основы электроники» являются:

- блок генераторов напряжений;
- наборная панель;
- набор миниблоков;
- набор трансформаторов;
- блок мультиметров;
- ваттметр;
- соединительные провода и переключки, питающие кабели.

В зависимости от варианта исполнения в комплект может входить также либо лабораторный стол с выдвижными ящиками и рамой для установки оборудования (стендовый вариант), либо просто настольная рама, которая может быть установлена на любой стол (настольный вариант).

Эти же компоненты наряду с другими входят в комплект «Электротехника и основы электроники»

Комплект типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники», кроме перечисленных выше компонентов, содержит:

- дополнительный набор миниблоков для исследования электромагнитных полей;
- набор планшетов для моделирования электрических и магнитных полей;
- набор устройств для исследования поверхностного эффекта и эффекта близости.

В первой главе данного руководства описано устройство составных частей комплекта «Теоретические основы электротехники», даны рекомендации по их использованию и приведены некоторые технические характеристики. В последующих главах описаны базовые эксперименты по разделу «Электрические цепи переменного тока».

Для осуществления в полном объёме всех экспериментов, описанных в данном руководстве и в руководствах по другим разделам кроме перечисленного выше оборудования необходим двухканальный осциллограф, имеющий режим X - Y.

Описание каждого эксперимента содержит

- Общие сведения,
- Экспериментальную часть.

Раздел «Общие сведения» содержит краткое введение в теорию соответствующего эксперимента. Для более глубокого изучения теоретического материала учащемуся следует обратиться к учебникам и компьютерным программам тестирования для проверки усвоения теории и оценки готовности к лабораторно-практическим занятиям.

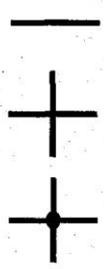
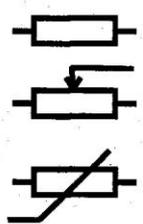
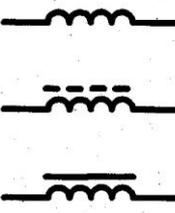
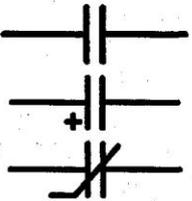
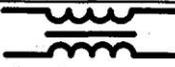
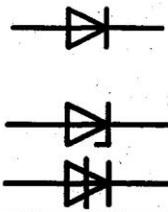
В разделе «Экспериментальная часть» сформулированы конкретные задачи эксперимента, представлены схемы электрических цепей, таблицы и графики для регистрации и представления экспериментальных данных. В ряде случаев поставлены вопросы для более полного осмысления результатов эксперимента.

Настоящее руководство предназначено для быстрого освоения комплекса преподавателями кафедр и разработки ими необходимых материалов для проведения лабораторного практикума в соответствии с рабочими планами и традициями кафедр. На первом этапе внедрения рассматриваемых комплектов типового лабораторного оборудования в учебный процесс данное

руководство или его отдельные фрагменты могут непосредственно использоваться студентами при выполнении лабораторных работ.

Условные обозначения основных элементов электрических цепей приведены в табл. В.1. В табл. В.2 представлены базовые электрические величины и их единицы измерения.

Таблица В. 1

Наименование элемента	Условное обозначение	Наименование элемента	Условное обозначение
<b>Источники электрической энергии:</b>  источник напряжения (ЭДС) постоянного тока (идеальный)  источник постоянного тока (идеальный)  гальванический элемент или аккумулятор  источник напряжения (ЭДС) синусоидального тока		<b>Проводники электрической цепи:</b>  одиночный  пересекающиеся, несоединенные  пересекающиеся, соединенные	
<b>Резисторы:</b>  Постоянный линейный  Переменный линейный  Нелинейный		<b>Выключатели:</b>  однополюсные  двухполюсные	
<b>Индуктивности:</b>  Линейная  С разомкнутым магнитопроводом  С магнитопроводом		<b>Конденсаторы</b>  Общее обозначение  Полярный (электролитический)  Нелинейный	
<b>Трансформатор</b>		<b>Диоды и тиристоры:</b>  Выпрямительный диод  Стабилитрон  Диодный тиристор	
<b>Транзисторы:</b>  Биполярный			

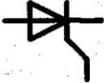
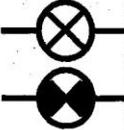
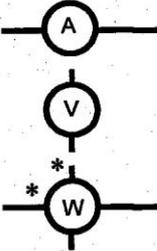
Униполярный (полевой)		Триодный тиристор	
<p>Лампы накаливания:</p>  <p>осветительная</p> <p>сигнальная</p>		<p>Измерительные приборы:</p> <p>амперметр</p> <p>вольтметр</p> <p>ваттметр</p>	

Таблица В.2

Величина	Обозначение	Единица измерения	Другие используемые величины
Заряд	Q	1 К = 1 Кулон	мК
Ток	I	1 А = 1 Ампер	мА, мкА
Напряжение/ЭДС	U/E	1 В = 1 Вольт	мВ, кВ
Сопротивление	R	1 Ом	кОм, МОм
Проводимость	G	1 См = 1 Сименс	
Индуктивность	L	1 Гн = 1 Генри	мГн, мкГн
Ёмкость	C	1 ф = 1 Фарада	мкФ, нФ, пФ

# 1. Описание комплекта типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники»

## 1.1 Общие сведения

### 1.1.1 Компоновка оборудования

Общая компоновка типового комплекта оборудования в стендовом исполнении показано на рис. 1.1. На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются отдельные блоки. Расположение блоков жёстко не фиксировано. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. Наборная панель, на которой собирается электрическая цепь из миниблоков может устанавливаться и непосредственно на столе.

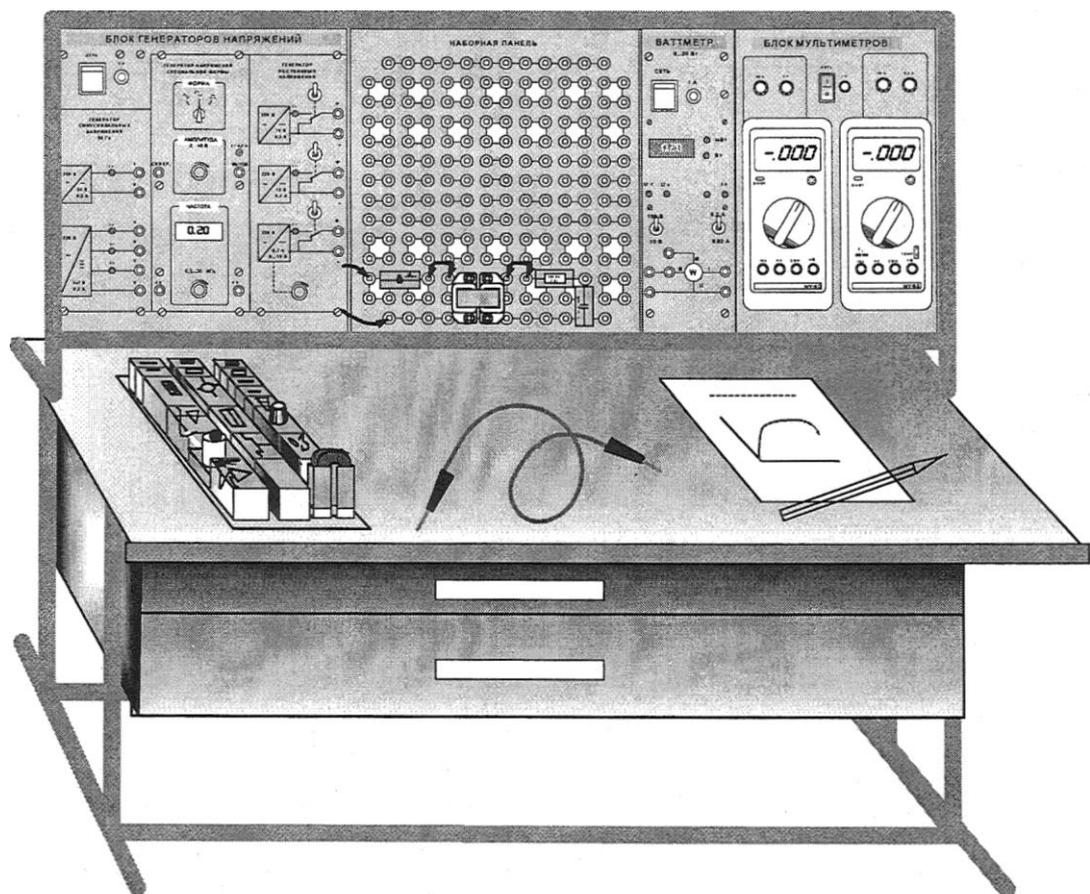


Рис.1.1

В выдвижных ящиках хранятся наборы миниблоков и устройств, соединительные провода, перемычки и кабели, методические материалы. Один из наборов миниблоков показан на рис. 1.1 на столе. Ящики имеют встроенные замки.

### 1.1.2 Блок генераторов напряжений

Лицевая панель блока генераторов напряжений показан на рис. 1.2. Он состоит из генератора синусоидальных напряжений, генератора напряжений специальной формы и генератора постоянных напряжений.

Все генераторы включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 2 А

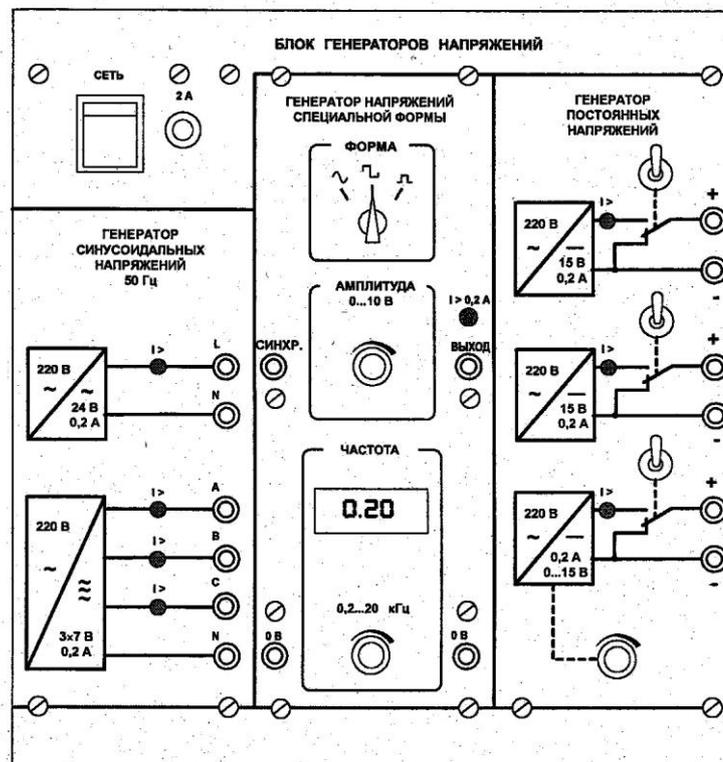


Рис.1.2

На лицевой панели блока указаны номинальные напряжение и ток каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений гальванически изолированы друг от друга и от корпуса блока и защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I >».

Генератор синусоидальных напряжений содержит однофазный источник напряжения 24В (вторичная обмотка питающего трансформатора 220/24 В) и трёхфазный стабилизированный по амплитуде выходного напряжения преобразователь однофазного напряжения в трёхфазное. Выходное сопротивление трёхфазного источника в рабочем диапазоне токов близко к нулю.

Генератор напряжений специальной формы вырабатывает на выходе синусоидальный, прямоугольный двухполярный или прямоугольный однополярный сигнал в зависимости от положения переключателя «ФОРМА». Выходное сопротивление генератора в рабочем диапазоне токов также близко к нулю. Между гнездами «СИНХР» и «0 В» генератора при любом положении переключателя «ФОРМА» вырабатываются однополярные прямоугольные импульсы амплитудой 5В, которые можно использовать для внешней синхронизации осциллографа. Частота сигнала регулируется десятиоборотным потенциометром «ЧАСТОТА» и не зависит как от формы и амплитуды сигнала, так и от тока нагрузки.

Генератор постоянных напряжений содержит три источника стабилизированного напряжения 15В, гальванически изолированных друг от друга. Выходное напряжение одного из этих источников регулируется от 0 до 15 В десятиоборотным потенциометром. Выходные сопротивления этих источников также близки к нулю и все они допускают режим работы с обратным током (режим потребления энергии). Для получения постоянных напряжений больше 15В они могут соединяться последовательно. Для исключения источников из собранной схемы цепи используются переключатели (тумблеры).

### 1.1.3 Наборная панель

Наборная панель (рис. 1.3) служит для расположения на ней миниблоков в соответствии со схемой данного опыта.

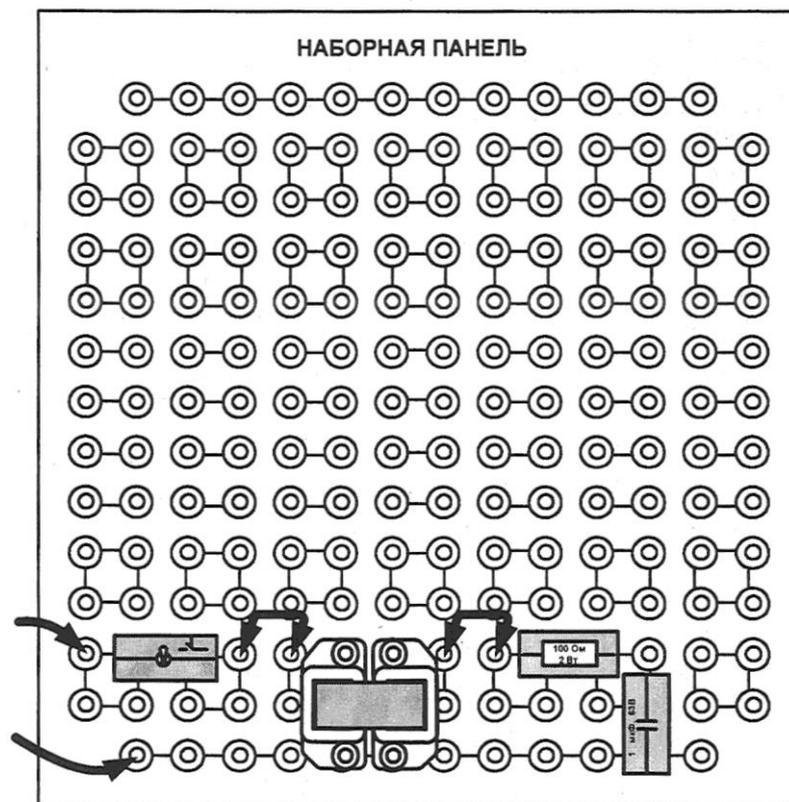


Рис.1.3

Гнёзда на этой панели соединены в узлы, как показано на ней линиями. Поэтому часть соединений выполняется автоматически при установке миниблоков в гнёзда панели. Остальные соединения выполняются соединительными проводами и перемычками. Так на фрагменте цепи, показанной на рис. 1.3, напряжение подаётся проводами через выключатель к одной из обмоток трансформатора. К другой обмотке подключены резистор и конденсатор, соединённые последовательно.

Для измерения токов в ветвях цепи удаляется одна из перемычек и вместо неё в образовавшийся разрыв включается амперметр. Для измерения напряжений на элементах цепи параллельно рассматриваемому элементу включается вольтметр.

#### 1.1.4 Набор миниблоков по теории электрических цепей и основам электроники

Миниблоки из представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности диоды, транзисторы и т.п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнездами наборной панели. Некоторые миниблоки содержат несколько элементов, соединённых между собой или более сложные функциональные блоки. На этикетках миниблоков изображены условные обозначения элементов или упрощённые электрические схемы их соединения, показано расположение выводов и приведены основные технические характеристики. Миниблоки хранятся в специальном контейнере.

Большинство миниблоков комплекта «Теория электрических цепей и основы электроники» содержат по одному элементу электрических цепей. Состав этого набора приведён в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Наименование и характеристики	Кол	Наименование и характеристики	Ко л.
Резисторы МЛТ, 2 Вт, +5%		Индуктивности	
10 Ом	1	10 мГн, 90 мА	1
22 Ом	2	40 мГн, 65 мА	1
33 Ом	1	100 мГн, 50 мА	2
47 Ом	1	Тумблер МТД-1, 250 В, 2 А	1
100 Ом	1	Лампа сигнальная СМН-10 55	1
150 Ом	1	Термистор РТС 50 Ом	1
220 Ом	1	Термистор NTC 6,8 кОм	1
330 Ом	1	Варистор S07K11, 18 В, 1 мА	1
470 Ом	1	Фоторезистор СФЗ-4Б	1
680 Ом	1	Диоды КД 226 (1N5408) 1 А, 100 В	6
1 кОм		Стабилитрон КС510 А, 10 В	1
2,2 кОм	1	Светодиод АЛ 307 Б	1
4,7 кОм	1	Варикап КВ 105А, 20 мА	1
10 кОм			
22 кОм	1	Динистор (диодный тиристор)	
33 кОм	1	КН102Б	1
47 кОм	1		
100 кОм		Тиристор триодный КУ 101Е	
1 МОм	1		
Потенциометры СП4-2М		Транзисторы биполярные	
1 кОм	1	КТ502 Г (pnp)	1
10 кОм	1	КТ503 Г (npn)	2
Конденсаторы К-73-9, 100 В		Транзисторы униполярные	
0,01 мкФ	1	КП 303Е (с каналом т-типа)	1
0,1 мкФ	1	КП101Е (с каналом р-типа)	1
Конденсаторы К73-17, 63 В			
0,22 мкФ	1	Транзистор однопереходный	
0,47 мкФ	1	КТ117Г	1
1 мкФ	1		

Конденсаторы электролитические			
SR-63 В, 10 мкФ	1	Операционный усилитель КР140УД608А	1
SR-63 В, 100 мкФ	1		
SR-35 В, 470 мкФ	1		

### 1.1.5 Набор трансформаторов

Набор трансформаторов включает в себя четыре разборных трансформатора, выполненных на разъемных U-образных сердечниках из электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16x12 мм. На трёх трансформаторах установлены катушки 900/300 витков, на четвертом 100/100 витков, однако, они легко переставляются. Номинальные параметры трансформаторов при частоте 50 Гц приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

W	U <sub>н</sub> , В	I <sub>н</sub> , мА	R, Ом	S <sub>н</sub> ,ВА
100	2,33	600	0,9	1,4
300	7	200	4,8	1,4
900	21	66,7	37	1,4

### 1.1.6 Блок мультиметров

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рис. 1.4. В нём установлены 2 серийно выпускаемых мультиметра МУ60, МУ62 или МУ64. Подробная техническая информация о них и правила применения приводится в руководстве по эксплуатации изготовителя. В блоке установлен источник питания мультиметров от сети с выключателем и предохранителем на 1 А. На лицевую панель блока вынесены также четыре предохранителя защиты токовых цепей мультиметров.

Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметров соблюдайте следующие правила:

- **Не превышайте допустимых перегрузочных значений, указанных в заводской инструкции для каждого рода работы**
- **Когда порядок измеряемой величины неизвестен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину.**
- **Перед тем, как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи.**
- **Не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение.**
- **Не измеряйте ёмкость конденсаторов, не убедившись, что они разряжены.**
- **Будьте внимательны при измерении тока мультиметрами МУ62 и МУ64. Предохранитель 0,2 А этих мультиметров может перегореть от источников напряжения имеющихся в данном стенде. Мультиметр МУ60 защищен предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.**

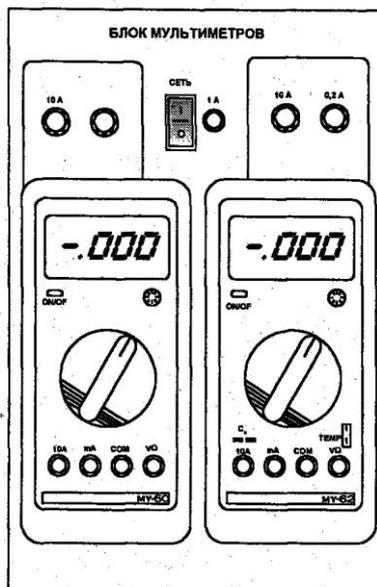


Рис. 1.4

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

- выбор измеряемой величины: - V, ~ V, - A, ~ A или  $\Omega$ ;
- выбор диапазона измерений соответственно ожидаемому результату измерений;
- правильное подсоединение зажимов мультиметра к исследуемой цепи.

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. 1.5.

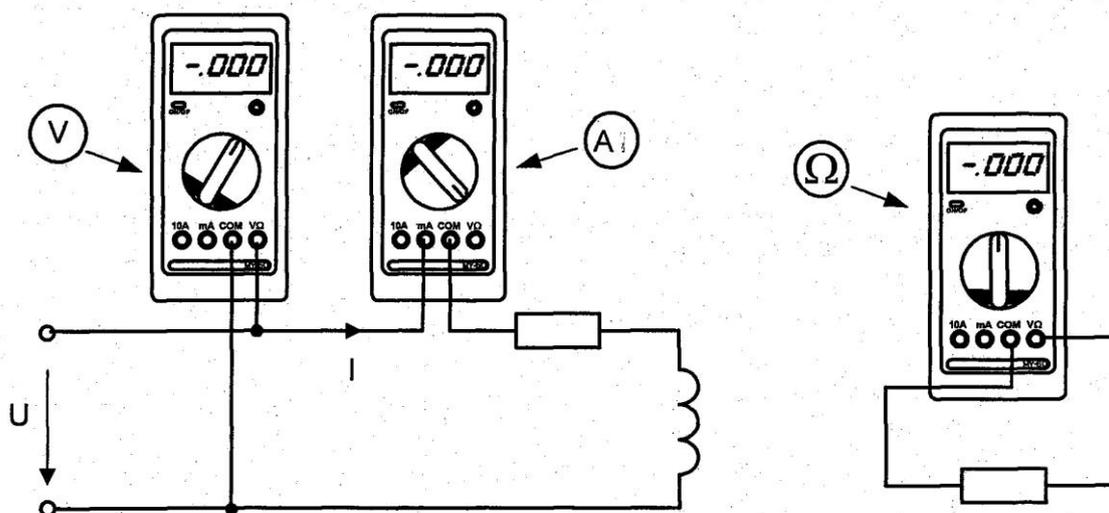


Рис. 1.5

## 1.1.7 Ваттметр

Общий вид ваттметра изображён на рис. 1.6.

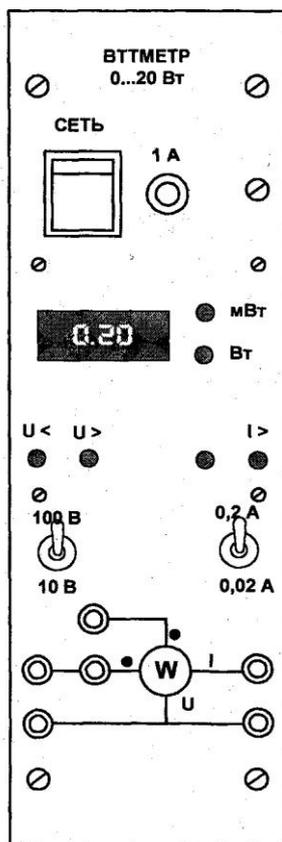


Рис. 1.6

Его принцип действия основан на перемножении мгновенных значений тока и напряжения и отображении среднего значения этого произведения на дисплее прибора в цифровом виде.

Прибор включается в цепь согласно приведённой на лицевой панели схеме. Для измерения активной мощности, гнезда, помеченные символом «•», должны быть соединены перемычкой. После сборки схемы необходимо включить выключатель «Сеть» и установить необходимые пределы измерения по току и по напряжению тумблерами. Если выбран заниженный предел измерения, то включается сигнализация перегрузки  $I >$  или  $(и) U >$ . Если, наоборот, предел превышен, то включается сигнализация  $I <$  или  $(и) U <$ . Справа от окошка цифровых индикаторов включаются автоматически светодиоды сигнализации размерности **Вт** или **мВт**.

## 1.1.8 Набор миниблоков по теории электромагнитного поля

Дополнительный набор миниблоков для исследования электрических и магнитных полей содержит как отдельные элементы электрических цепей, так и более сложные устройства. Общий вид контейнера с миниблоками по теории электромагнитного поля показан на рис. 1.7.

Ниже приводятся краткие описания каждого миниблока (устройства).

1. Устройство (миниблок) «**Электромагнитные силы**» предназначено для измерения силы притяжения двух U-образных частей разъёмного магнитопровода в зависимости от величины постоянного тока, протекающего по катушкам.

Для измерения силы в зазоры между двумя частями сердечника встроены датчики силы. Принцип действия датчика основан на пьезоэлектрическом эффекте. При воздействии силы на его выводах образуются противоположные заряды, пропорциональные силе. Для измерения этого заряда к выходу датчика должен быть подключен интегрирующий усилитель. Он интегрирует импульс тока во входной цепи интегратора в процессе изменения силы, воздействующей на датчик. Таким образом, напряжение на выходе интегратора пропорционально заряду на электродах датчика силы.

Следует иметь в виду, что даже при отсутствии входного сигнала, напряжение на выходе интегратора медленно меняется вследствие дрейфа нуля и интегрирования различных утечек схемы. Поэтому непосредственно перед каждым измерением необходимо выполнять установку нуля, а отсчёт выходного напряжения производить в течение двух - трёх секунд сразу после интегрирования.

Для калибровки системы «датчик - интегратор» используется вес самого подвижного сердечника. Он указан на этикетке сердечника.

2. Миниблок «**Тесламетр**» предназначен для измерения магнитной индукции. Он имеет зонд с датчиком Холла (KSY-13 или другим) на конце, который можно вводить внутрь катушек. Вдоль оси зонда нанесена шкала с шагом 5 мм. Она позволяет определять расстояние, на которое

перемещается датчик внутри катушки. Датчик расположен перпендикулярно оси зонда, т.е. он измеряет аксиальную составляющую магнитной индукции.

ЭДС Холла поступает в миниблок на вход усилителя напряжения, а к выходу усилителя подключается мультиметр или другой прибор для измерения напряжения.

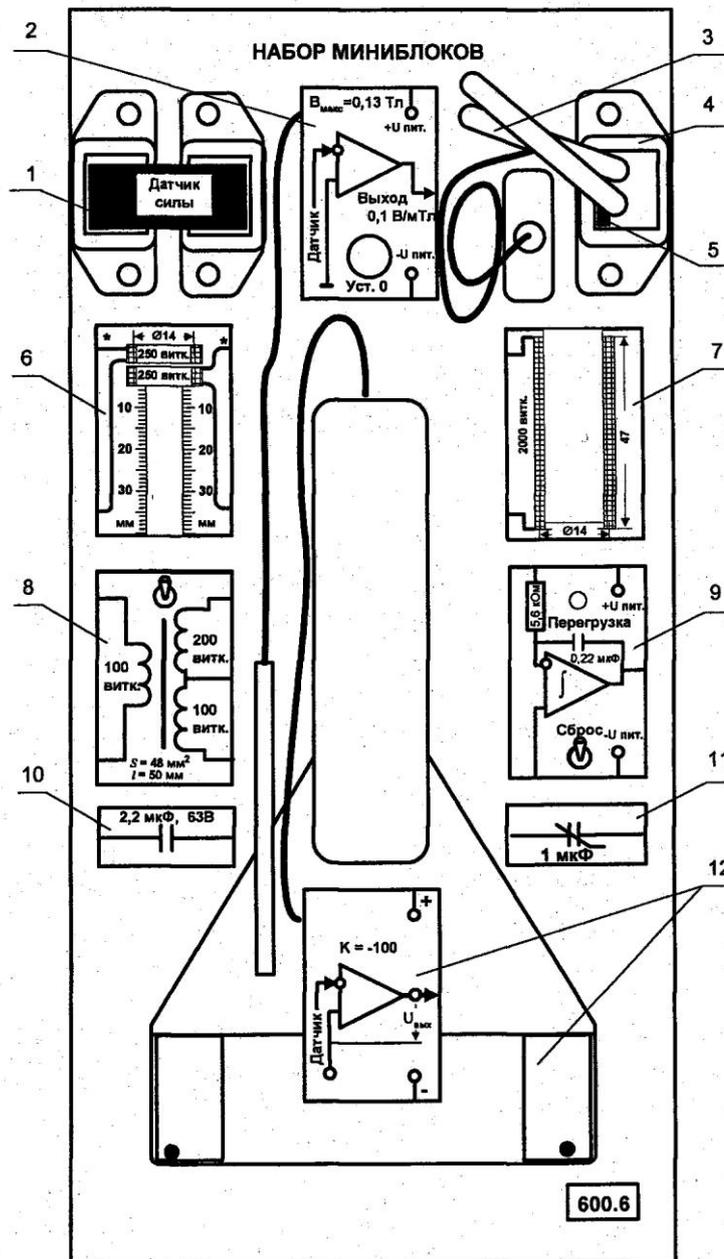


Рис.1.7

Для компенсации несимметрии датчика Холла и дрейфа «нуля» усилителя на миниблоке имеется ручка управления «Установка нуля». Для подготовки тесламетра к работе необходимо установить его в наборное поле, подключить к нему питание +15 В, а к выходу - мультиметр для измерения напряжения, включить блок генераторов напряжений и, поворачивая ручку «Установка нуля», добиться как можно меньшего значения напряжения на выходе (обычно это меньше 20 мВ). Чувствительность тесламетра отрегулирована изготовителем и составляет 0,1 В/мТл. Контроль

установки «нуля» и её корректировку необходимо проводить время от времени в течение всего опыта.

На этикетке указано также максимально возможное значение измеряемой индукции 0,13 Тл. При большем значении индукции напряжение на выходе усилителя приближается к напряжению питания и его дальнейшее увеличение невозможно. Сигнализации перегрузки здесь нет.

3. **«Пояс Роговского»** служит для измерения магнитодвижущих сил в замкнутом контуре или магнитных напряжений вдоль любого отрезка магнитной цепи. Он представляет собой гибкую ленту из изолирующего материала, равномерно обмотанную изолированным проводом по всей длине. Поперечное сечение пояса одинаково по всей длине и достаточно мало, чтобы считать магнитную индукцию по любому поперечному сечению пояса неизменной. Сечение и обмоточные данные пояса приведены на его этикетке.

4. **«Катушка»** - совместно с разъемным сердечником из набора трансформаторов используется для питания установки при исследовании поверхностного эффекта и эффекта близости и при исследовании распределения магнитных напряжений вдоль магнитной цепи. Обмоточные данные указаны на этикетке.

5. **«Сердечник»** - прямоугольный сердечник из электротехнической стали, служащий для изменения магнитного поля внутри катушки при исследовании распределения магнитных напряжений вдоль магнитной цепи.

6. Миниблок **«Кольцевые катушки»** предназначен для исследования магнитного поля на оси катушек и явления взаимной индукции. Одна из двух одинаковых катушек неподвижна, другая может перемещаться вдоль оси с помощью специального поводка. Минимальное расстояние между центрами катушек 5 мм. На этикетке имеется шкала, по которой можно определить текущее расстояние между катушками, указаны одноимённые зажимы, числа витков и средний диаметр катушек, а также показано расположение выводов. Для измерения магнитной индукции на оси катушек используется миниблок «Тесламетр», в котором имеется щуп с датчиком Холла. Максимальный допустимый ток катушек 200 мА.

7. Миниблок **«Цилиндрическая катушка»** служит для исследования магнитного поля на её оси с помощью датчика Холла (миниблок «Тесламетр»). На этикетке указаны число витков, средний диаметр и длина катушки.

8. Миниблок **«Трансформатор тороидальный»** предназначен для повышения или понижения переменного напряжения, и также может быть использован для исследования магнитных свойств ферромагнитных сердечников. Он выполнен на двух ферритовых кольцах М2000НМ диаметром 20 мм и имеет три обмотки - 100, 100 и 200 витков. На миниблоке имеется двухполюсный переключатель, при переключении которого изменяется направление тока в первичной обмотке.

9. Миниблок **«Интегратор»** предназначен для интегрирования входного сигнала  $u_{вх}(t)$  или  $i_{вх}(t)$  по времени:

$$u_{вых} = \frac{1}{R} \frac{1}{C} \int u_{вх}(t) dt = \frac{1}{C} \int i_{вх}(t) dt.$$

Параметры  $R_{вх}$  и  $C$  указаны на упрощенной принципиальной схеме интегратора (рис. 1.8).

Интегратор имеет два режима работы. При разомкнутом состоянии выключателя «Сброс» (нижнее положение тумблера на миниблоке) происходит интегрирование входного сигнала. Напряжение на выходе в этом режиме медленно изменяется даже при отсутствии входного сигнала, поскольку всегда есть внутренние утечки схемы и помехи. Этот режим используется для интегрирования кратковременных одиночных импульсов тока или напряжения. Перед началом интегрирования необходимо «обнулить» интегратор включив на 2.. 3 с выключатель «Сброс».

При включённом выключателе «Сброс» (верхнее положение тумблера на миниблоке) медленно изменяющаяся составляющая входного сигнала не интегрируется. Этот режим используется для возвращения интегратора в нулевое положение и для интегрирования периодических быстро протекающих процессов, например, при снятии петли гистерезиса.

Напряжение на выходе интегратора не может быть больше напряжения питания, поэтому, когда оно приближается к напряжению питания +15 В или -15 В, включается светодиод «Перегрузка».

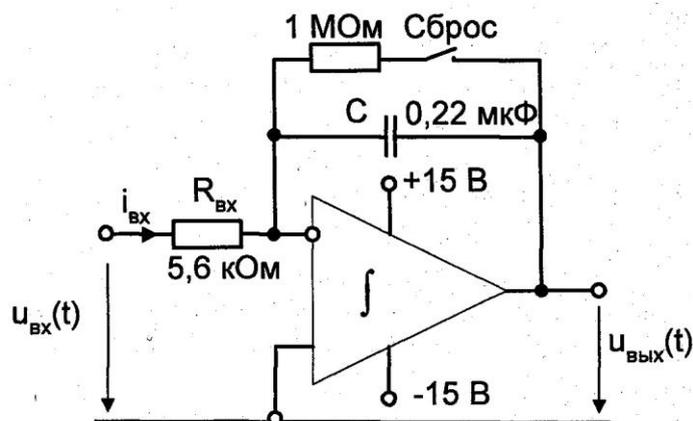


Рис.1.8

10. Миниблок «**Конденсатор**» - конденсатор типа К 73-17, 2.2 мкФ, 63 В. Используется для компенсации реактивного сопротивления при исследовании поверхностного эффекта.

11. Миниблок «**Нелинейный конденсатор**» - конденсатор типа К10-17-26 или Y5V, 1 мкФ, 25 В. Используется для исследования свойств нелинейных конденсаторов (при напряжениях больше 25 В).

12. Устройство «**Датчик-усилитель плотности тока**» предназначено для исследования распределения переменного тока по сечению массивных проводников. Устройство состоит из датчика плотности тока и усилителя. Датчик плотности тока представляет собой пластинку из стеклотекстолита, в которую вмонтированы два миниатюрных контакта. Провода от контактов проходят вдоль нити тока в исследуемом проводнике до середины пластинки, затем они поворачивают на 90° и проходят вместе сквозь ручку к усилителю напряжения. При прижатии контактов к исследуемой поверхности, соединительные провода датчика оказываются расположенными почти вплотную к этой поверхности. В результате, магнитный поток, сцепленный с контуром измерительной цепи, оказывается близким к нулю и на вход усилителя подводится только активная составляющая напряжения, пропорциональная плотности тока.

### 1.1.9 Набор планшетов для моделирования электрических и магнитных полей

Набор содержит пять сменных планшетов с различной конфигурацией электродов. Собранная установка для моделирования с одним из планшетов показана на рис. 1.9. Остальные четыре планшета - на рис. 1.10. Планшет устанавливается в наборную панель и питание от регулируемого источника напряжения 0...15 В подаётся через гнёзда панели и провода с нижней

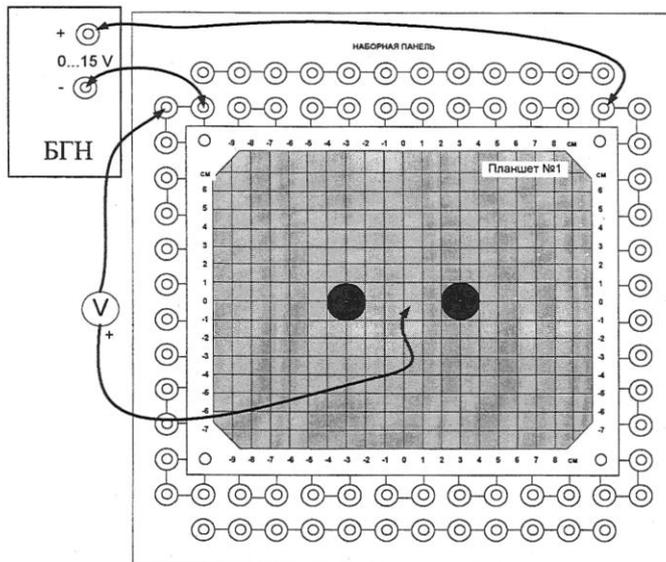


Рис.1.9

стороны планшета к медным электродам. Поверхность планшета покрыта резистивным слоем, в котором возникает ток. Эквипотенциальные линии поля постоянного тока снимаются по точкам с помощью вольтметра и переносятся на бумагу. Они аналогичны эквипотенциальным линиям электростатического поля, создаваемого заряженными протяжёнными проводниками, также как и силовым линиям магнитного поля, создаваемого проводниками с током. Планшеты №№ 1, 2, 3, 4 используются для моделирования электростатических полей заряженных длинных проводов соответствующих сечений. Планшет №1 и, в меньшей степени, №3 и №4 пригодны также и для моделирования магнитного поля двух-

проводной линии с током, на планшете №5 моделируется магнитное поле между полюсами и в зазоре явнополюсной электрической машины. На планшетах №3 и №4 при моделировании магнитного поля граничные условия обеспечиваются неточно, поэтому картина поля вблизи проводников, полученная с помощью модели несколько отличается от реальной.

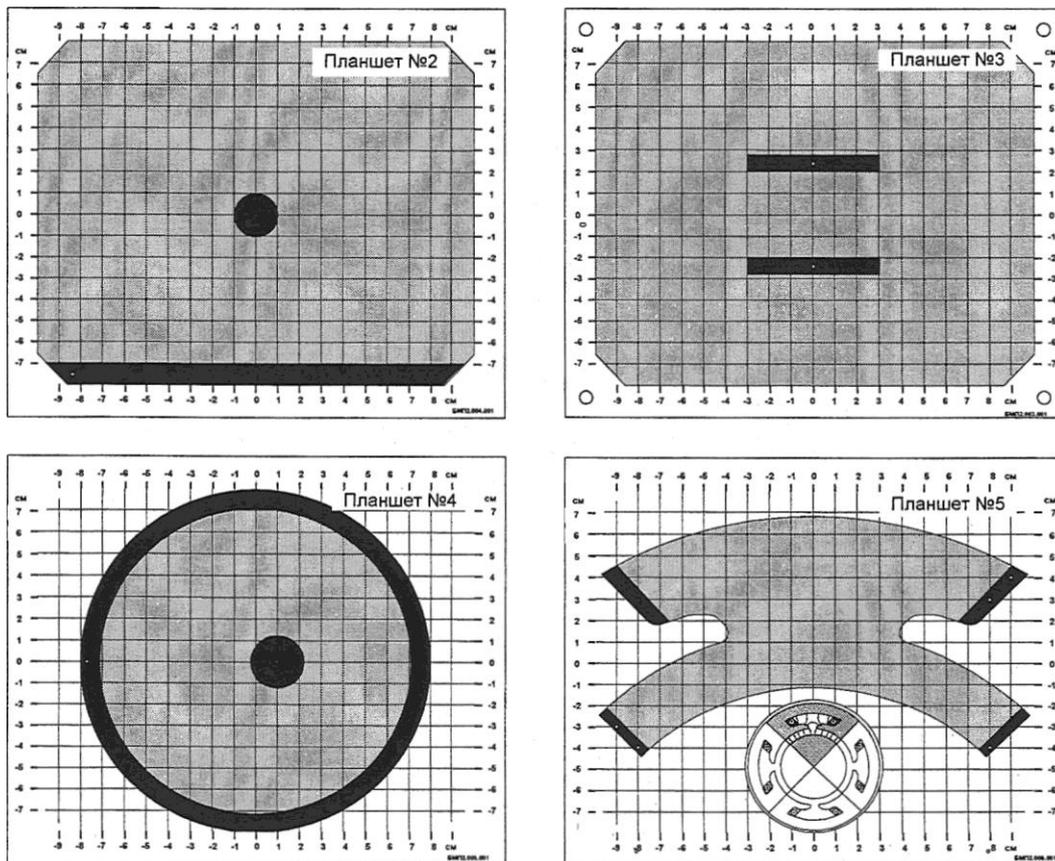


Рис.1.10

### 1.1.10 Набор устройств для моделирования поверхностного эффекта и эффекта близости

Набор состоит из четырёх устройств, одно из которых показано на рис. 1.11.

На стеклотекстолитовой плате смонтированы две медные ленты и вместе с соединительными шинами образуют замкнутый контур. К контуру подводится ток повышенной частоты через понижающий трансформатор, вторичной обмоткой которого является сам контур. Для измерения тока на токоподводе смонтирован трансформатор тока ( $K_t = 100$ ). Переменный ток в лентах распределяется неравномерно. Плотность тока уменьшается от внешних краёв ленты к середине (поверхностный эффект). При близком расположении лент друг к другу в них наблюдается и эффект близости.

Четыре устройства отличаются друг от друга геометрическим расположением медных лент. В одной из них лента помещена в ферромагнитный экран (аналогичный пазу ротора или статора электрической машины) и в ней наблюдается вытеснение тока на открытый край ленты.

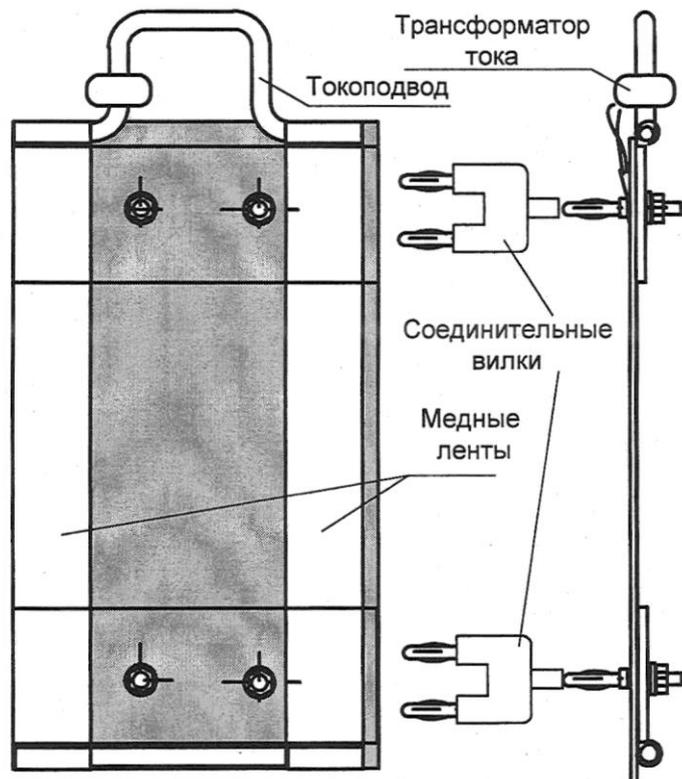


Рис.1.11

Для сборки установки необходимо сначала установить в левой верхней части наборной панели катушку трансформатора 170 витков вместе с нижней U-образной частью разъемного сердечника, затем надеть на катушку один из исследуемых проводящих контуров и закрепить его над наборной панелью, пользуясь соединительными вилками со средним выводом, как подставками. Подставки необходимы для увеличения расстояния между исследуемыми проводниками и металлической поверхностью наборной панели. Иначе наводимые в ней вихревые токи существенно изменят распределение тока в исследуемых проводниках. Затем в катушку в катушку устанавливается вторая половина сердечника и скрепляется с первой резиновым кольцом. После этого в наборную панель устанавливается усилитель датчика тока, собирается цепь питания, и подключаются измерительные приборы в соответствии со схемой опыта.

## 1.2 Экспериментальная часть

### Задание

Проверить работоспособность блока генераторов напряжений и измерительных приборов.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме рис. 1.12, включив в нее для начала резистор  $R = 1000 \text{ Ом}$ . Подайте на вход питание от нерегулируемого источника постоянного напряжения  $15 \text{ В}$ , отрегулируйте осциллограф и убедитесь, что пульсации напряжения незначительны или отсутствуют, что напряжение равно  $15 \pm 0,5 \text{ В}$ , а ток примерно равен  $150 \text{ мА}$ .
- Установите пределы измерения ваттметра  $100 \text{ В}$ ,  $0,2 \text{ А}$  и проверьте, совпадает ли его показание с расчётным значением  $P = U \cdot I$ . Переключая пределы измерения ваттметра по току и по напряжению, проверьте, работает ли сигнализация перегрузок  $I >$  и  $U >$ .
- **Переключите мультиметр для измерения тока  $10 \text{ А}$** , замените резистор  $100 \text{ Ом}$  на  $47$  или  $33 \text{ Ом}$ , убедитесь, что появляются пульсации напряжения на выходе и через некоторое время срабатывает защита и включается сигнализация перегрузки.

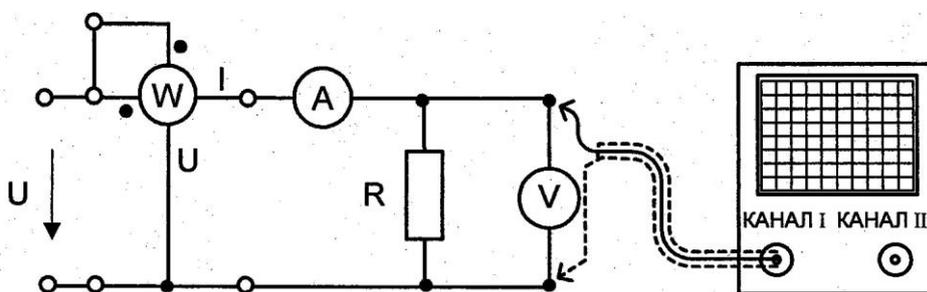


Рис. 1.11

- Повторите этот опыт с другим нерегулируемым источником напряжения  $15 \text{ В}$  и с регулируемым источником при максимальном напряжении на его выходе. Проверьте, как работает регулятор напряжения источника и сигнализация  $I <$ , и  $U <$  ваттметра при уменьшении тока и напряжения.
- Установите в схему резистор  $47 \text{ Ом}$ , переключите мультиметры для измерения синусоидальных сигналов и подключите к схеме генератор напряжений специальной формы.
- Установите синусоидальный сигнал на выходе и убедитесь, что частота регулируется от  $0,2$  до  $20 \text{ кГц}$  (по встроенному частотометру), а амплитуда напряжения - от  $0$  до  $10 \text{ В}$  (по осциллографу). На частоте  $1000 \text{ Гц}$  (или какой-нибудь другой) убедитесь, что переключается форма сигнала. **Внимание! Мультиметры не измеряют несинусоидальные токи и напряжения!**
- Замените резистор  $47 \text{ Ом}$  на  $22 \text{ Ом}$  и убедитесь, что срабатывает защита и сигнализация перегрузки.
- Снова включите в схему резистор  $47 \text{ Ом}$ , и, подключая к ней напряжения  $U_{AO} > U_{BO}$ ,  $U_{CO}$ ,  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$  трёхфазного источника, убедитесь что фазные напряжения примерно равны  $7 \text{ В}$  а линейные -  $12 \text{ В}$ . **Внимание! При высокой температуре в помещении и длительном протекании тока от линейного напряжения возможно срабатывание самовосстанавливающегося предохранителя.** Замените резистор  $47 \text{ Ом}$  на  $22 \text{ Ом}$  и проверьте работу защиты каждой фазы.

- Теперь включите в схему резистор 150 Ом и подайте на неё переменное напряжение от источника -24 В. Убедитесь, что напряжение составляет 24...27 В. **Внимание! Форма этого напряжения повторяет напряжение питающей сети.** Она отличается от синусоидальной из-за большой выпрямительной нагрузки как в питающей сети, так и в данном блоке генераторов напряжений. Проверьте работу защиты, включив в схему сопротивление 22 Ом.

## 2. Параметры синусоидального напряжения (тока)

### 2.1. Общие сведения

**Переменный ток**, в противоположность постоянному току, периодически меняет свое направление. Кривая (функция) переменного тока или напряжения, соответственно, может иметь различную форму. На рис. 2.1 показаны

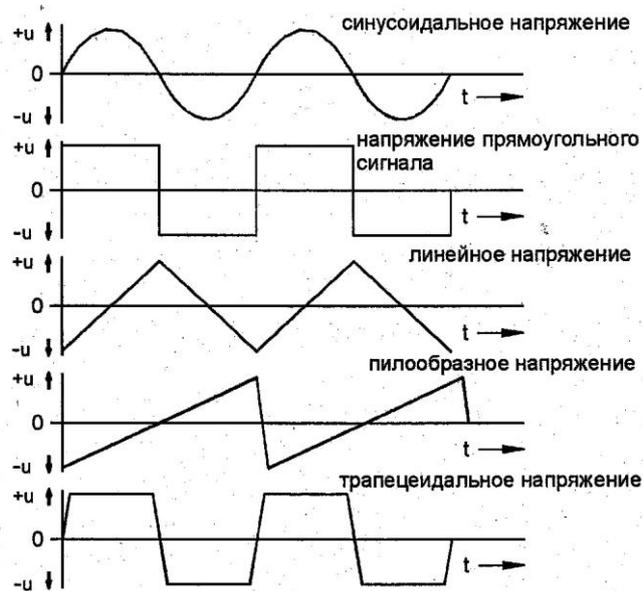


Рис. 2.1

некоторые из типичных для электротехники и электроники функций. Кроме того, различают **однофазные** и **многофазные** переменные напряжения и токи. Например, электроснабжение массовых потребителей осуществляется, как правило, посредством трехфазного синусоидального тока. Однако, при использовании в цепях электроснабжения нелинейных элементов (насыщающихся дросселей и трансформаторов, полупроводниковых приборов) форма токов может отличаться от синусоидальной. В электронных цепях используются самые разнообразные формы сигналов (прямоугольные, пилообразные, треугольные и другие)

Наиболее важными параметрами переменных токов и напряжений являются **частота**, **амплитуда**, **среднеквадратическое (действующее) значение**, **фазовый сдвиг (угол)** и **мощность**.

На рис. 2.2а показаны синусоидальное напряжение и ток как функции времени.

В течение одного **периода T** напряжение последовательно оказывается равным нулю, положительному максимуму (**амплитудное значение**)  $U_m$ , затем нулю, отрицательному максимуму и снова нулю.

Аналогично выглядит график изменения тока, но в общем случае он может быть сдвинут во времени относительно напряжения (отставать от напряжения или опережать его).

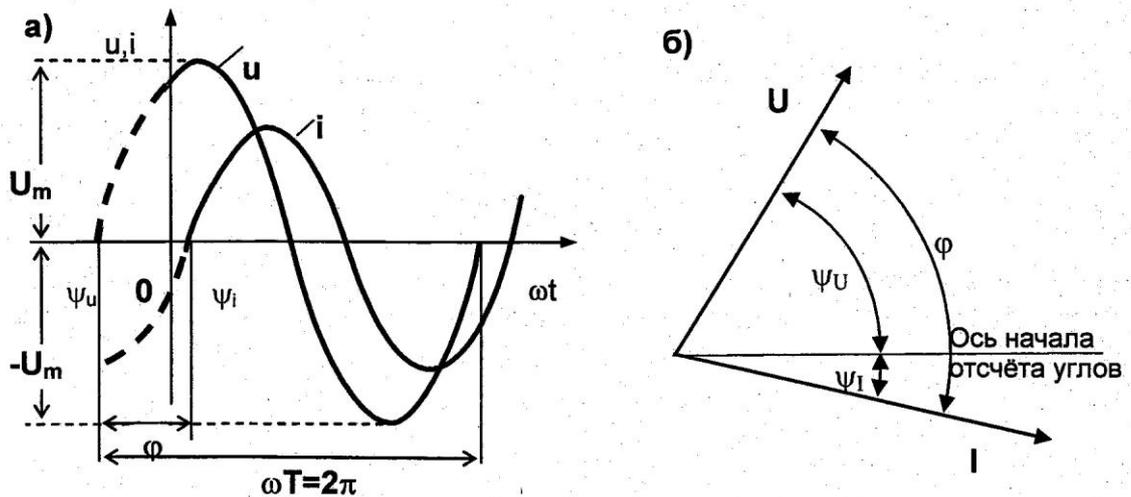


Рис. 2.2

**Мгновенные значения** синусоидальных напряжения **и** и тока **i** выражаются так:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \Psi_u), \quad i = I_m \cdot \sin(\omega t + \Psi_i),$$

Другие параметры синусоидальных величин и формулы для их вычисления приведены ниже.

**Разность фаз** напряжения и тока (фазовый сдвиг):  $\omega = \Psi_u - \Psi_i$ , где  $\Psi_u$  и  $\Psi_i$  - начальные фазы напряжения и тока.

**Частота**  $f$  в Герцах (Гц) выражается как число периодов в секунду:  $f = 1/T$ .

**Угловая частота**  $\omega$  в рад/с равна:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ .

**Действующие значения** синусоидальных величин:  $I = I_m / \sqrt{2}$ ,  $U = U_m / \sqrt{2}$ .

На рис 2.26 показано изображение синусоидальных тока и напряжения в виде векторов. Длина вектора соответствует действующему или амплитудному значению, а угол по отношению к произвольно выбранному началу отсчёта углов - начальной фазе синусоидальной величины.

## 2.2. Экспериментальная часть

### Задание

Выведите на экран осциллографа синусоидальные ток и напряжение на нагрузке и определите следующие величины:

амплитудное значение напряжения  $U_m$ ,

амплитудное значение тока  $I_m$ ,

действующее значение напряжения  $U$ ,

действующее значение тока  $I$ ,

период  $T$ ,

частота  $f$ ,

угловую частоту  $\omega$ ,

фазовый сдвиг  $\phi$ ,

мгновенное значение напряжения  $u$  в момент времени  $t = T / 3$ .

## Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 2.3), подключите регулируемый источник синусоидального напряжения ( $U_m = 10 \text{ В}$ ,  $f = 0,5 \text{ кГц}$ ).

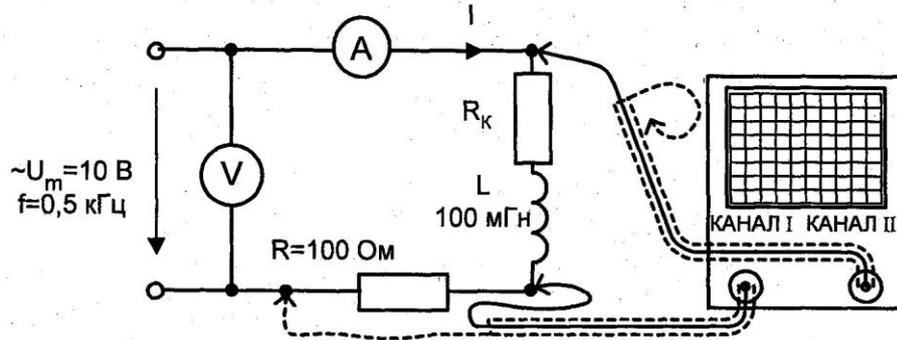


Рис. 2.3

- Включите и настройте осциллограф. Напряжение с сопротивления 100 Ом, пропорциональное току подаётся на первый канал осциллографа, а напряжение, подведённое к цепи - на второй канал.

Установите параметры развёртки и чувствительность каналов осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного - двух периодов напряжения и тока.

### Примечания:

1) для измерения разности фаз необходимо использовать режим прерывистого (не поочерёдного!) изображения сигналов двух каналов осциллографа.

2) Пользуйтесь только стандартными (фиксированными) коэффициентами усиления каналов осциллографа и развёртки!

- Определите по осциллографу все указанные ниже величины.

Амплитудное значение напряжения:

$$U_m = A \cdot m_{U2} = \dots \text{В},$$

где

$A = \dots$  дел. - амплитуда кривой напряжения на экране осциллографа в делениях сетки,

$m_{U2} = \dots$  В/дел. - чувствительность второго канала осциллографа.

Амплитудное значение тока:

$$I_m = B \cdot m_{U1} / R = \dots \text{мА},$$

где

$B = \dots$  дел. - амплитуда кривой тока в делениях сетки,

$m_{U1} = \dots$  В/дел. - чувствительность первого канала осциллографа,

$R = 100 \text{ Ом}$  - сопротивление шунта, с которого снимается сигнал тока.

Действующее значение напряжения

$$U = U_m / \sqrt{2} = \dots \text{В}.$$

Действующее значение тока

$$I = I_m / \sqrt{2} = \dots\dots\dots \text{мА.}$$

Период

$$T = C \cdot m_t \dots\dots\dots \text{мс,}$$

где

$C = \dots\dots\dots$  дел. - период в делениях сетки осциллографа,

$m_t = \dots\dots\dots$  мс/дел. - чувствительность осциллограф по каналу развёртки.

Частота

$$f = 1/T = \dots\dots\dots \text{Гц.}$$

Угловая частота

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \dots\dots\dots 1/\text{с.}$$

Фазовый сдвиг

$$\varphi = 360 \cdot D/C = \dots\dots\dots \text{град.,}$$

где

$D = \dots\dots\dots$  дел. - сдвиг тока и напряжения в делениях сетки осциллографа,

$C = \dots\dots\dots$  дел. - период в делениях сетки осциллографа.

Мгновенное значение напряжения  $u$  в момент времени  $t = T / 3$

$$u = U_m \cdot \sin \omega t =$$

**Примечание:**  $\omega t$  - угол, измеряемый в радианах.

- Запишите результаты измерений и вычислений в табл. 2.1.

Таблица 2.

Средства измерения	$U_m$ , В	$I_m$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА	$T$ , мС	$f$ , В	$\omega$ , рад/с	$\varphi$ , град	$u(T/3)$ В
Осциллограф									
Мультиметр	-	-			-	-	-	-	-

- Измерьте  $U$  и  $I$  с помощью мультиметров, занесите результаты в табл. 2.1 и сравните с результатами измерения осциллографом.

- Выберите масштабы и изобразите действующие значения тока и напряжения на векторной диаграмме (рис.2.4).

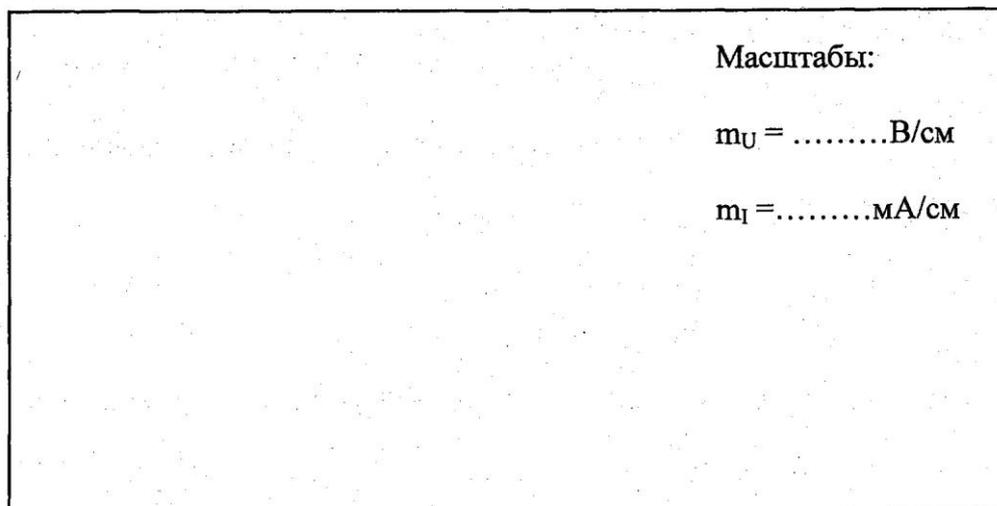


Рис. 2.4

### 3. Активная мощность цепи синусоидального тока

#### 3.1. Общие сведения

Когда синусоидальное напряжение прикладывается к резистивной нагрузке, в ней возникает синусоидальный ток. При этом ток и напряжение совпадают *по фазе*, то есть оба они достигают положительных и отрицательных амплитудных значений одновременно (рис. 3.1).

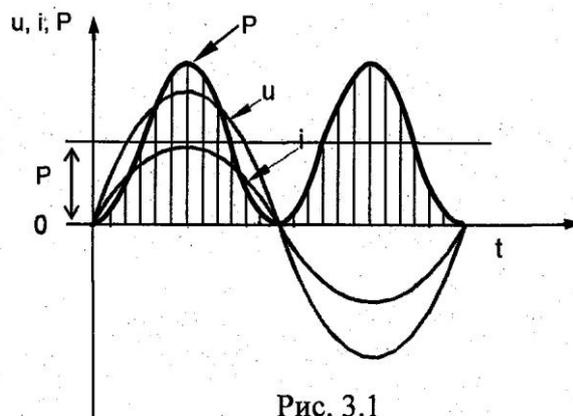


Рис. 3.1

Мощность, которая выделяется в чисто резистивной нагрузке, определяется как произведение напряжения на ток. Кривую мгновенных значений мощности можно построить, перемножив мгновенные значения напряжения и тока, взятые попарно в различные моменты времени:

$$p = u \cdot i = i^2 R = u^2 / R.$$

Мгновенная мощность пульсирует с двойной частотой. Среднее значение мощности называется **активной мощностью**. Она выражается через действующие значения напряжения и тока на резисторе:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R = U^2 / R.$$

#### 3.2. Экспериментальная часть

##### Задание

Снимите с помощью осциллографа синусоидальную кривую напряжения на резисторе, сделайте бумажную копию осциллограммы, постройте кривую мощности и определите среднее значение.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 3.2), подключите регулируемый источник синусоидального напряжения и установите напряжение максимальной амплитуды с частотой 0,5 кГц.

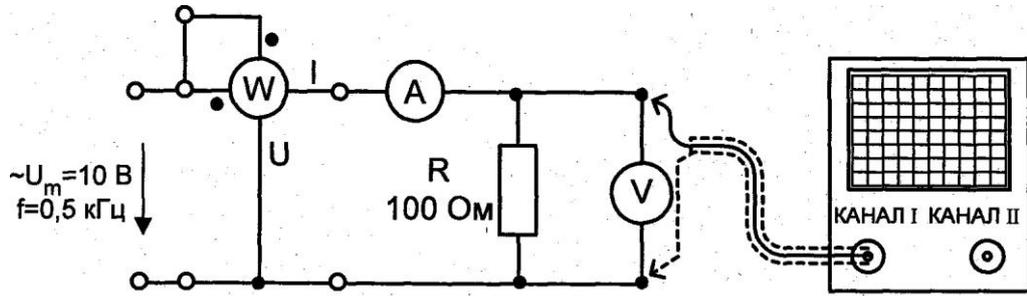
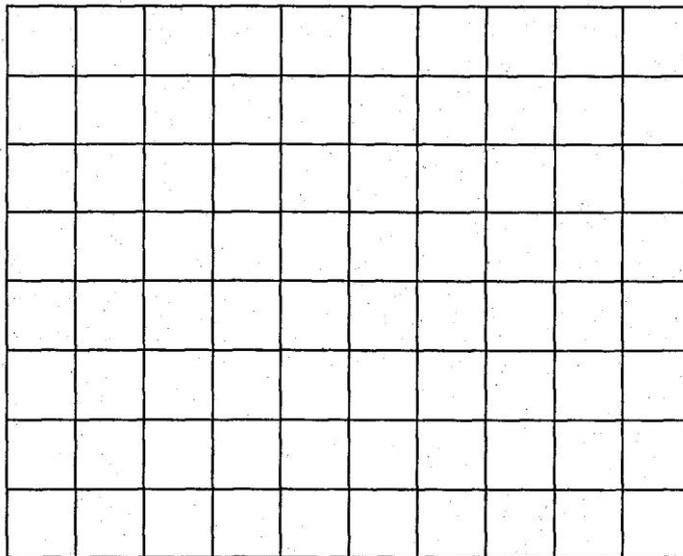


Рис. 3.2

- Установите параметры развёртки и усиления осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного периода напряжения.

**Примечание:** для измерения разности фаз необходимо использовать режим прерывистого (не поочерёдного!) изображения сигналов двух каналов осциллографа.

- Перенесите осциллограммы напряжения и тока на бумагу (рис. 3.3).



#### Масштабы

По каналу I:  
 $m_U = \dots \text{ В/дел.}$

По времени:  
 $m_t = \dots \text{ мс/дел.}$

Рис. 3.3

- Постройте график изменения мощности, вычисляя её значения в различные моменты времени по формуле:  $p = u^2/R$ . Определите по полученной кривой среднюю мощность и сравните её с показанием ваттметра. *При измерении ваттметром не обращайте внимание на сигнализацию  $U >$ ,  $I >$ ,  $U <$ ,  $I <$ .*

По осциллограмме:  $P_{cp} = \dots \text{ Вт}$

По ваттметру:  $P = \dots \text{ Вт}$

## 4. Цепи синусоидального тока с конденсаторами

### 4.1. Напряжение, ток, сопротивление и мощность конденсатора

#### 4.1.1. Общие сведения

Когда к конденсатору приложено синусоидальное напряжение, он периодически заряжается и разряжается. Ввиду переменного характера напряжения периодически меняется также полярность заряда конденсатора. Ток в конденсаторе  $i_C$  достигает своего амплитудного значения каждый раз, когда напряжение  $u_C$  на нем проходит через нуль (рис. 4.1.1.). Таким образом, синусоида тока  $i_C$  опережает синусоиду напряжения  $u_C$  на  $90^\circ$ . **Фазовый сдвиг:**  $\varphi = \Psi_u - \Psi_i = -90^\circ$ .

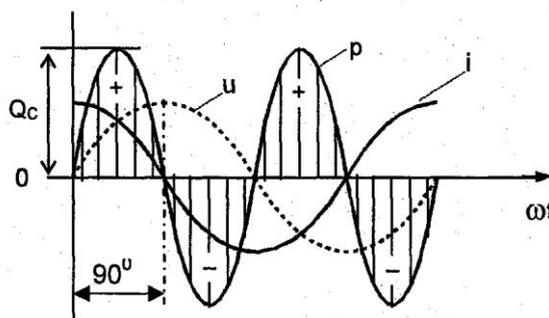


Рис. 4.1.1

Амплитуда синусоидального напряжения на конденсаторе пропорциональна амплитуде тока:

$$U_{Cm} = I_{Cm}/(\omega C).$$

Также пропорциональны и действующие значения тока и напряжения.

Коэффициент пропорциональности  $1/(\omega C)$  называется **ёмкостным** или **реактивным сопротивлением конденсатора** и обозначается  $X_C$ . Таким образом, амплитуды и действующие значения тока и напряжения на конденсаторе связаны выражением аналогичным закону Ома:

$$U_{Cm} = X_C \cdot I_{Cm} \text{ или } U_C = X_C \cdot I_C$$

Ёмкостное сопротивление уменьшается с увеличением частоты.

Реактивному сопротивлению конденсатора присваивают знак «-» в отличие от индуктивного реактивного сопротивления, которому приписывают знак «+».

Мгновенная мощность, потребляемая конденсатором, определяется как произведение напряжения и тока:

$$p = u \cdot i$$

График изменения этой мощности можно построить, перемножая попарно ординаты графиков  $u(t)$  и  $i(t)$ , взятые в один и тот же момент времени. Полученная таким образом кривая (рис. 4.1.1) представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой:

$$Q_C = U_{Cm} \cdot I_{Cm} / 2 = U_C \cdot I_C.$$

Когда  $p > 0$ , конденсатор заряжается, потребляя энергию и запасая ее в электрическом поле. Когда  $p < 0$ , он отдает ее другим элементам цепи, являясь источником энергии. Величина  $Q_C$  является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой конденсатором, и называется **емкостной реактивной мощностью**. Единицей измерения реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (вар).

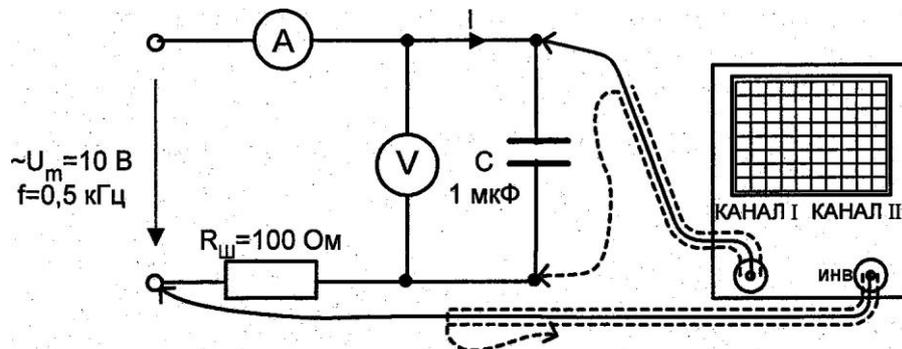
Средняя (активная) мощность, потребляемая конденсатором, равна нулю.

#### 4.1.2. Экспериментальная часть

##### Задание

Выведите кривые тока и напряжения конденсатора на экран осциллографа и определите фазовый сдвиг между синусоидами  $u_C(t)$  и  $i_C(t)$ , постройте график изменения мощности, определите реактивные сопротивления конденсаторов различной ёмкости.

##### Порядок выполнения эксперимента



- Соберите цепь согласно схеме (рис. 4.1.2), подключите регулируемый источник синусоидального напряжения и установите напряжение максимальной амплитуды с частотой 0,5 кГц. Напряжение с конденсатора подаётся на первый канал осциллографа, а **инвертированное** напряжение с сопротивления, пропорциональное току - на второй.

- Установите параметры развёртки и усиления осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного периода напряжения и тока. **Примечание: для измерения разности фаз необходимо использовать режим прерывистого (не поочерёдно!) изображения сигналов двух каналов осциллографа.**

- Перенесите кривые на график (рис. 4.1.3) и определите период и фазовый сдвиг между напряжением на конденсаторе  $u_C(t)$  и током  $i_C(t)$ .

Период:

$$T = C \cdot m_t \dots\dots\dots \text{мс},$$

где  $C = \dots\dots\dots$  дел. - период в делениях сетки осциллографа,

$m_t = \dots\dots\dots$  мс/дел. - чувствительность осциллограф по каналу развёртки.

Фазовый сдвиг:

$$\omega = 360 \cdot D \cdot C = \dots\dots\dots \text{град.}$$

где  $D = \dots\dots\dots$  дел. - сдвиг тока и напряжения в делениях сетки осциллографа,

$C = \dots\dots\dots$  дел. - период в делениях сетки осциллографа.

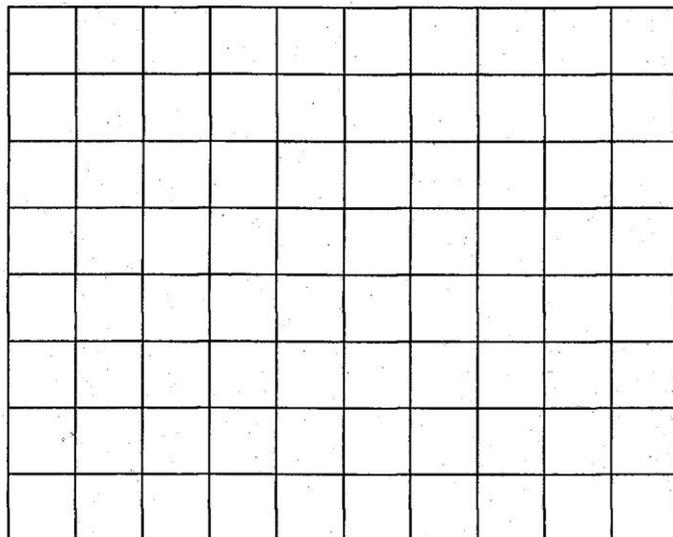
- Постройте график изменения мощности конденсатора и определите по нему реактивную мощность как амплитуду мгновенной мощности:

$$Q_C = \dots\dots\dots \text{вар.}$$

- Измерьте действующие значения тока и напряжения на конденсаторе мультиметрами и определите реактивную мощность как

$$Q_C = U_C \cdot I_C = \dots\dots\dots \text{вар.}$$

Сравните результаты.



**Масштабы**

По каналу II:

$$m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$$

По каналу I:

$$m_I = m_U / R_{ш} = \dots\dots\dots \text{мА/дел.}$$

По времени:

$$m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел.}$$

Рис. 4.1.3

- Измерьте действующие значения тока и напряжения на конденсаторе мультиметрами при различных значениях ёмкости и частоты, указанных в табл. 4.1.1.
- Рассчитайте ёмкостные сопротивления по результатам этих измерений как  $U/I$  и по формуле:  $X_C = 1/(\omega C)$ . Сравните результаты.
- На рис. 4.1.4 постройте графики  $X_C = f(f)$  для каждого конденсатора.

Таблица 4.1.1

		$f=0,4$ кГц	$f=0,6$ кГц	$f=0,8$ кГц	$f=1$ кГц
<b>1,0</b> мкФ	<b>U, В</b>				
	<b>I, мА</b>				
	<b>U/I, кОм</b>				
	<b><math>1/(\omega C)</math>, кОм</b>				
<b>0,47</b> мкФ	<b>U, В</b>				
	<b>I, мА</b>				
	<b>U/I, кОм</b>				
	<b><math>1/(\omega C)</math>, кОм</b>				
<b>0,22</b> мкФ	<b>U, В</b>				
	<b>I, мА</b>				
	<b>U/I, кОм</b>				
	<b><math>1/(\omega C)</math>, кОм</b>				

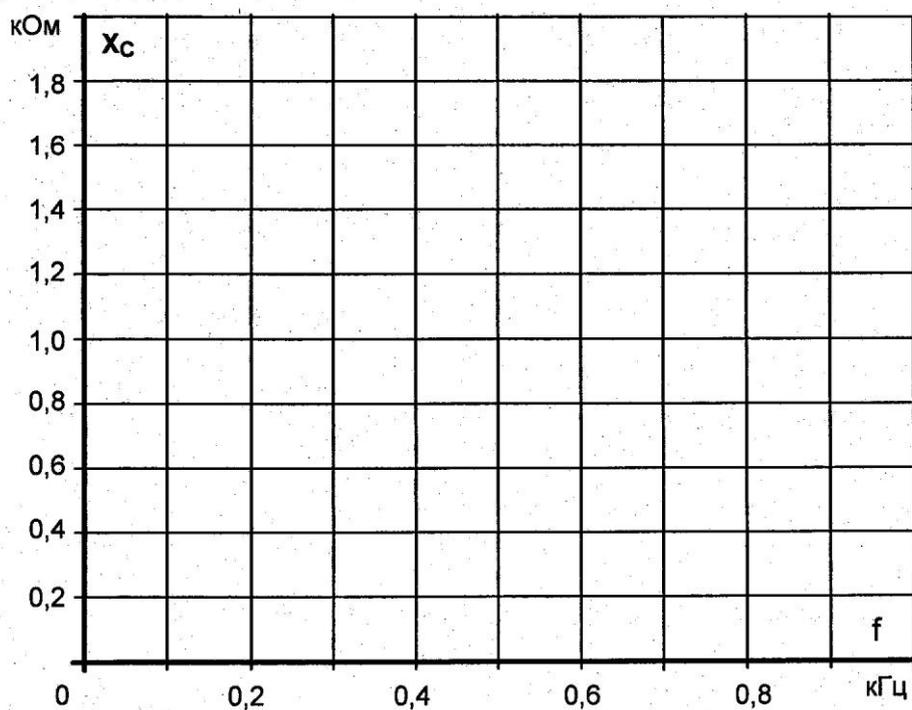


Рис. 4.1.4

## 4.2. Последовательное и параллельное соединения конденсаторов

### 4.2.1. Общие сведения

При параллельном соединении конденсаторов (рис.4.2.1) эквивалентная емкость цепи равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

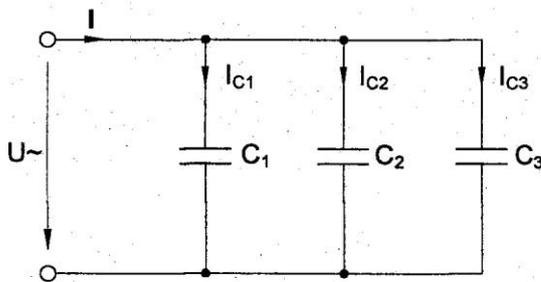


Рис. 4.2.1

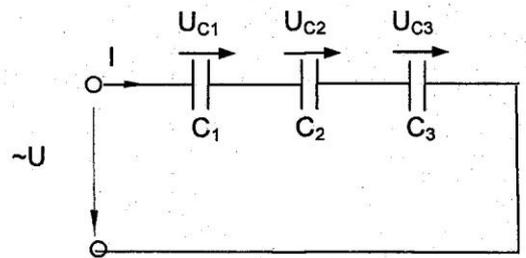


Рис. 4.2.2

Токи в параллельных ветвях (конденсаторах) пропорциональны соответствующим емкостям, причем сумма токов ветвей равна общему току цепи  $I$ . Напряжения на всех конденсаторах одинаковы и равны  $U$ .

Когда несколько конденсаторов соединены последовательно, эквивалентная емкость цепи меньше емкости наименьшего конденсатора. Вычисляется она по формуле:

$$C_{\Sigma} = 1 / (1 / C_1 + 1 / C_2 + 1 / C_3 + \dots).$$

Если последовательно соединено только 2 конденсатора, общая емкость равна

$$C_{\Sigma} = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2).$$

Падения напряжения на отдельных конденсаторах обратно пропорциональны соответствующим емкостям и их сумма равна общему напряжению  $\sum U_c$ . Ток в любой точке последовательной цепи с конденсаторами один и тот же.

### 4.3.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Убедитесь путем измерения тока и напряжения, что при последовательном соединении конденсаторов общая емкость цепи меньше емкости наименьшего конденсатора а при параллельном соединении равна сумме ёмкостей.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь с параллельным соединением конденсаторов (рис. 4.2.3) и подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами  $U_m = 10\text{В}$  и  $f = 1\text{кГц}$ . Для измерения токов одним прибором вставьте в соответствующих местах схемы перемычки.

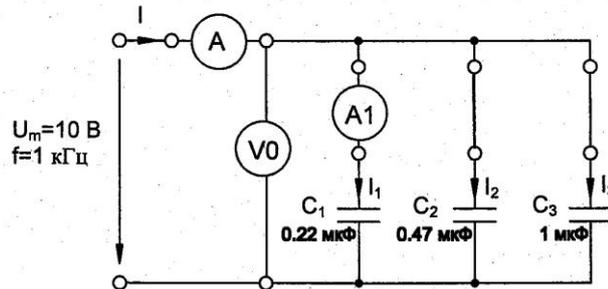


Рис.4.2.3

- Поочерёдно заменяя перемычки на амперметр (мультиметр в режиме амперметра), измерьте общий ток цепи  $I$ , токи параллельных ветвей  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ . Измерьте также напряжение на конденсаторах  $U$ , занесите данные измерений в табл. 4.2.1

Таблица 4.2.1

$U = \dots\dots\dots$ , <b>В</b>	$X_C = U/I_C$ , <b>Ом</b>	$C = 1/(\omega \cdot X_C)$ , <b>мкФ</b>	<b>Проверка</b>
$I$ , мА			$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3 =$
$I_1$ , мА			
$I_2$ , мА			
$I_3$ , мА			

- Вычислите емкостные реактансы  $X_{\Sigma}$ ,  $X_{C1}$ ,  $X_{C2}$ ,  $X_{C3}$  по формуле  $X_C = U/I_C$ .
- Определите емкости отдельных конденсаторов и эквивалентную емкость цепи по формуле  $C = 1/(\omega \cdot X_C)$ , где  $\omega = 2\pi f =$   $1/c$ .
- Проверьте вычислениями величину емкости  $C_{\Sigma}$ , найденную экспериментально.
- Соберите цепь с последовательным соединением конденсаторов (рис. 4.2.4) и измерьте с помощью мультиметра действующие значения тока в цепи, приложенного напряжения и напряжения на каждом конденсаторе. Результаты измерений занесите в табл. 4.2.2



## 5. Цепи синусоидального тока с катушками индуктивности

### 5.1. Напряжение, ток, сопротивление и мощность катушки индуктивности

#### 5.1.1. Общие сведения

Когда по катушке индуктивности протекает переменный ток, в ней наводится встречная ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

При синусоидальном токе  $i = I_m \sin \omega t$  напряжение на катушке  $u_l = -e_L = \omega L I_m \cos \omega t$  опережает ток на  $90^\circ$ . Соответственно, мгновенное значение тока переходит через ноль на четверть периода позже, чем мгновенное значение напряжения (рис. 5.1.1). В этом рассуждении пренебрегается активным сопротивлением катушки, т.е. катушка считается идеальной.

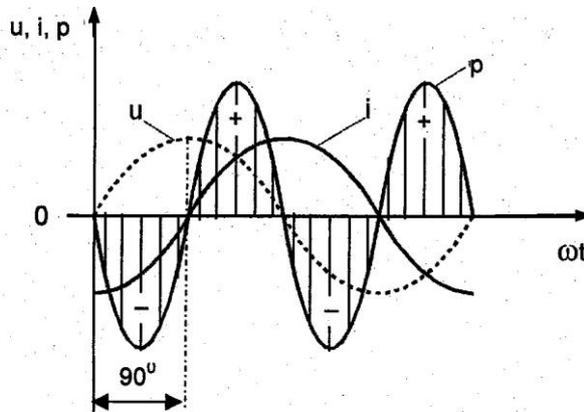


Рис. 5.1.1

Амплитуда синусоидального напряжения на катушке пропорциональна амплитуде тока:

$$U_{Cm} = I_{Cm} \cdot \omega L.$$

Также пропорциональны и действующие значения тока и напряжения.

Коэффициент пропорциональности  $\omega L$  называется **индуктивным** или **реактивным сопротивлением катушки** и обозначается  $X_L$ . Таким образом, амплитуды и действующие значения тока и напряжения на катушке индуктивности связаны выражением аналогичным закону Ома:

$$U_{Lm} = X_L \cdot I_{Lm} \text{ или } U_L = X_L \cdot I_L$$

Индуктивное сопротивление увеличивается с увеличением частоты.

Реактивному сопротивлению катушки присваивают знак «+» в отличие от ёмкостного реактивного сопротивления, которому приписывают знак «-».

Мгновенная мощность, потребляемая идеальной катушкой, определяется как произведение напряжения и тока:

$$p = u \cdot i$$

График изменения этой мощности можно построить, перемножая попарно ординаты графиков  $u(t)$  и  $i(t)$ , взятые в один и тот же момент времени. Полученная таким образом кривая (рис. 4.1.1) без учёта активного сопротивления катушки представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой:

$$Q_L = U_{Lm} \cdot I_{Lm} / 2 = U_L \cdot I_L.$$

Когда  $p > 0$ , катушка потребляет энергию, запасая ее в магнитном поле. Когда  $p < 0$ , она отдает энергию другим элементам цепи, являясь источником энергии. Величина  $Q_L$  является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой катушкой, и называется **индуктивной реактивной мощностью**. Единицей измерения реактивной мощности является вольт-ампер реактивный (вар).

Средняя (активная) мощность, потребляемая идеальной катушкой индуктивности, равна нулю.

**В реальной катушке из-за наличия активного сопротивления фазовый сдвиг уменьшается, синусоида мгновенной мощности смещается вверх и среднее значение мощности становится больше нуля.**

### 5.1.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Выведите кривые тока и напряжения катушки на экран осциллографа и определите фазовый сдвиг между синусоидами  $u_L(t)$  и  $i_L(t)$ , постройте график изменения мощности, определите реактивные сопротивления катушек различной индуктивности.

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.1.2), где  $R_K$  - активное сопротивление катушки. Включите регулируемый источник синусоидального напряжения и установите напряжение максимальной амплитуды с частотой **0,5 кГц**. Напряжение с катушки подаётся на первый канал осциллографа, а **инвертированное** напряжение с сопротивления, пропорциональное току - на второй.

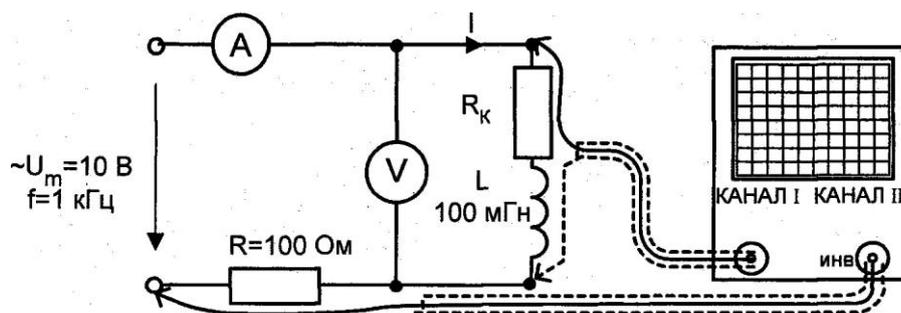
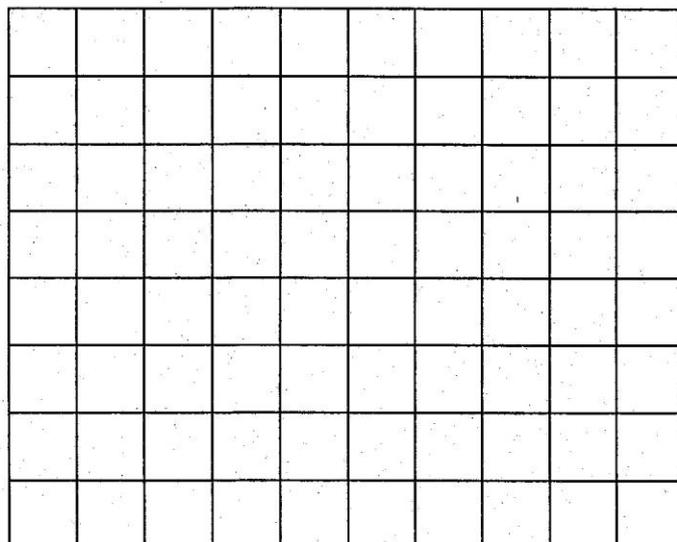


Рис 5.1.2

- Установите параметры развёртки и усиления осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного периода напряжения и тока. **Примечание: для измерения разности фаз необходимо использовать режим прерывистого (не поочерёдного!) изображения сигналов двух каналов осциллографа.**
- Перенесите кривые на график (рис. 5.1,3) и определите период и фазовый сдвиг между напряжением  $u_L(t)$  и током  $i_L(t)$  в катушке.



**Масштабы**

По каналу II:  
 $m_U = \dots\dots\dots$  В/дел.

По каналу I:  
 $m_I = m_U / R_{ш} = \dots\dots\dots$  мА/дел.

По времени:  
 $m_t = \dots\dots\dots$  мс/дел.

Рис. 5.1.3

Период:

$$T = C m_t \dots\dots\dots \text{мс},$$

где  $C = \dots\dots\dots$  дел. - период в делениях сетки осциллографа,

$m_t = \dots\dots\dots$  мс/дел. - чувствительность осциллографа по каналу развёртки.

Фазовый сдвиг:

$$\varphi = 360 \cdot D / C = \dots\dots\dots \text{град.}$$

где  $D = \dots\dots\dots$  дел. - сдвиг тока и напряжения в делениях сетки осциллографа,

$C = \dots\dots\dots$  дел. - период в делениях сетки осциллографа.

**Примечание:** фазовый сдвиг меньше  $90^\circ$  из-за влияния активного сопротивления катушки.

- Постройте график изменения мощности, потребляемой катушкой, и определите по нему реактивную мощность как амплитуду переменной составляющей мгновенной мощности:

$$Q_L = \dots\dots\dots \text{вар.}$$

Измерьте действующие значения тока и напряжения на конденсаторе мультиметра-ми и определите реактивную мощность как

$$Q_L = U_L \cdot I_L = \dots\dots\dots \text{вар.}$$

Сравните результаты.

- Измерьте действующие значения тока и напряжения на катушке мультиметрами при различных значениях индуктивности и частоты, указанных в табл. 5.1.1.
- Рассчитайте индуктивные сопротивления, по результатам этих измерений как  $U/I$  и по формуле:  $X_L = \omega L$ . Сравните результаты.
- На рис. 5.1.4 постройте расчётные и экспериментальные графики  $X_L = f(f)$  для каждой индуктивности. Объясните расхождение.

Таблица 5.1.1

		$f = 0,6 \text{ кГц}$ $\omega = \dots\dots\dots$	$f = 1,0 \text{ кГц}$ $\omega = \dots\dots\dots$	$f = 1,4 \text{ кГц}$ $\omega = \dots\dots\dots$	$f = 1,8 \text{ кГц}$ $\omega = \dots\dots\dots$
100 мГн	<b>U, В</b>				
	<b>I, мА</b>				
	<b>U/I, кОм</b>				
	<b><math>\omega L</math>, кОм</b>				
40 мГн	<b>U, В</b>				
	<b>I, мА</b>				
	<b>U/I, кОм</b>				
	<b><math>\omega L</math>, кОм</b>				
10 мГн	<b>U, В</b>				
	<b>I, мА</b>				
	<b>U/I, кОм</b>				
	<b><math>\omega L</math>, кОм</b>				

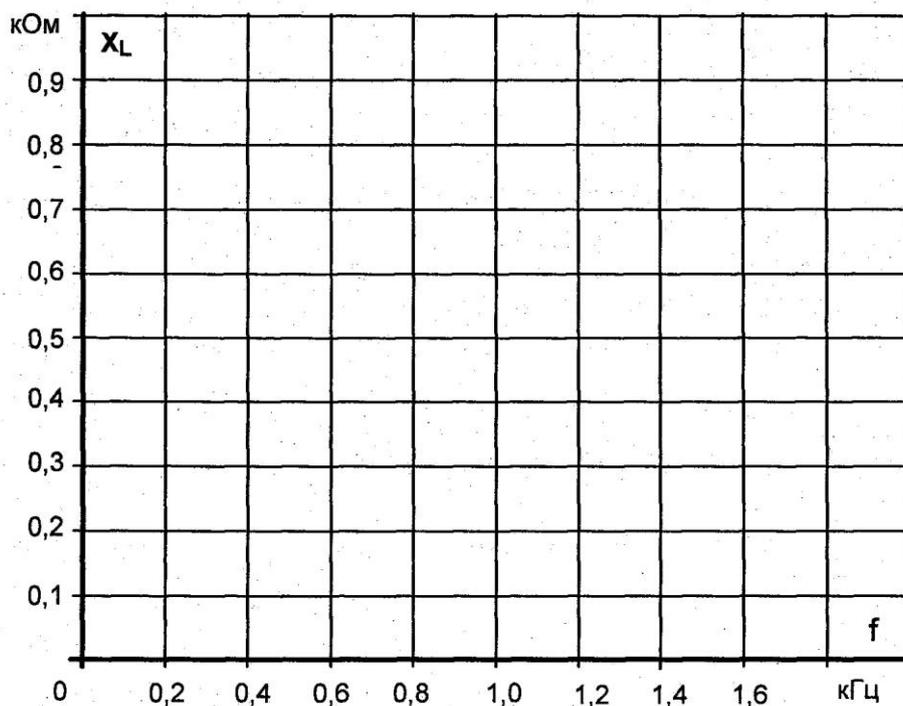


Рис. 5.1.4

## 5.2. Последовательное и параллельное соединения катушек индуктивности

### 5.2.1. Общие сведения

При последовательном соединении катушек через них протекает один и тот же ток, а напряжение, приложенное к цепи, равно сумме напряжений на отдельных катушках. **Здесь также как и в предыдущей работе, катушки считаются идеальными.** Если катушки расположены так, что их магнитные поля не влияют друг на друга, эквивалентная индуктивность цепи также равна сумме индуктивностей отдельных катушек:

$$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

При параллельном соединении ко всем катушкам приложено одно и то же напряжение, а ток, потребляемый от источника, равен сумме токов всех катушек, эквивалентная индуктивность определяется из выражения:

$$1 / L_{\Sigma} = 1 / L_1 + 1 / L_2 + 1 / L_3 + \dots$$

В частности, при параллельном соединении двух катушек:

$$L_{\Sigma} = L_1 \cdot L_2 / (L_1 + L_2).$$

### 5.2.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Убедитесь путем измерения тока и напряжения, что при последовательном соединении катушек эквивалентная индуктивность цепи равна сумме индуктивностей, а при параллельном соединении она меньше индуктивности наименьшей катушки.

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь с последовательным соединением катушек (рис. 5.2.1) и измерьте с помощью мультиметра действующие значения тока в цепи, приложенного напряжения и напряжения на каждой катушке. Результаты измерений занесите в табл. 5.2.1
- Вычислите индуктивные сопротивления  $X_{\Sigma}$ ,  $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$ ,  $X_{L3}$  по формуле  $X_L = U_L / I_L$ .
- Определите индуктивности отдельных катушек и эквивалентную индуктивность цепи по формуле  $L = X_L / \omega$ , где  $\omega = 2\pi f =$  1/с.
- Проверьте вычислениями величину эквивалентной индуктивности  $L_{\Sigma}$ , найденную экспериментально.

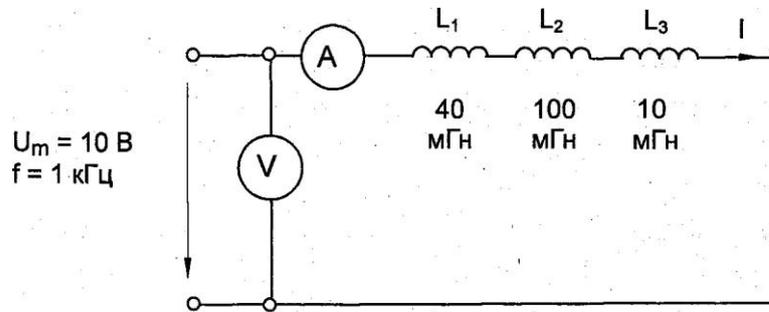


Рис.5.2.

Таблица 5.2.1

$I = \dots\dots\dots$ мА	$X_L = U_L / I$ Ом	$L = X_L / \omega$ , мГн	Проверка
U, В			$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + L_3 =$
$U_{L1}$ , В			
$U_{L2}$ , В			
$U_{L3}$ , В			

- Соберите цепь с параллельным соединением катушек (рис. 5.2.2). Предусмотрите в схеме перемычки для измерения токов мультиметром. Включите регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами  $U_m = 10$  В и  $f = 1$  кГц.

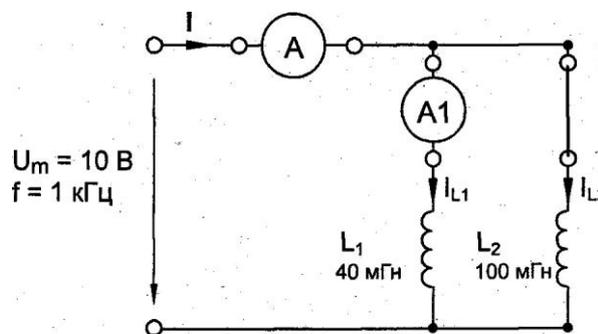


Рис. 5.2.2

Таблица 5.2.2

$U = \dots\dots\dots$ , В	$X_L = U_L / I$ Ом	$L = X_L / \omega$ , мкФ	Проверка
I, mA			$L_{\Sigma} = (L_1 \cdot C_2) / (C_1 + C_2)$
$I_1$ , mA			
$I_2$ , mA			

- Измерьте мультиметром общий ток цепи I, токи параллельных ветвей  $I_1$ ,  $I_2$ , и напряжения на входе цепи U, занесите данные измерений в табл. 5.2.2
- Вычислите емкостные реактивные сопротивления  $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$ , по формуле  $X_L = U / I_L$ .
- Определите индуктивности катушек и эквивалентную индуктивность цепи по формуле  $L = X_L / \omega$ , где  $\omega = 2\pi f = 1/c$ .
- Проверьте вычислениями величину индуктивности  $L_{\Sigma}$ , найденную экспериментально.

## 6. Цепи синусоидального тока с резисторами, конденсаторами и катушками индуктивности

### 6.1. Мощности в цепи синусоидального тока

#### 6.1.1. Общие сведения

На рис. 6.1.1а изображена произвольная пассивная цепь синусоидального тока с двумя зажимами для подключения источника питания (*пассивный двухполюсник*). В общем случае ток и напряжение на входе этой цепи сдвинуты по фазе на угол  $\varphi$ :

$$u=U_m\sin(\omega t); \quad i=I_m\sin(\omega t-\varphi).$$

Мгновенная мощность, потребляемая цепью от источника:

$$p=ui= U_mI_m\sin(\omega t)\sin(\omega t-\varphi)=UI\cos\varphi-U I\cos(2\omega t-\varphi).$$

График изменения этой мощности представлен на рис. 6.1.1.б вместе с графиками изменения тока и напряжения. Мощность колеблется с двойной частотой. Большую часть периода она имеет положительное значение, а меньшую - отрицательное. Отрицательное значение мощности свидетельствует о возврате части накопленной в конденсаторах и катушках энергии в питающий цепь источник энергии.

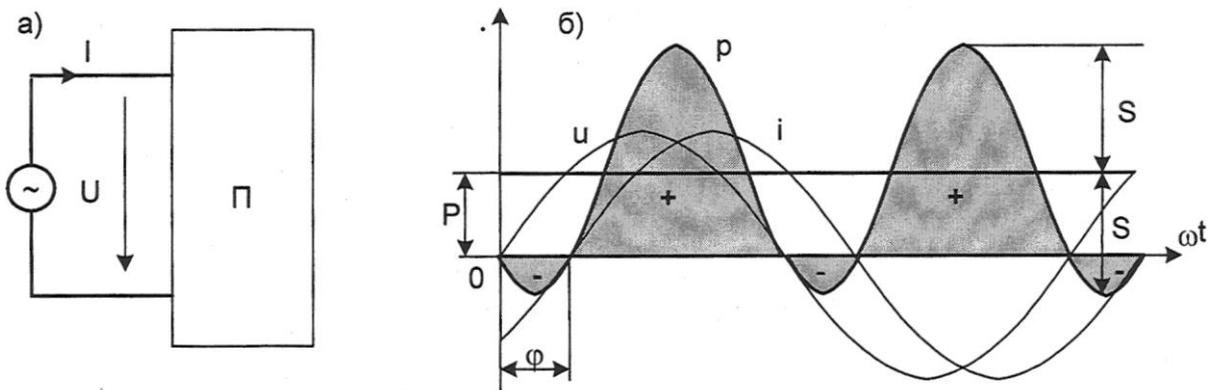


Рис. 6.1.1.

Среднее значение потребляемой мощности

$$P=UI\cos\varphi=I^2R$$

называется *активной мощностью*. Она характеризует среднюю скорость преобразования электрической энергии в другие виды энергии. Потребляемая в пассивной цепи активная мощность имеет всегда положительное значение. Она измеряется ваттметром, схема включения которого в цепь показана на рис. 6.1.3. Единицей измерения активной мощности является ватт (Вт).

Амплитуда переменной составляющей мощности

$$S=UI=I^2Z$$

называется *полной мощностью*. Она характеризует максимальную мощность, на которую должен быть рассчитан источник для питания данной цепи. Её иногда называют *кажущейся, габаритной* или *аппаратной мощностью*. Единицей её измерения является вольт-ампер (ВА). Здесь  $U = I \cdot Z$ , где  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  - полное сопротивление цепи синусоидального тока.

Величина

$$Q=UI\sin\varphi=I^2X$$

называется *реактивной мощностью*. Она характеризует максимальную скорость обмена энергии между источником и цепью. Она может быть как положительной (при  $\varphi > 0$ , т.е. в индуктивной цепи), так и отрицательной (при  $\varphi < 0$ , т.е. в ёмкостной цепи). В связи с этим иногда говорят, что индуктивность потребляет «реактивную энергию», а ёмкость вырабатывает её. Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (вар).

В электрической цепи синусоидального тока выполняется баланс как активных, так и реактивных (*но не полных!*) мощностей, т. е. сумма мощностей всех источников равна сумме мощностей всех потребителей:

$$\sum P_{\text{ист.}} = \sum P_{\text{потр.}}; \quad \sum Q_{\text{ист.}} = \sum Q_{\text{потр.}}$$

Соотношения между различными мощностями в цепи синусоидального тока можно наглядно представить в виде треугольника мощностей (рис. 6.1.2).

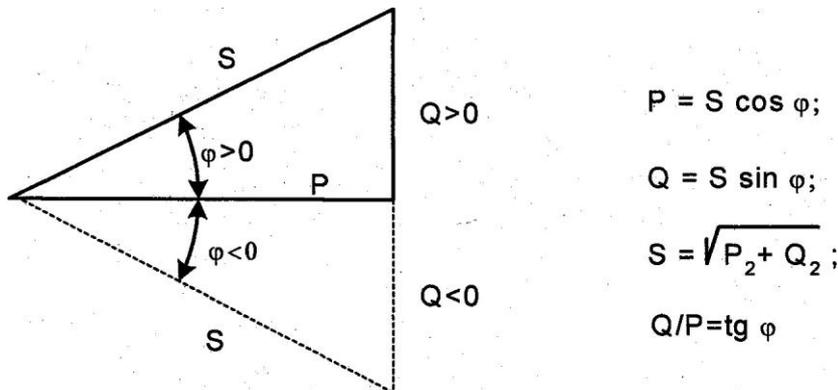


Рис. 6.1.2

### 6.1.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Измерьте токи, напряжения и мощность в разветвлённой цепи синусоидального тока. Расчётом проверьте баланс активных и реактивных мощностей.

### Порядок выполнения работы

- Измерьте омметром активное сопротивление катушки индуктивности 40мГн:

$$R_k = \quad \text{Ом.}$$

- При частоте = 500 Гц вычислите реактивные сопротивления катушки L=40 мГн и конденсатора C=1 мкФ:

$$X_L = 2\pi fL = \quad \text{Ом;}$$

$$X_C = 1/(2\pi fC) = \quad \text{Ом.}$$

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 6.1.3), предусмотрев в ней переключки для измерения токов мультиметром. Подайте на схему синусоидальное напряжение 500 Гц и установите максимальную амплитуду, которую может дать генератор.

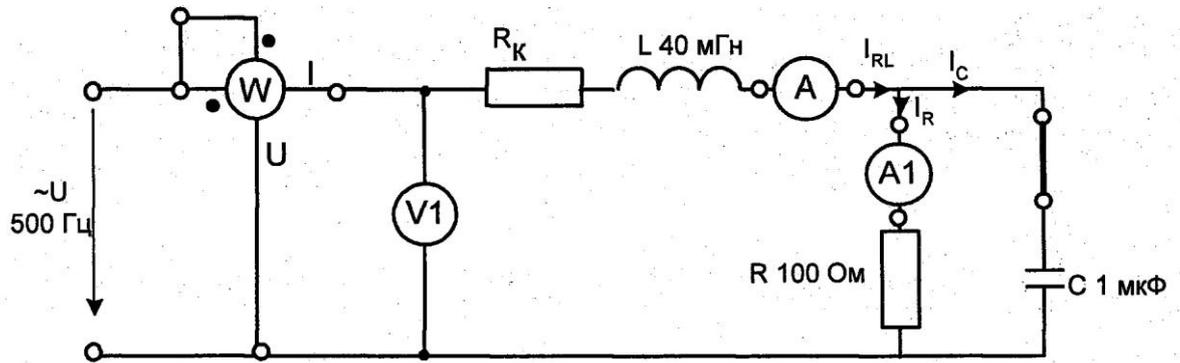


Рис.6.1.3.

- Запишите в табл. 6.1.1 значения токов  $I_{RL}$ ,  $I_R$ ,  $I_C$  и мощности, отдаваемой источником  $P_{ист.}$ . Вычислите  $S_{ист.} = U \cdot I$  и  $Q_{ист.} = \sqrt{(S_{ист.}^2 - P_{ист.}^2)}$  и запишите в таблицу значение  $Q_{ист.}$ .

Таблица. 6.1.1

Ветвь	$R_kL$	R	C	Баланс мощностей, мВт, мвар			
I, мА							
$P=I^2R, \text{мВт}$			0	$P_{ист.}$		$\sum P_{потр.}$	
$Q=I^2X, \text{мВАр}$		0		$Q_{ист.}$		$\sum Q_{потр.}$	

- Вычислите по приведённым в табл. формулам значения активной и реактивной мощностей каждого потребителя. Вычислите сумму активных и алгебраическую сумму реактивных мощностей потребителей и проверьте баланс мощностей.

## 6.2. Последовательное соединение резистора и конденсатора, резистора и катушки индуктивности

### 6.2.1. Общие сведения

Когда к цепи (рис. 6.2.1) с последовательным соединением резистора и конденсатора (а) или резистора и катушки индуктивности (б) подается переменное синусоидальное напряжение, один и тот же синусоидальный ток имеет место в обоих компонентах цепи, а напряжение на входе цепи равно сумме напряжений на двух компонентах. Поскольку эти два напряжения сдвинуты относительно друг друга по фазе, непосредственное сложение их действующих значений или амплитуд невозможно. Необходимо либо складывать мгновенные значения этих напряжений, либо векторы, соответствующие этим напряжениям, как показано на рис. 6.2.2а и б.

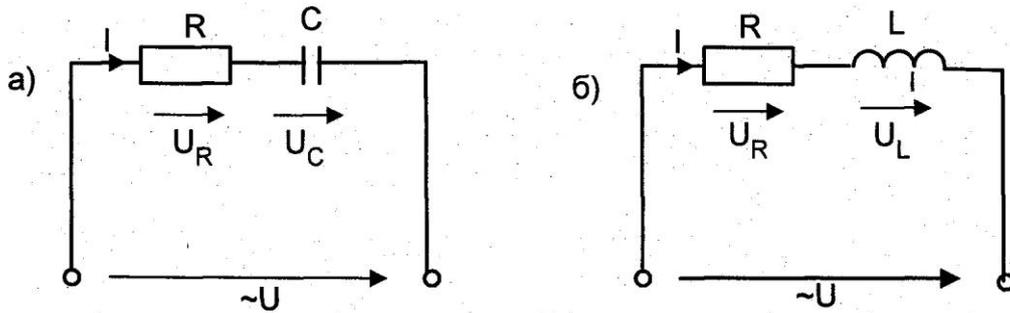


Рис. 6.2.1

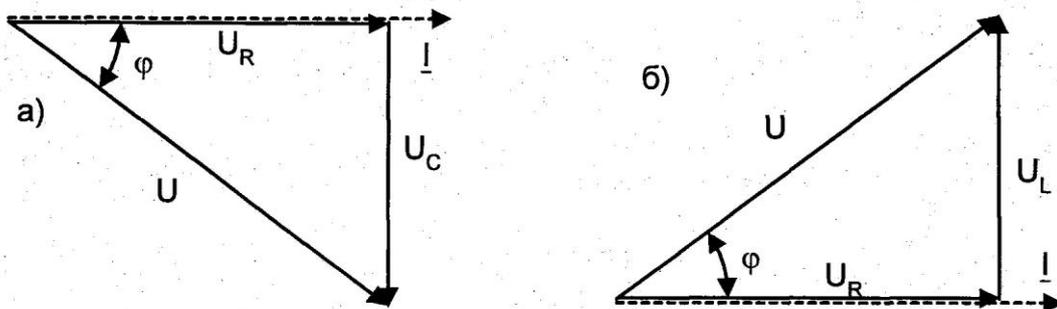


Рис. 6.2.2

Вектор напряжения на конденсаторе  $U_C$  отстаёт от вектора тока  $I$  на  $90^\circ$ , а вектор напряжения на индуктивности  $U_L$  опережает ток на  $90^\circ$ . Из векторных диаграмм следует, что в цепи с конденсатором

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}, \quad \varphi = -\arctg(U_C / U_R).$$

Поскольку  $U_R = R \cdot I$ , а  $U_C = X_C \cdot I$ , получаем

$$U = I \sqrt{R^2 + X_C^2} = I \cdot Z \quad \text{и} \quad \varphi = -\arctg(X_C / R),$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$  - полное сопротивление цепи, и  $\varphi < 0$ , т.е. ток опережает напряжение. Аналогично, в цепи с индуктивностью:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2} = I \cdot Z, \quad \text{где} \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

$$\varphi = \arctg (X_L / R) > 0, \text{ т.е. ток отстаёт от напряжения.}$$

Если каждую сторону треугольника напряжений разделить на ток, то получим тре-

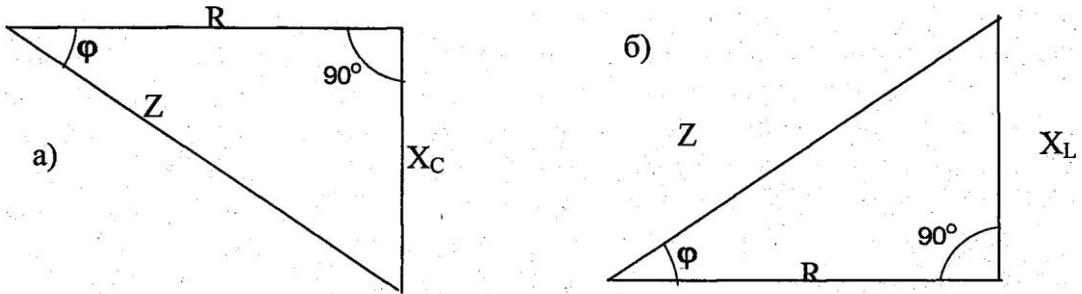


Рис. 6.2.3

угольник сопротивлений, подобный треугольнику напряжений. (рис.6.2.3а и б). Из треугольников сопротивлений следует, что

$$R = Z \cdot \cos \varphi, X_C = Z \cdot \sin \varphi \text{ и } X_L = Z \cdot \sin \varphi.$$

### 6.2.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Для цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора, а также резистора и индуктивности измерьте потребляемую активную мощность, действующие значения напряжений на резисторе  $U_R$  и реактивном элементе  $U_C$ ,  $U_L$  и ток  $I$ . Рассчитайте угол сдвига фаз  $\varphi$ , полное сопротивление цепи  $Z$ , реактивное сопротивление  $X$  и активное сопротивление  $R$ , постройте векторную диаграмму.

#### Порядок выполнения работы

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 6.2.4), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите максимальную амплитуду синусоидального напряжения с частотой  $f = 1 \text{ кГц}$ .

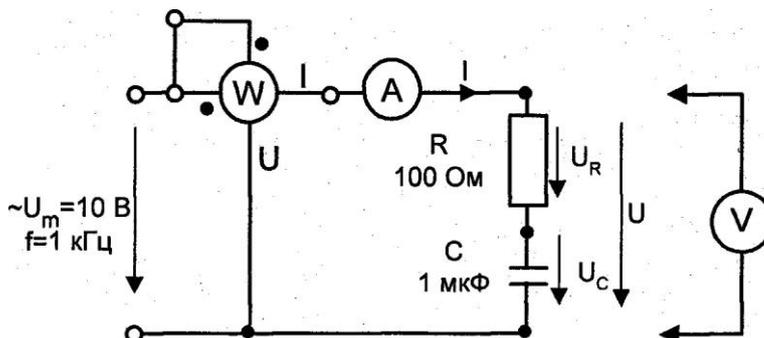


Рис. 6.2.4

• Выполните измерения активной мощности, действующих значений тока и напряжений, указанных в табл. 6.2.1. При измерениях напряжений подключайте мультиметр к различным зажимам цепи.

Таблица 6.2.1.

	<b>P, Вт</b>	<b>U, В</b>	<b>U<sub>R</sub>, В</b>	<b>U<sub>C</sub>, U<sub>L</sub>, В</b>	<b>I, мА</b>	<b>φ, град</b>	<b>R, Ом</b>	<b>X, Ом</b>	<b>Z, Ом</b>
Цепь с конденсатором									
Цепь с катушкой									

• Вычислите: фазовый угол  $\varphi = \arctg(P/UI)$ , полное сопротивление цепи  $Z = U/I$ , активное сопротивление цепи  $R = Z \cdot \cos \varphi$  и ёмкостное сопротивление  $X_C = Z \cdot \sin \varphi$ .

• Выберите масштаб и постройте векторную диаграмму напряжений (рис. 6.2.5).

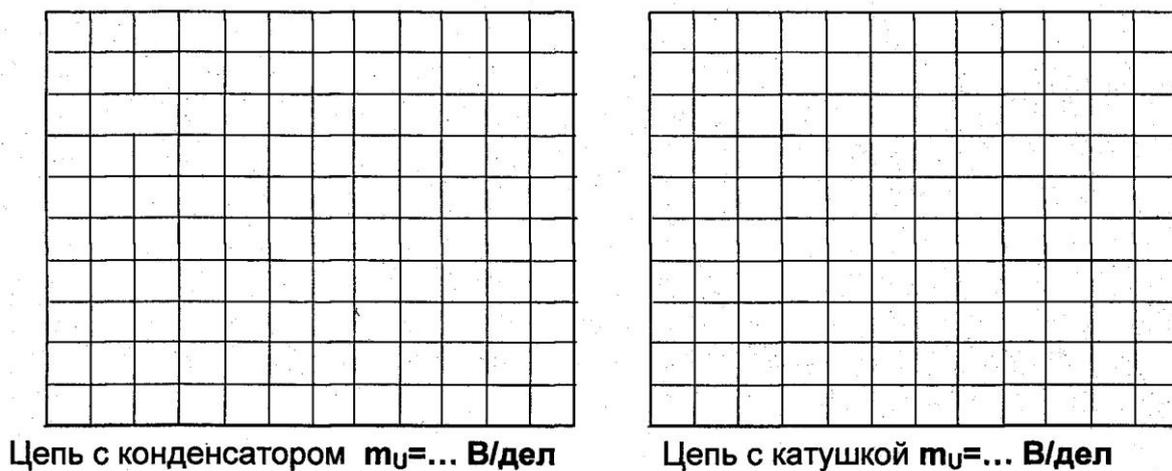


Рис.6.2.5

• Замените в схеме конденсатор на катушку индуктивности с малым активным сопротивлением (рис.6.2.6). В качестве такой катушки используйте обмотку 300 витков

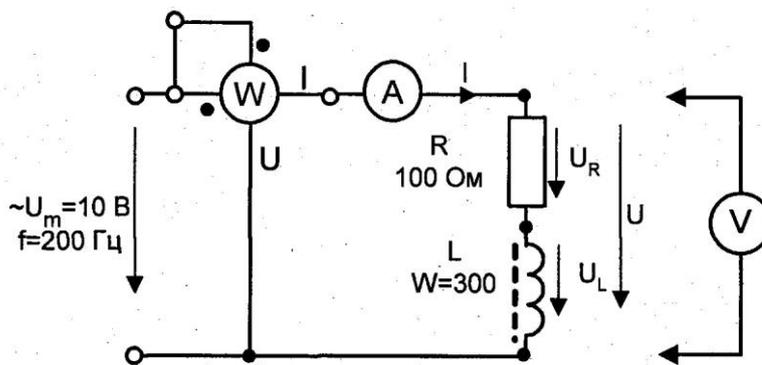


Рис.6.2.6

разборного трансформатора. Чтобы создать немагнитный зазор в магнитопроводе, вставьте между двумя частями сердечника квадратики обычной писчей бумаги в один или два слоя.

• Убавьте частоту до 200 Гц и повторите измерения, расчёт и построение векторной диаграммы.

### 6.3. Параллельное соединение резистора и конденсатора, резистора и катушки индуктивности

#### 6.3.1. Общие сведения

Когда цепь (рис. 6.3.1) с параллельным соединением резистора и конденсатора (а) или резистора и катушки индуктивности (б) включена на переменное синусоидальное напряжение, одно и то же напряжение приложено к обоим компонентам цепи.

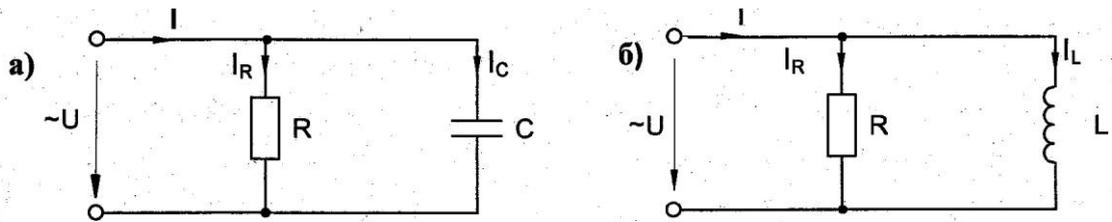


Рис. 6.3.1

Общий ток цепи I разветвляется на ток в конденсаторе I<sub>C</sub> или в индуктивности I<sub>L</sub> (реактивная составляющая общего тока) и ток в резисторе (активная составляющая). Причём, ток в сопротивлении совпадает с напряжением по фазе, а ток в реактивном элементе сдвинут относительно напряжения на 90° (в ёмкости опережает, а в индуктивности отстает). Сложение этих токов можно произвести с помощью векторной диаграммы токов (рис. 6.3.2а и б).

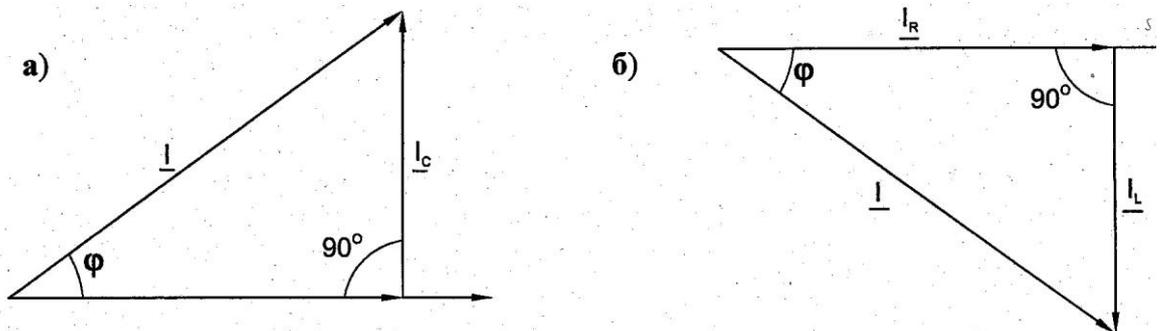


Рис. 6.3.2

Из векторных диаграмм следует, что в цепи с конденсатором

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \text{ и } \varphi = -\arctg(I_C/I_R).$$

Здесь  $I_R = U/R = U \cdot G$ , а  $I_C = U/X_C = U \cdot B_C$ , где  $G = 1/R$  - активная проводимость, а  $B_C = 1/X_C$  - ёмкостная проводимость. Поэтому

$$I = U \sqrt{G^2 + B_C^2} = U \cdot Y \text{ и } \varphi = -\arctg(B_C/G),$$

где  $Y = \sqrt{G^2 + B_C^2}$  - полная проводимость, а  $\varphi < 0$ , т.е. ток опережает напряжение.

Аналогично для цепи с индуктивностью:

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = U \sqrt{G^2 + B_L^2} = U \cdot Y, \text{ где } Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$$

$$\varphi = -\arctg(B_L/G) > 0, \text{ (т.е. ток отстаёт от напряжения).}$$

Разделив каждую сторону треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей (рис. 6.3.3а и б).

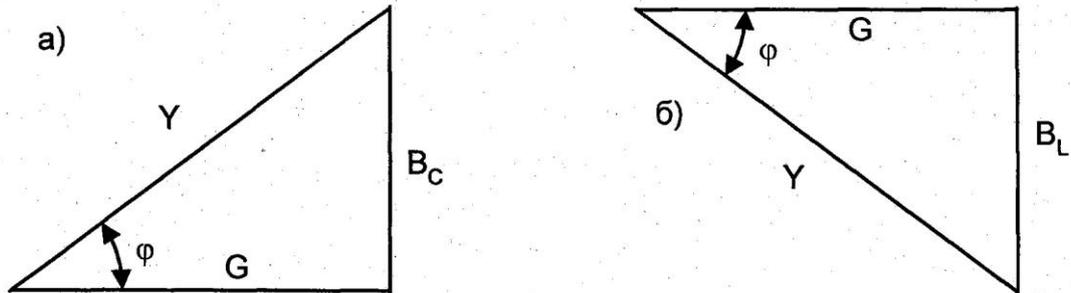


Рис. 6.3.3

Из треугольников проводимостей следует, что

$$G = Y \cos \varphi; \quad B_C = Y \sin \varphi \text{ и } B_L = Y \sin \varphi.$$

### 6.3.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Для цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора, а также резистора и индуктивности измерьте потребляемую активную мощность, действующие значения тока в резисторе  $I_R$  и реактивном элементе  $I_C$  ( $I_L$ ) и ток  $I$ . Рассчитайте угол сдвига фаз  $\varphi$ , полную проводимость цепи  $Y$ , реактивную проводимость  $Y$  и активную спроводимость  $G$ , постройте векторную диаграмму.

#### Порядок выполнения работы

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 6.3.4), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите максимальную амплитуду синусоидального напряжения с частотой  $f = 1$  кГц.

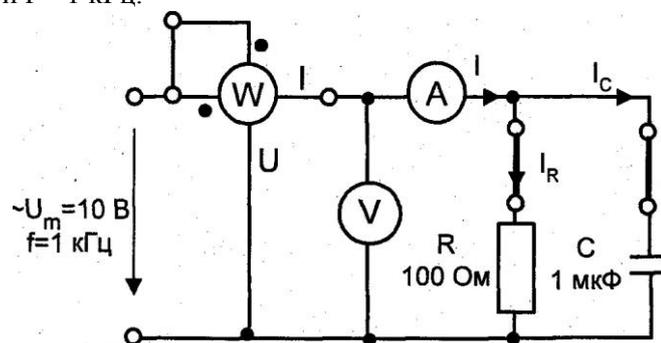


Рис. 6.3.4

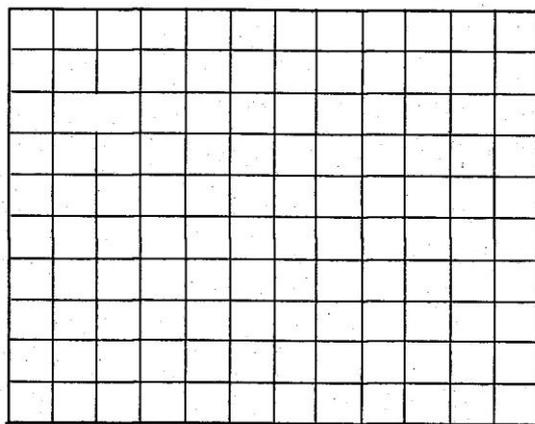
• Выполните измерения активной мощности, действующих значений токов и напряжений, указанных в табл. 6.3.1. При измерениях токов включайте мультиметр вместо перемычек, показанных на схеме.

Таблица 6.3.1.

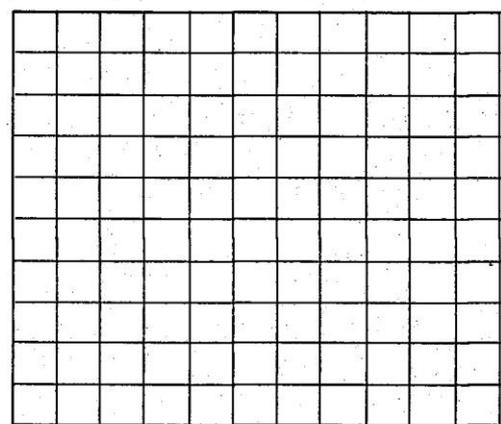
	P, Вт	U, В	I <sub>R</sub> , мА	I <sub>C</sub> , I <sub>L</sub> , мА	I, мА	φ, град	G, 1/Ом	B, 1/Ом	Y, 1/Ом
Цепь с конденсатором									
Цепь с катушкой									

• Вычислите: фазовый угол  $\varphi = \arctg(P/UI)$ , полную проводимость цепи  $Y = I/U$ , активную проводимость цепи  $R = Y \cdot \cos \varphi$  и ёмкостную проводимость  $B_C = Y \cdot \sin \varphi$ .

• Выберите масштаб и постройте векторную диаграмму токов (рис. 6.3.5).



Цепь с конденсатором  $m_1 = \dots$  мА/дел



Цепь с катушкой  $m_1 = \dots$  мА/дел

Рис.6.3.5

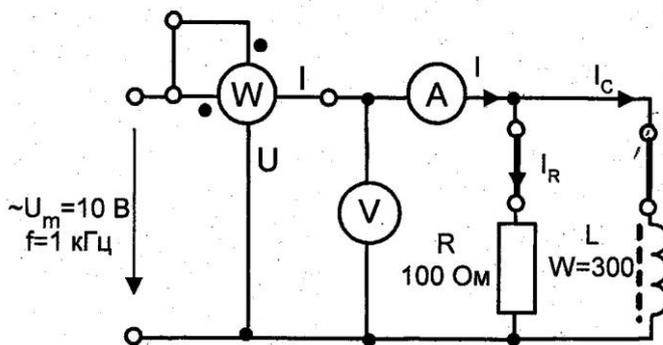


Рис.6.3.6

• Замените в схеме конденсатор на катушку индуктивности с малым активным сопротивлением (рис.6.3.6). В качестве такой катушки используйте обмотку 300 витков разборного трансформатора. Чтобы создать немагнитный зазор в магнито-проводе, вставьте между двумя частями сердечника квадратики обычной писчей бумаги в один или два слоя.

• Убавьте частоту до 200 Гц и повторите измерения, расчёт и построение векторной диаграммы.

#### 6.4. Последовательное соединение конденсатора и катушки индуктивности. Понятие о резонансе напряжений

##### 6.5.1. Общие сведения

Когда по цепи (рис. 6.4.1) с последовательным соединением конденсатора и катушки индуктивности протекает один и тот же синусоидальный ток  $I$ , напряжение на конденсаторе  $U_C$  отстает от тока  $I$  на  $90^\circ$ , а напряжение на катушке индуктивности  $U_L$  опережает ток на  $90^\circ$ . Эти напряжения находятся в противофазе (повернуты относительно друг друга на  $180^\circ$ ).

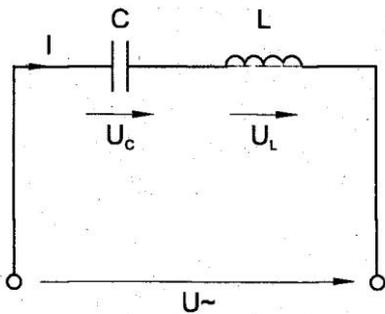


Рис. 6.4.1

Если одно из напряжений больше другого, цепь оказывается либо преимущественно индуктивной (рис. 6.5.2), либо преимущественно емкостной (рис. 6.5.3). Если напряжения  $U_L$  и  $U_C$  имеют одинаковые значения и компенсируют друг друга, то суммарное напряжение на участке цепи L - C оказывается равным нулю. Остается только небольшая составляющая напряжения на активном сопротивлении катушки и проводов. Такое явление называется **резонансом напряжений** (рис. 6.5.4).

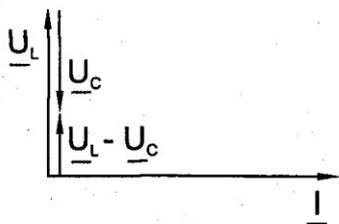


Рис. 6.5.2

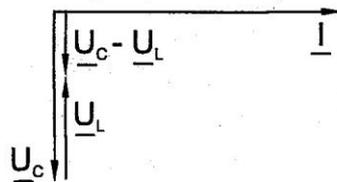


Рис. 6.5.3

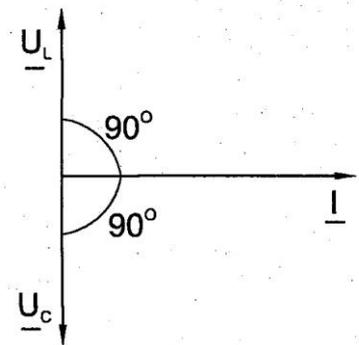


Рис. 6.5.4

При резонансе напряжений реактивное сопротивление цепи

$$X = X_L - X_C$$

оказывается равным нулю. При заданных значениях L и C резонанс может быть получен путем изменения частоты.

Поскольку  $X_L = \omega L$ , а  $X_C = 1 / \omega C$ , то резонансная частота  $\omega_0$  может быть определена из уравнения:

$$\omega_0 L - 1 / \omega_0 C = 0,$$

откуда

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ и } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Полное сопротивление цепи при резонансе оказывается равным небольшому активному сопротивлению катушки, поэтому ток в цепи совпадает по фазе с напряжением и может оказаться довольно большим даже при маленьком приложенном напряжении. При этом напряжения  $U_L$  и  $U_C$  могут существенно (в десятки раз!) превышать приложенное напряжение.

#### 6.4.2. Экспериментальная часть Задание

Для цепи с последовательным соединением конденсатора и катушки индуктивности измерьте действующие значения тока  $I$  и напряжений  $U$ ,  $U_C$ ,  $U_L$  при  $\omega = \omega_0$ ,  $\omega < \omega_0$  и  $\omega > \omega_0$ . Постройте векторные диаграммы.

#### Порядок выполнения работы

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 6.4.5), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите напряжение на его входе 2 В и частоту 500 Гц. В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор).

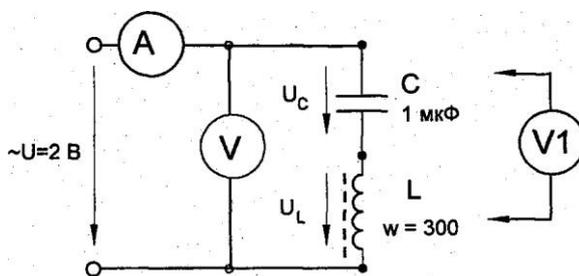


Рис. 6.4.5

- Изменяя частоту приложенного напряжения, добейтесь резонанса по максимальному току.
- Произведите измерения и запишите в табл. 6.4.1 результаты измерений при резонансе  $f=f_0$  при  $f_1 \approx 0,75 f_0$  и  $f_2 \approx 1,25 f_0$ .

Таблица 6.5.1

F, Гц	I, mA	U, В	U <sub>L</sub> , В	U <sub>C</sub> , В
f <sub>0</sub> =				
f <sub>1</sub> =				
f <sub>2</sub> =				

- Постройте в одинаковом масштабе векторные диаграммы на рис. 6.4.6 для каждого из рассмотренных случаев.

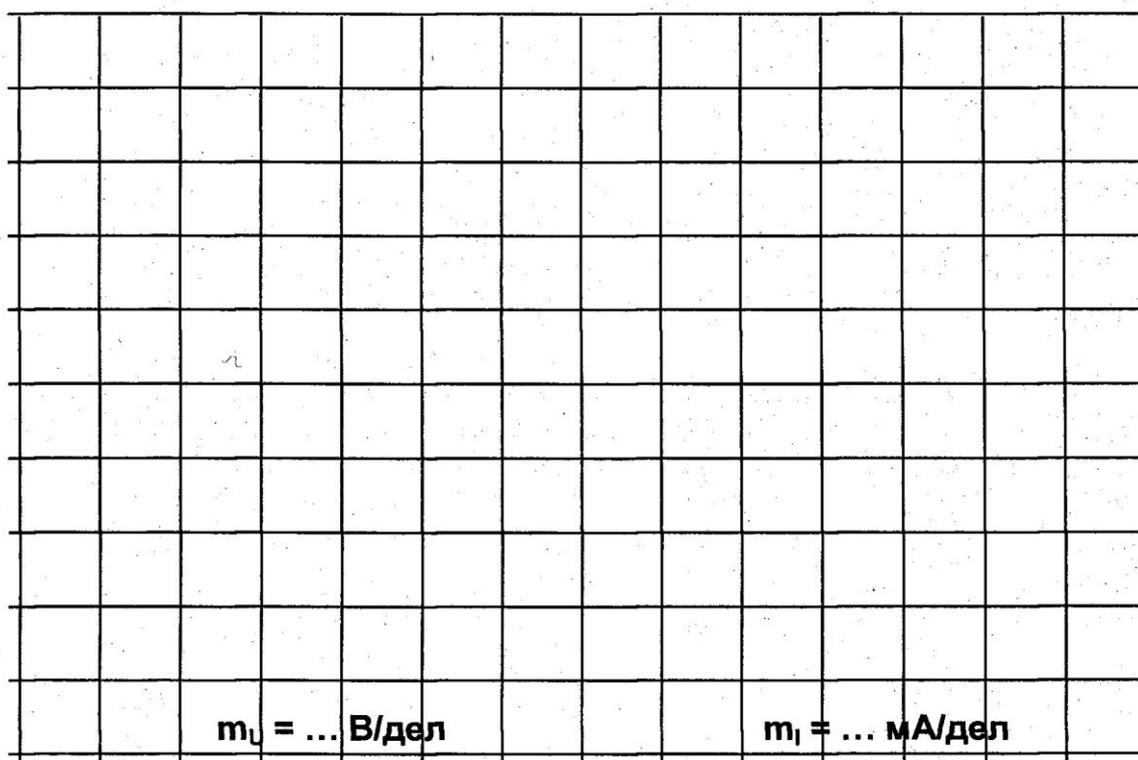


Рис. 6.4.6

**6.5. Параллельное соединение конденсатора и катушки индуктивности.  
Понятие о резонансе токов**

6.5.1. Общие сведения

Когда к цепи (рис. 6.5.1) с параллельным соединением конденсатора и катушки индуктивности подается переменное синусоидальное напряжение  $U$ , одно и то же напряжение приложено к обоим элементам цепи.

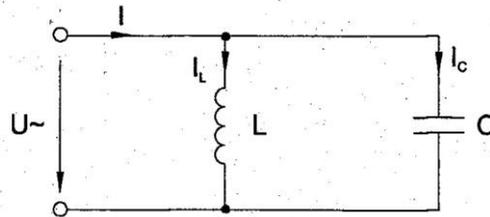


Рис. 6.6.1

Общий ток цепи  $I$  разветвляется на ток в конденсаторе  $I_C$  (емкостная составляющая общего тока) и ток в катушке  $I_L$  (индуктивная составляющая общего тока), причем ток  $I_L$  отстает от напряжения  $U$  на  $90^\circ$ , а  $I_C$  опережает на  $90^\circ$ .

Токи  $I_C$  и  $I_L$  имеют противоположные фазы ( $180^\circ$ ) и в зависимости от их величин компенсируют друг друга полностью или частично. Они могут быть представлены с помощью векторных диаграмм токов (рис. 6.5.2 - 4).

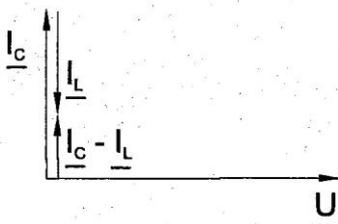


Рис. 6.5.2

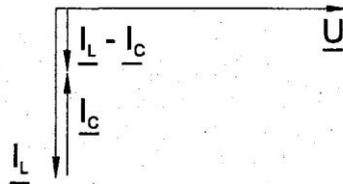


Рис. 6.5.3

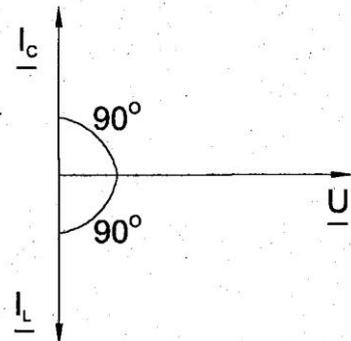


Рис. 6.5.4

Когда  $I_C > I_L$ , т.е. преобладает ток конденсатора, общий ток цепи  $I$  является по характеру емкостным и опережает напряжение  $U$  на  $90^\circ$  (рис. 6.5.2).

Когда  $I_C < I_L$ , т.е. преобладает ток катушки, общий ток цепи  $I$  является индуктивным и отстает от напряжения  $U$  на  $90^\circ$  (рис. 6.5.3).

Когда же  $I_C = I_L$  и общий ток цепи равен нулю, имеет место **резонанс токов** (векторная диаграмма рис. 6.5.4)

Эти рассуждения проведены в пренебрежении потерями активной мощности в конденсаторе и катушке.

При резонансе токов реактивная проводимость цепи  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_L - \mathbf{B}_C$  равна нулю. Резонансная частота определяется из уравнения

$$\frac{1}{\omega_0 L} - \omega_0 C = 0$$

откуда, так же, как и при резонансе напряжений,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

и

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Полная проводимость при резонансе токов оказывается близкой к нулю. Остается некомпенсированной лишь небольшая активная проводимость, обусловленная активным сопротивлением катушки и несовершенной изоляцией конденсатора. Поэтому ток в неразветвленной части цепи имеет минимальное значение, тогда как токи  $\mathbf{I}_L$  и  $\mathbf{I}_C$  могут превышать его в десятки раз.

## 6.5.2. Экспериментальная часть

### Задание

Для цепи с параллельным соединением конденсатора и катушки индуктивности измерьте действующие значения напряжения  $U$  и токов  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{I}_C$  и  $\mathbf{I}_L$  при  $\omega = \omega_0$ ,  $\omega < \omega_0$  и  $\omega > \omega_0$ . Постройте векторные диаграммы.

### Порядок выполнения работы

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 6.5.5), предусмотрев в ней перемычки для измерения токов. Включите регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры:  $U = 7 \text{ В}$ ,  $f = 500 \text{ Гц}$ . В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор).

- Изменяя частоту приложенного напряжения, добейтесь резонанса по минимальному току  $\mathbf{I}$ .

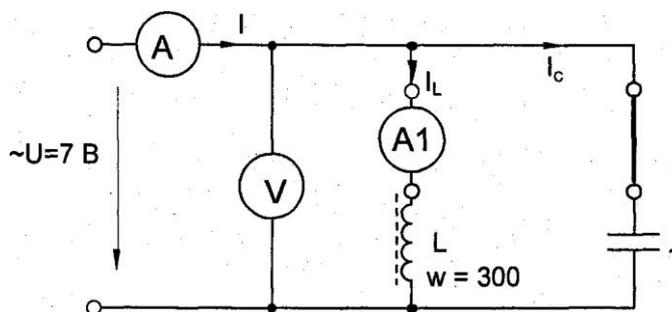


Рис. 6.5.5

- Произведите измерения и запишите результаты измерений в табл. 6.5.1 при  $f=f_0$  при  $f_1 \approx 0,75 f_0$  и  $f_2 \approx 1,25 f_0$ .

Таблица 6.6.1

<b>F, Гц</b>	<b>U, В</b>	<b>I, мА</b>	<b>I<sub>L</sub>, мА</b>	<b>I<sub>C</sub>, мА</b>
$f_0 =$				
$f_1 =$				
$f_2 =$				

- Постройте в одинаковом масштабе векторные диаграммы на рис. 6.5.6 для каждого из рассмотренных случаев.

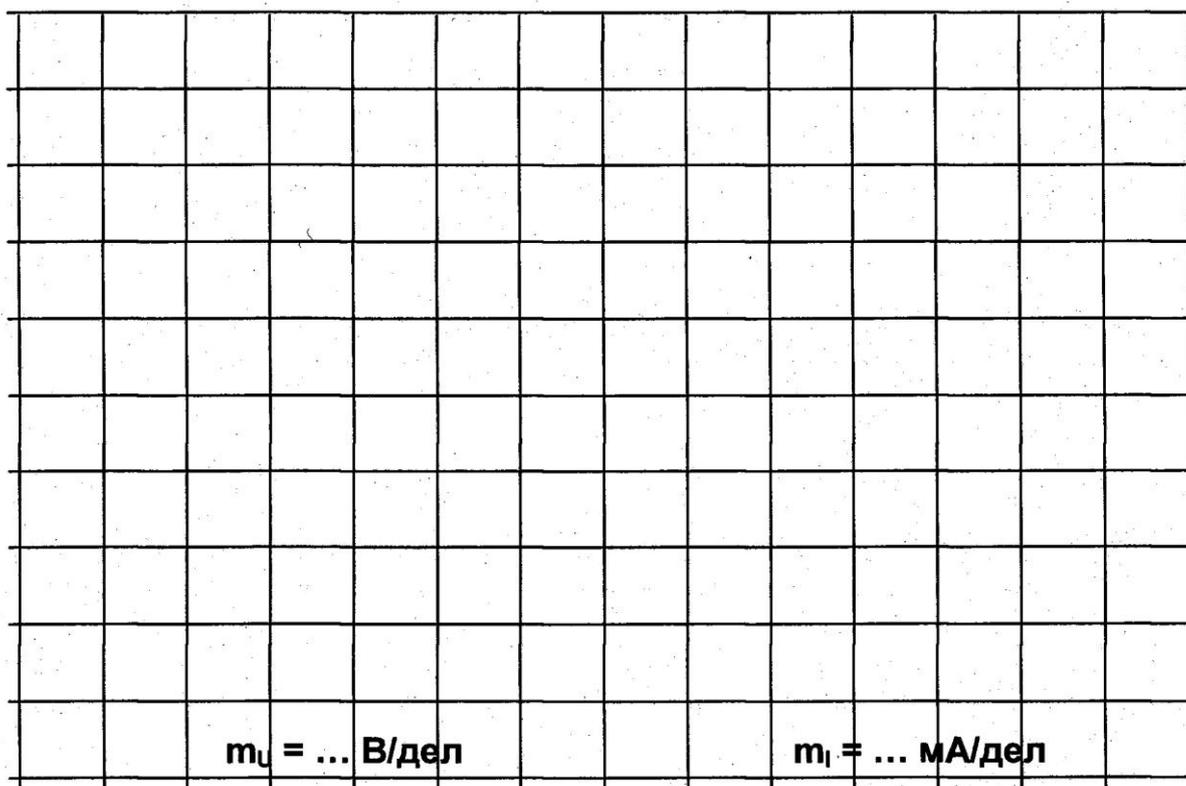


Рис. 6.5.6

## 6.6. Частотные характеристики последовательного резонансного контура

### 6.6.1. Общие сведения

**Частотными характеристиками** обычно называют зависимости сопротивлений и проводимостей цепи от частоты синусоидального приложенного напряжения. Иногда к ним относят также зависимости от частоты токов, напряжений, фазовых сдвигов и мощностей.

В последовательном резонансном контуре (рис.6.6.1а) активное сопротивление не зависит от частоты, а индуктивное, ёмкостное и реактивное сопротивления изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$X_L(\omega) = \omega L, X_C(\omega) = 1/\omega C, X(\omega) = X_L(\omega) - X_C(\omega).$$

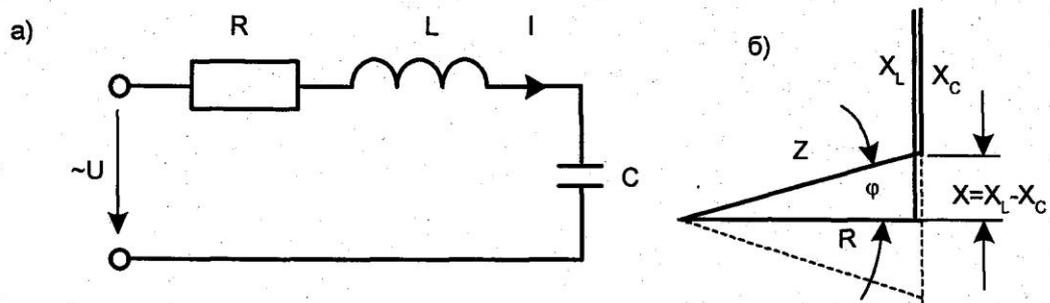


Рис. 6.6.1.

Полное сопротивление, как следует из треугольника сопротивлений (рис.6.6.1б):

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Вид этих зависимостей от частоты представлен на рис.6.7.2а. При резонансной частоте  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ :

$$X_L(\omega_0) = X_C(\omega_0) = \sqrt{L/C} = \rho$$

Это сопротивление называется **характеристическим сопротивлением** резонансного контура, а отношение

$$\rho/R = Q$$

- **добротностью** резонансного контура

На рис.6.6.2б показаны графики изменения тока, напряжений на участках цепи и фазового сдвига при изменении частоты и неизменном приложенном напряжении в соответствии со следующими формулами:

$$I(\omega) = U/Z(\omega); U_L(\omega) = \omega LI(\omega); U_C = I/\omega C; \varphi = \arctg[\omega L - 1/(\omega CR)].$$

Если  $Q > 1$ , то при резонансе напряжения  $U_L(\omega_0)$  и  $U_C(\omega_0)$  превышают приложенное напряжение в  $Q$  раз.

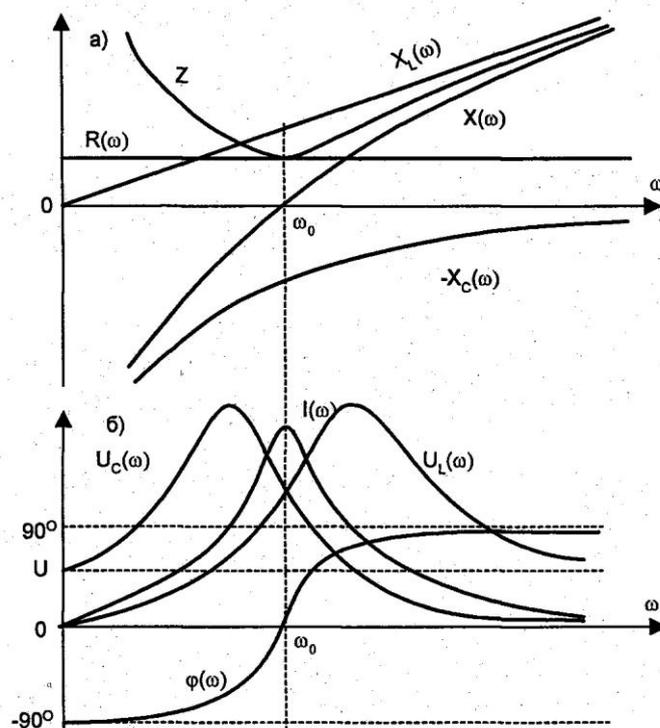


Рис. 6.6.2

При  $\omega < \omega_0$  цепь носит ёмкостный характер (ток опережает напряжение на угол  $\varphi$ ), при  $\omega = \omega_0$  - активный, а при  $\omega > \omega_0$  - индуктивный (ток отстаёт от напряжения).

### 6.6.2 Экспериментальная часть

#### Задание

Снимите экспериментально частотные характеристики последовательного резонансного контура -  $R(\omega)$ ,  $X(\omega)$ ,  $Z(\omega)$ ,  $I(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$ ,  $U_C(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  - при  $Q > 1$ .

#### Порядок выполнения работы

- Измерьте омметром активное сопротивление катушки индуктивности 40 мГн.

**R=** Ом.

- Вычислите резонансную частоту, характеристическое сопротивление и добротность резонансного контура при  $C=1$  мкФ и  $L=40$  мГн:

$f_0=1/2\pi\sqrt{LC}=$  Гц;  $\rho=\sqrt{L/C}=$  Ом;  $Q=\rho/R=$

- Соберите цепь согласно схеме (рис.6.6.3). Добавочное сопротивление  $R_{доб}$  на этом этапе примите равным нулю, а сопротивление  $R$  - внутреннее катушки индуктивности. Подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры:  $U=5$  В,  $f=f_0$ .



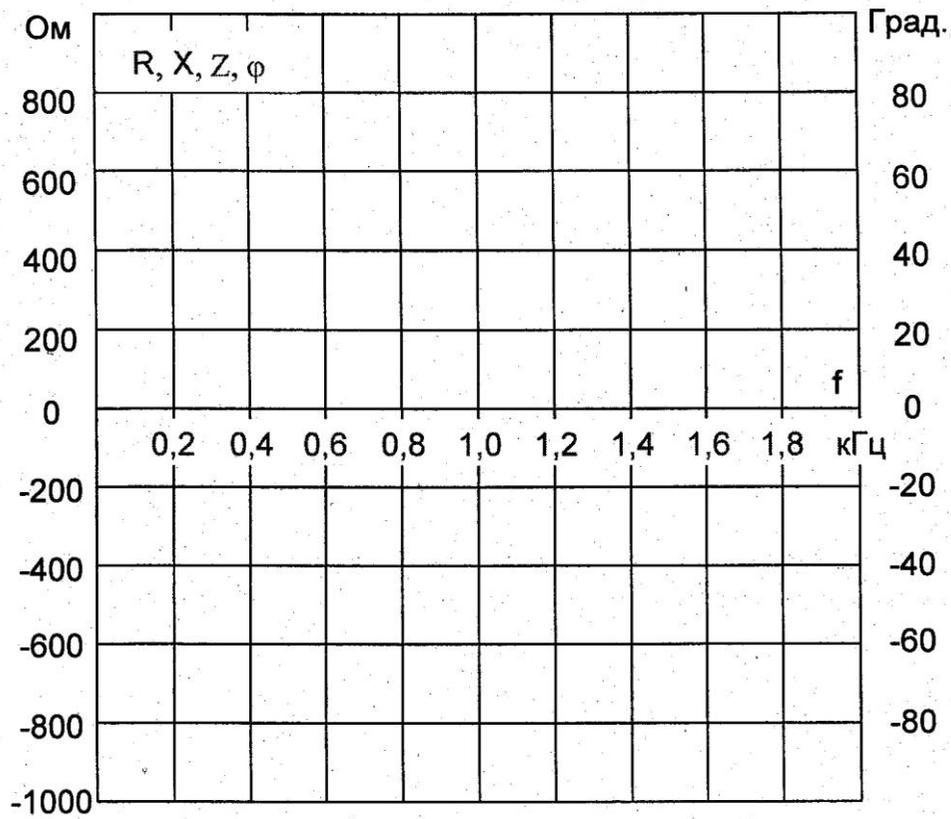


Рис. 6.7.4.

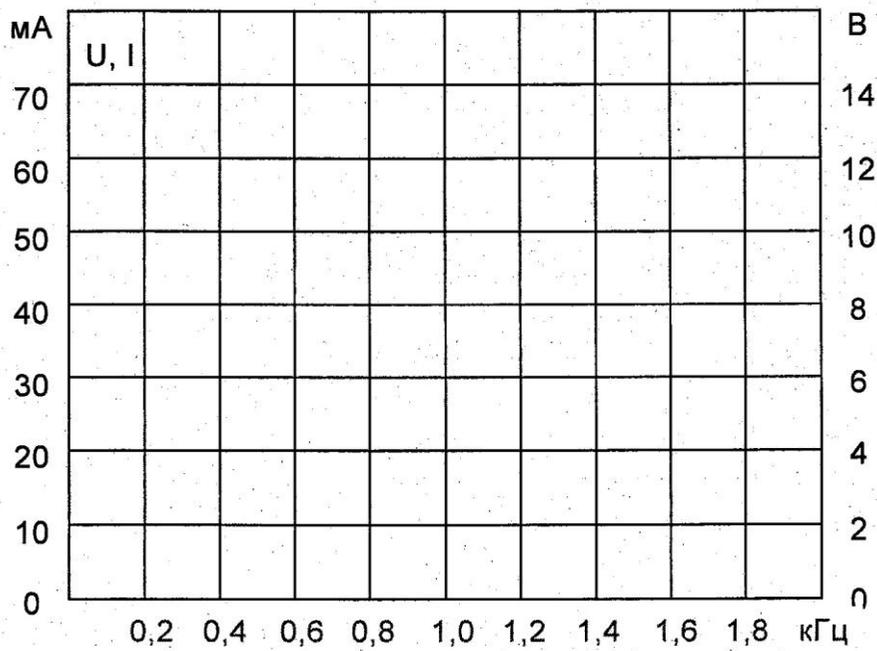


Рис. 6.7.5.

## 6.7. Частотные характеристики параллельного резонансного контура

### 6.7.1. Общие сведения

В параллельном резонансном контуре (рис.6.7.1а) активная проводимость не зависит от частоты, а индуктивная, ёмкостная и реактивная проводимости изменяются в соответствии со следующими выражениями:

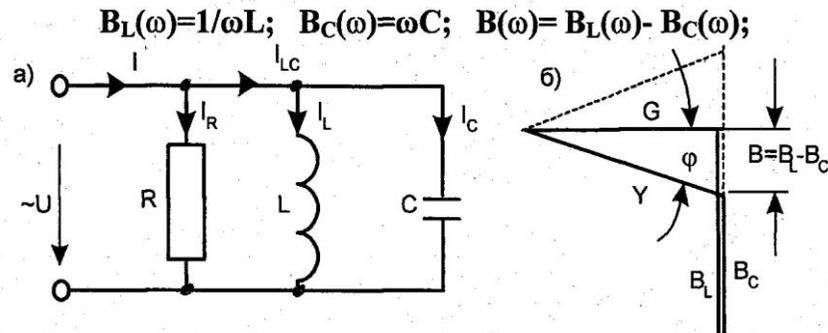


Рис. 6.7.1.

Полная проводимость, как следует из треугольника проводимостей (рис.6.7.1б):

$$Y(\omega)=\sqrt{G^2+B^2}.$$

Вид этих зависимостей от частоты представлен на рис.6.7.2а. При резонансной частоте  $\omega_0=1/\sqrt{LC}$ :

$$B_L(\omega_0)=B_C(\omega_0)=\sqrt{C/L}=\gamma.$$

Эта проводимость называется *характеристической проводимостью* резонансного контура, а отношение

$$\gamma/G=Q$$

также как и в последовательном контуре - *добротностью*.

При изменении частоты и неизменном приложенном напряжении токи изменяются пропорционально соответствующим проводимостям:

$$I(\omega)=UY(\omega); I_L(\omega)=U/\omega L; I_C=U\omega C, I_{LC}=UB(\omega).$$

При резонансной частоте  $\omega= \omega_0$  ток  $I$ , потребляемый от источника, имеет минимум и равен току в активном сопротивлении  $I_R$ , а ток на реактивном участке цепи  $I_{LC}$  равен нулю (см. рис. 6.7.2а). Реальные кривые могут несколько отличаться от рассмотренных идеальных, так как здесь не учитывалось активное сопротивление катушки.

Угол сдвига фаз (рис. 6.7.2.б) изменяется в соответствии с выражением:

$$\varphi=\arctg[(1/\omega L-\omega C)/G].$$

При  $\omega < \omega_0$  цепь носит индуктивный характер (ток отстает от напряжения на угол  $\varphi$ ), при  $\omega = \omega_0$  - активный, а при  $\omega > \omega_0$  - емкостный (ток опережает напряжение). Если  $Q > 1$ , то при резонансе токи  $I_L(\omega_0)$  и  $I_C(\omega_0)$  превышают ток источника  $I$  в  $Q$  раз.

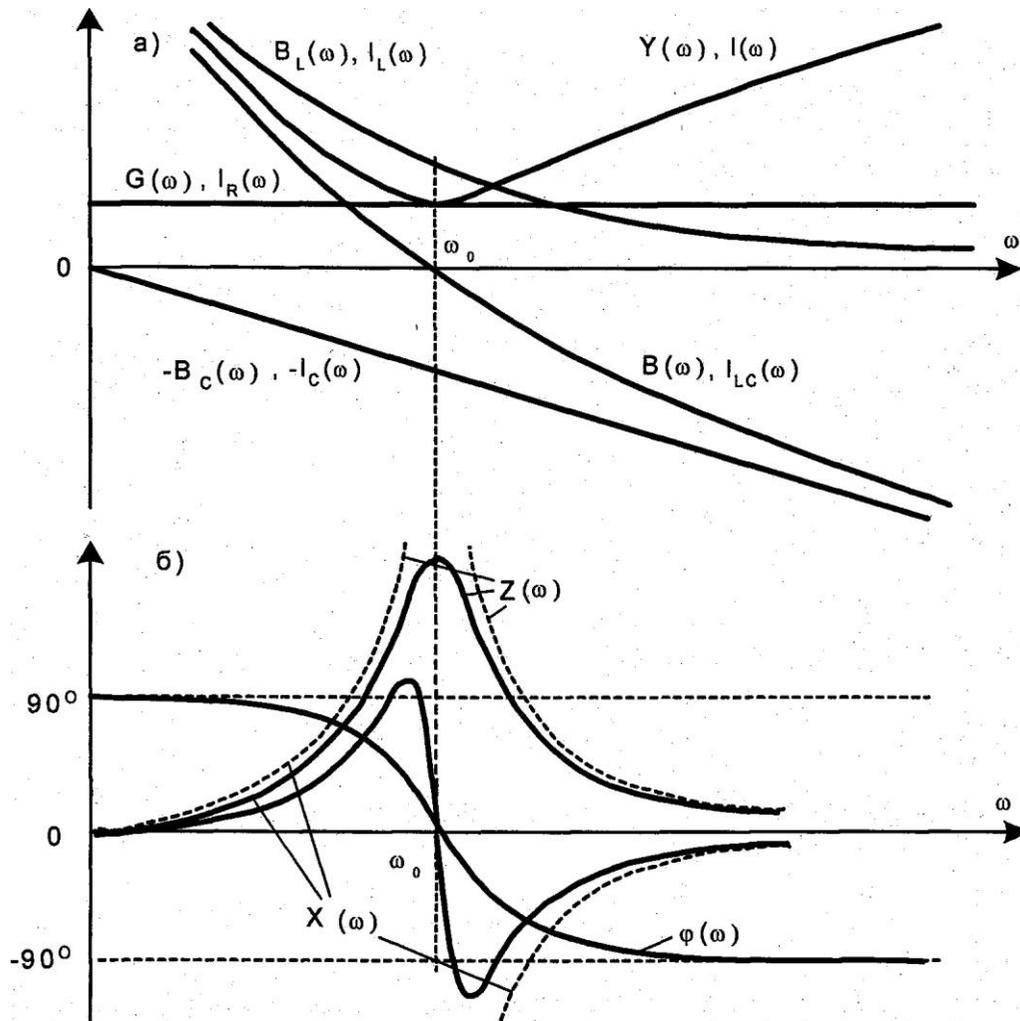


Рис. 6.7.2

На рис. 6.7.26 кроме  $\varphi(\omega)$  построены также зависимости от частоты полного  $Z(\omega)$  и реактивного  $X(\omega)$  сопротивлений. В общем случае (см. сплошные линии на рисунке):

$$Z(\omega) = 1/Y(\omega) = 1/\sqrt{G^2 + B^2};$$

$$X(\omega) = B/(G^2 + B^2).$$

При резонансе полное сопротивление принимает максимальное значение а реактивное обращается в ноль.

В идеализированном случае, когда активная проводимость настолько мала, что ей можно пренебречь ( $G=0$ ):

$$X(\omega) = 1/B; \quad Z(\omega) = 1/|B|.$$

Тогда в точке резонанса кривые  $X(\omega)$  и  $Z(\omega)$  имеют разрыв (см. пунктирные линии на рис.6.8.26).

## 6.7.2 Экспериментальная часть

### Задание

Снимите экспериментально частотные характеристики параллельного резонансного контура с высокой добротностью-  $I(\omega)$ ,  $I_L(\omega)$ ,  $I_C(\omega)$ ,  $X(\omega)$ ,  $Z(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$ .

### Порядок выполнения работы

- Соберите цепь согласно схеме (рис.6.7.3), включив в неё в качестве катушки индуктивности с малым активным сопротивлением в обмотку трансформатора  $W=300$  витков. Между подковами разъемного сердечника вставьте полоски бумаги в один слой. В цепи предусмотрите переключки для измерения токов мультиметром.

- Подайте на схему синусоидальное напряжение от генератора напряжений специальной формы  $U=5В$  и, изменяя частоту добейтесь резонанса по минимуму тока. Запишите значение резонансной частоты

$$f_0 = \dots\dots\dots \text{Гц}$$

- Рассчитайте по показаниям мультиметров реактивное сопротивление катушки индуктивности и рассчитайте индуктивность и резонансную частоту:

$$X_L = U/I_L = \quad \text{Ом;}$$

$$L = X_L / (2\pi f) = \quad \text{Гн;}$$

$$f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{LC}) = \quad \text{Гц.}$$

- Сравните расчётную частоту с экспериментальной.

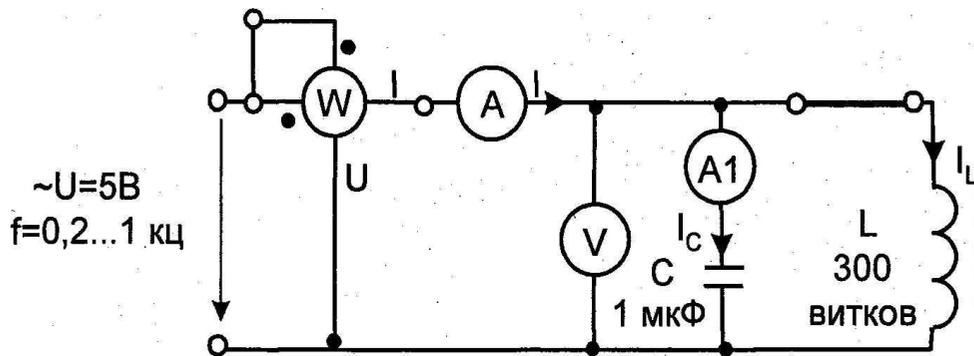


Рис. 6.8.3.

- Изменяя частоту от 0,2 до 1 кГц, запишите в табл.6.8.1 значения мощности  $P$  и токов  $I$ ,  $I_C$ ,  $I_L$ . В области резонансной частоты экспериментальные точки должны быть расположены чаще, чем по краям графиков.



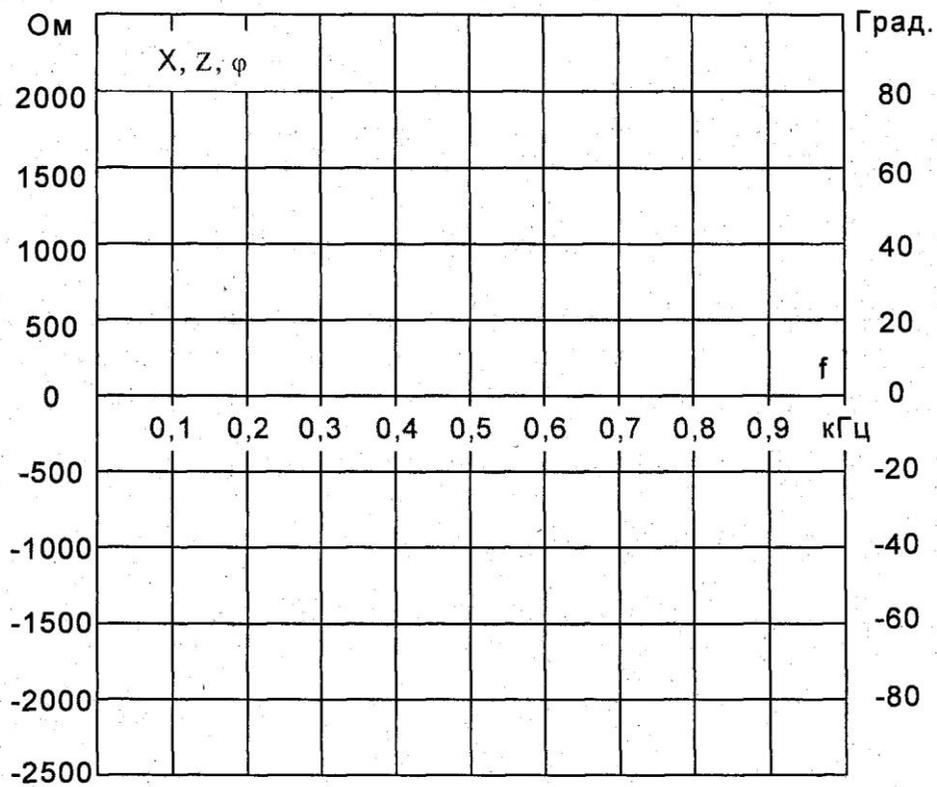


Рис. 6.8.4.

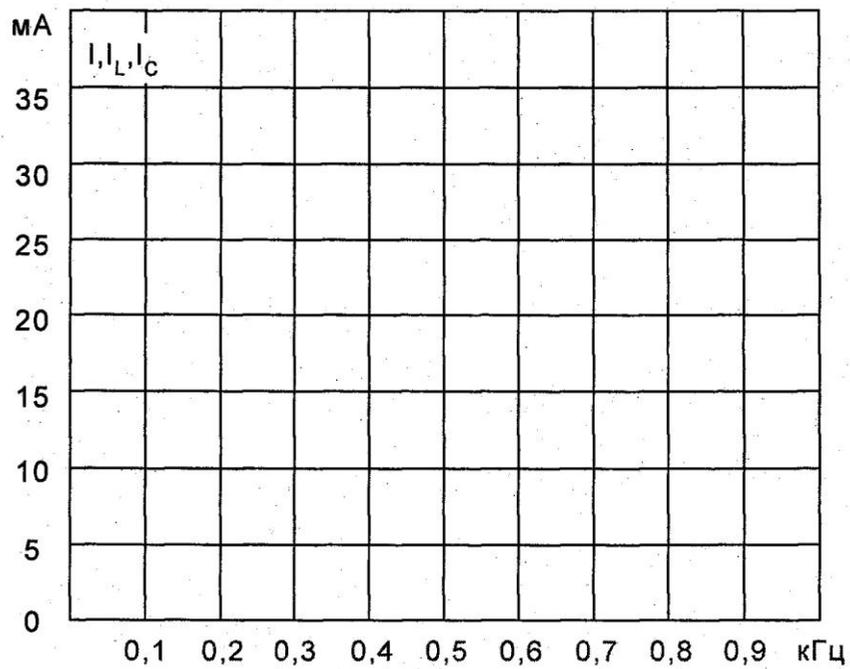


Рис. 6.8.5.

## 7. Трансформаторы

Трансформатор состоит из двух или большего числа катушек (обмоток), магнитная связь, между которыми обеспечивается с помощью ферромагнитного сердечника. Трансформаторы используются для преобразования и согласования напряжений, токов и сопротивлений, а также для развязывания электрических цепей (гальваническая развязка).

В идеальном трансформаторе потребляемая им мощность равна мощности, отдаваемой в нагрузку. В реальности, однако, имеют место потери мощности в меди обмоток (в омических сопротивлениях обмоток) и в сердечнике трансформатора, поэтому резистору нагрузки отдается только часть потребляемой трансформатором мощности.

### 7.1. Коэффициент магнитной связи

#### 7.1.1. Общие сведения

Чтобы обеспечить требуемую магнитную связь между первичной и вторичной обмотками трансформатора, их помещают на общем сердечнике (рис. 7.1.1).

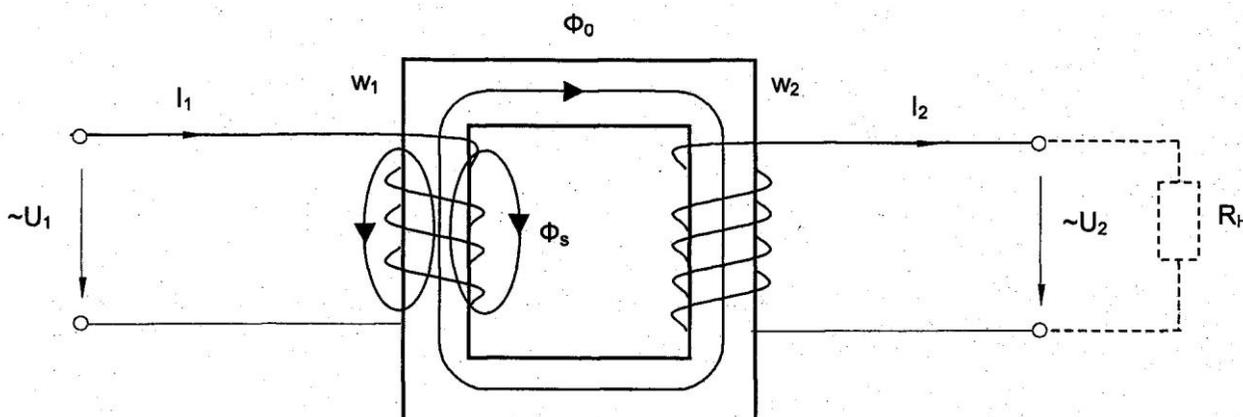


Рис. 7.1.1

Когда по первичной обмотке  $W_1$  протекает ток  $I_1$ , то большая часть создаваемого им магнитного потока  $\Phi_0$  сцепляется также и с витками вторичной катушки  $W_2$ . Однако часть создаваемого первой катушкой потока  $\Phi_S$  замыкается, минуя вторую катушку. Эта часть потока называется потоком рассеяния.

Отношение

$$K_{CB} = \Phi_0 / (\Phi_0 + \Phi_S)$$

называется коэффициентом магнитной связи. Его можно выразить через напряжения  $U_1$  и  $U_2$  при холостом ходе и число витков:

$$K_{CB} = \frac{U_2 W_1}{U_1 W_2}$$

или через индуктивности и взаимную индуктивность

$$K_{CB} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

В идеальном трансформаторе коэффициент связи стремится к единице, однако равным или больше единицы он быть не может.

Во избежание искажения сигналов при их трансформировании и для исключения преждевременного магнитного насыщения материала сердечника постоянным током иногда в сердечнике создают зазор из неферромагнитного материала. Но тогда коэффициент связи уменьшается.

## 7.1.2. Экспериментальная часть

### Задание

Измеряя напряжения, определите коэффициент магнитной связи между катушками

- при наличии замкнутого сердечника,
- при наличии сердечника с зазором,
- при наличии половины сердечника,
- при отсутствии сердечника.

### Порядок выполнения эксперимента

- Разместите первичную и вторичную катушки, имеющие по 900 витков каждая, на разъемном сердечнике, состоящем из двух половин, как показано на рис. 7.1.2.

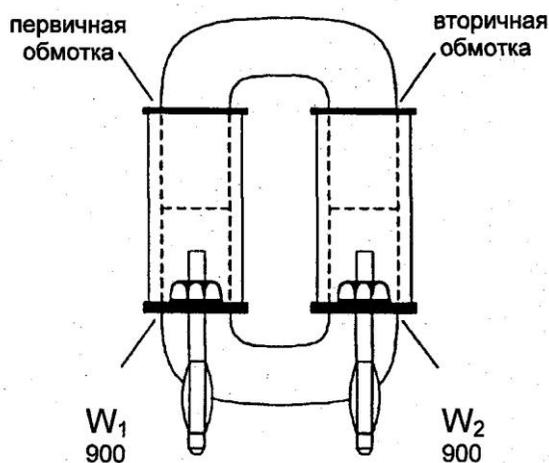


Рис. 7.1.2.

- Подсоедините источник синусоидального напряжения к выводам первичной обмотки согласно схеме (рис.7.1.3) и установите напряжение  $U_1 = 6 \dots 7$  В,  $f = 1$  кГц.

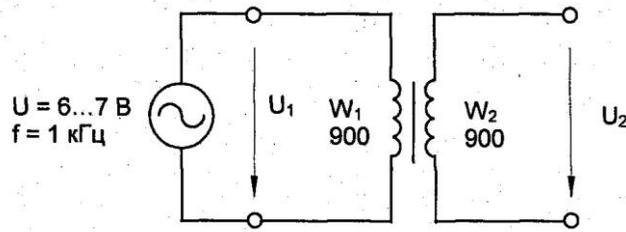


Рис. 7.1.3.

- Измерьте мультиметром первичное и вторичное напряжения и занесите результат в таблицу 7.1.1 (строка «При наличии замкнутого сердечника»). Вычислите  $K_{СВ}$ .

Таблица 7.1.1

	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$K_{СВ} = U_2 / U_1$
При наличии замкнутого сердечника			
При наличии сердечника с воздушным зазором			
При наличии половины сердечника			
При отсутствии сердечника			

- Для образования зазора в магнитопроводе поместите квадратики плотной бумаги между верхней и нижней половинами разъемного сердечника и повторите опыт.
- Удалите одну подкову разъемного сердечника и снова повторите измерения.
- Удалите сердечник полностью и заполните последнюю строку табл. 7.1.1.

**Вопрос:** Почему изменяется вторичное напряжение?

**Ответ:**

## 7.2. Коэффициент трансформации

### 7.2.1. Общие сведения

Отношение числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной обмотки трансформатора называют коэффициентом трансформации. Отношение чисел витков соответствует отношению первичного напряжения к вторичному при отсутствии нагрузки (холостом ходе) трансформатора и отношению вторичного тока к первичному при коротком замыкании.

В идеальном трансформаторе (т.е. при отсутствии потерь, при  $K_{CB} \rightarrow 1$  и бесконечно больших индуктивностях обмоток  $L_1$  и  $L_2$ ) при любой нагрузке выполняется условие:

$$K_{TP} = W_1/W_2 = U_1/U_2 = I_2/I_1$$

### 7.2.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Измеряя напряжения и токи, определите коэффициенты трансформаций при различных числах витков обмоток.

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите первичную (300 витков) и вторичную (100 витков) обмотки на разъемном сердечнике, как показано на рис. 7.2.1.

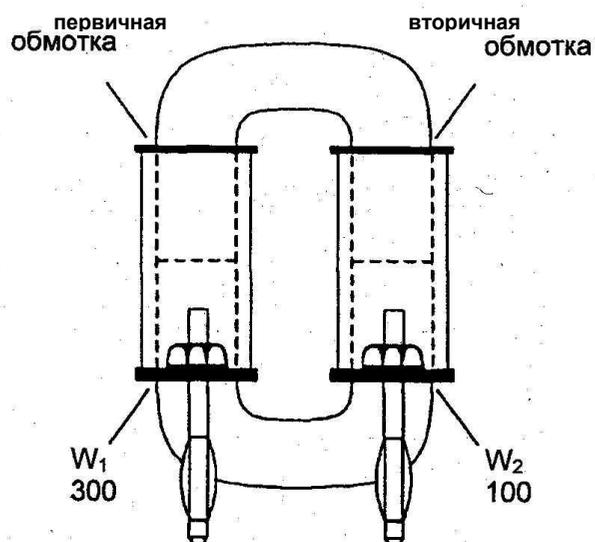


Рис. 7.2.1.

- Подключите источник питания к выводам первичной обмотки согласно рис. 7.2.2 и установите синусоидальное напряжение  $U_1 = 6$  В,  $f = 1$  кГц.

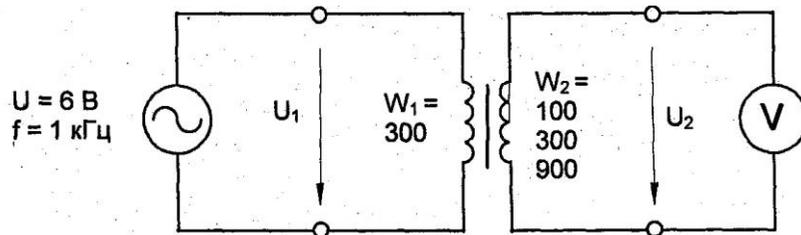


Рис. 7.2.2.

- Измерьте вторичные напряжения  $U_2$  на выводах вторичных обмоток с числами витков 100, 300 и 900 при холостом ходе. Занесите результаты в таблицу 7.2.1.

Таблица 7.2.1

$W_1$	$W_2$	$U_1, В$	$U_2, В$	$K_{ТР}$
300	100	6		
300	300	6		
300	900	6		

- Вычислите значения коэффициента трансформации по формуле

$$K_{ТР} = U_1 / U_2$$

- Проведите опыт короткого замыкания, измерив первичные и вторичные токи при числах витков вторичной обмотки 100, 300 и 900, как показано на рис. 7.2.3 и занесите результаты измерений в таблицу 7.2.2. Ток  $I_1$  следует поддерживать неизменным, равным 50 мА.

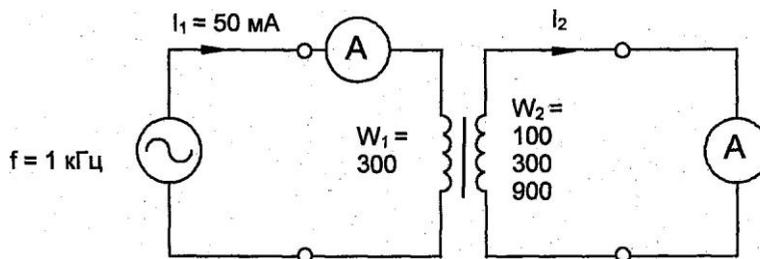


Рис. 7.2.3.

Таблица 7.2.2

$W_1$	$W_2$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$K_{ТР}$
300	100	50		
300	300	50		
300	900	50		

### 7.3. Преобразование сопротивлений с помощью трансформатора

#### 7.3.1. Общие сведения

Когда трансформатор ненагружен (холостой ход), отношение первичного напряжения к вторичному приблизительно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. Коэффициент трансформации

$$K_{TP} = U_1/U_2 = W_1/W_2.$$

При нагрузке имеет место ток  $I_2$  в нагрузочном резисторе  $R_H$ , подключенном к выводам вторичной обмотки. Этот ток вызывает появление соответствующего тока в первичной обмотке

$$I_1 = I_2 / K_{TP}.$$

Через первичные напряжение и ток можно найти входное сопротивление трансформатора

$$R_{BX} = U_1 / I_1.$$

Нагрузочное сопротивление можно определить как

$$R_H = U_2 / I_2.$$

Взяв отношение сопротивлений, получаем

$$R_{BX} / R_H = (U_1 / I_1) / (U_2 / I_2) = K_{TP}^2.$$

или

$$R_{BX} = R_H \cdot K_{TP}^2.$$

Это означает, что сопротивление нагрузки  $R_H$  преобразуется к первичной стороне трансформатора. В реальном трансформаторе, если учесть сопротивление обмоток, получается  $R_{BX}$  несколько больше, чем  $R_H K_{TP}^2$ .

#### 7.3.2. Экспериментальная часть

##### Задание

Определите величины сопротивлений  $R_{BX}$  и  $R_H$ , измеряя токи и напряжения на первичной и вторичной сторонах трансформатора при различных соотношениях чисел витков обмоток и значениях сопротивления нагрузки  $R_H$ . Определите входное сопротивление как  $R_H K_{TP}^2$  и сравните его с  $R_{BX}$ .

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите трансформатор на разъемном сердечнике с катушками, имеющими числа витков  $W_1 = 300$  и  $W_2 = 100$ .
- Подключите источник питания, как показано на рис. 7.3.1, и установите синусоидальное напряжение  $U_1 = 6$  В,  $f = 1$  кГц (при  $R_H = 10$  Ом).

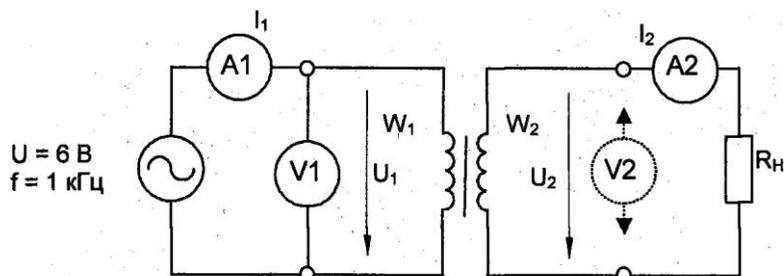


Рис. 7.3.1

- Измерьте токи и напряжения при числах витков обмоток и сопротивлениях нагрузки согласно таблице 7.3.1.

Таблица 7.3.1

$W_1$	$W_2$	$K_{TP}$	$R_H, \text{ Ом}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$I_1, \text{ мА}$	$I_2, \text{ мА}$	$R_{BX}, \text{ Ом}$	$R_H, \text{ Ом}$	$K^2_{TP} R_H$
300	100	3	10							
300	300	1	100							
300	900	0,33	1000							

- Вычислите сопротивления  $R_{BX}$  и  $R_H$  по формуле  $R = U / I$ .
- Затем вычислите входное сопротивление по формуле  $K^2_{TP} R_H$  и сравните его со значениями, найденными как  $U_1 / I_1$ .

## 7.4. Определение параметров схемы замещения и построение векторной диаграммы трансформатора

### 7.4.1. Общие сведения

При расчете электрических цепей с трансформаторами их чаще всего заменяют Т-или Г-образной схемой замещения, приведенной к первичной или вторичной стороне. Наиболее точной является Т-образная схема замещения. Она изображена на рис. 7.4.1а. Все сопротивления схемы приведены к первичной стороне.

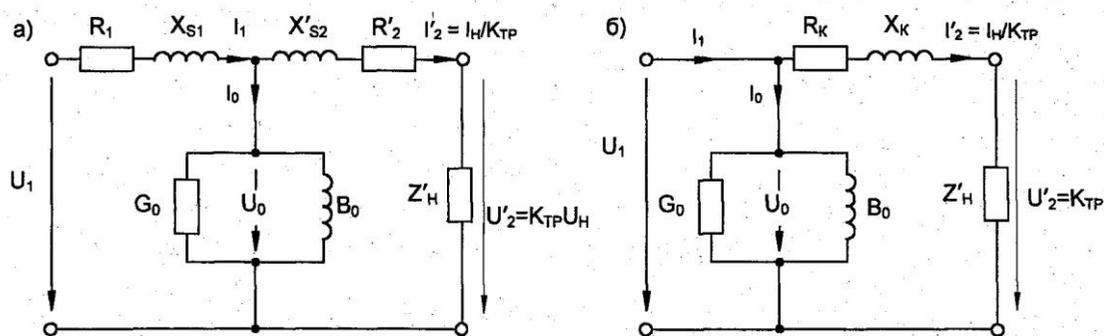


Рис. 7.4.1.

В этой схеме:

$G_0$  - активная проводимость, учитывающая потери на вихревые токи и перемагничивание сердечника;

$B_0$  - реактивная проводимость, обусловленная основным магнитным потоком;

$R_1$  - активное сопротивление первичной обмотки и  $R'_2$  - вторичной обмотки, приведенное к первичной стороне ( $R'_2 = K_{TP}^2 R_2$ );

$X_{S1}$  и  $X'_{S2}$  - реактивные сопротивления рассеяния обмоток ( $X'_{S2} = K_{TP}^2 X_{S2}$ );

$Z'_H$  - сопротивление нагрузки ( $Z'_H = K_{TP}^2 Z_H$ )

Часто используется упрощенная Г-образная схема замещения (рис. 7.4.1б). В этой схеме сопротивления первичной и вторичной обмоток объединены:

$$R_K = R_1 + R'_2; \quad X_K = X_{S1} + X'_{S2}$$

Параметры схемы замещения трансформатора определяют по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода к первичной обмотке подводят напряжение  $U_{1X} = U_{1НОМ}$ , измеряют  $P_{1X}$ ,  $I_{1X}$  и  $U_{1X}$  - (Вместо  $P_{1X}$  можно измерить  $\varphi_{1X}$  - угол сдвига фаз между входным напряжением и током).

Опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении  $U_{1К}$ , при котором токи обмоток достигают номинальных значений  $I_{1К} = I_{1НОМ}$ ,  $I_{2К} \approx I_{2НОМ}$ . Измеряют  $P_{1К}$  (либо  $\varphi_{1К}$ ),  $I_{1К}$ ,  $U_{1К}$ ,  $I_{2К}$ .

Из опыта х.х.	Из опыта к.з.
$K_{TP} = U_{1X} / U_{2X}$ , $Y_{1X} = I_{1X} / U_{1X}$	$K_{TP} = I_{2К} / I_{1К}$ , $Z_{1К} = U_{1К} / I_{1К}$
$G_0 = Y_{1X} \cos \varphi_{1X}$ , $B_0 = Y_{1X} \sin \varphi_{1X}$	$R_K = Z_{1К} \cos \varphi_{1К}$ , $X_K = Z_{1К} \sin \varphi_{1К}$

Параметры Т-образной схемы вычисляются приближённо:

$$R_1 = R'_2 = R_K/2 = \quad \text{Ом}; \quad X_{S1} = X'_{S2} = X_K/2 = \quad \text{Ом};$$

Векторная диаграмма для схемы замещения строится исходя из уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа. Для Т-образной схемы в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{I}'_2 + \dot{I}_0; \\ \dot{U}_0 &= \dot{U}'_2 + R'_2 \dot{I}'_2 + jX'_{S2} \dot{I}'_2; \\ \dot{U}_1 &= \dot{U}_0 + R_1 \dot{I}_1 + jX_{S1} \dot{I}_1. \end{aligned}$$

Можно предложить следующую последовательность при построении (рис. 7.4.2). В произвольно выбранном направлении строим вектор напряжения на нагрузке  $U'_2 = K_{TP} U_H$  и под углом  $\varphi_H$  к нему вектор тока нагрузки  $I'_2 = I_H / K_{TP}$  (см. рис. 7.4.2). На рисунке принято  $\varphi_H > 0$ , а опыт в данной лабораторной работе делается при  $\varphi_H = 0$ .

Из конца вектора  $U'_2$  строим векторы  $R'_2 I'_2$  (параллельно  $I'_2$ ) и  $X'_{S2} I'_2$  (перпендикулярно  $I'_2$ ). Полученная сумма равна напряжению  $U_0$ . Вектор магнитного потока  $\Phi_0$  отстает от него на  $90^\circ$ .

Далее под углом  $\varphi_{1X}$  к вектору  $U_0$  строим вектор  $I_0 \approx I'_{1X}$  и находим вектор тока  $I_1$  как сумму  $I'_2$  и  $I_0$ .

Затем от конца вектора  $U_0$  откладываем падения напряжений  $R_1 I_1$  (параллельно  $I_1$ ) и  $X_{S1} I_1$  (перпендикулярно  $I_1$ ) и находим  $U_1$  как сумму этих трех векторов.

В лабораторной работе используются трансформаторы с разъемным сердечником и сменными катушками. Номинальные параметры этих трансформаторов при частоте 50 Гц приведены в табл. 7.4.1.

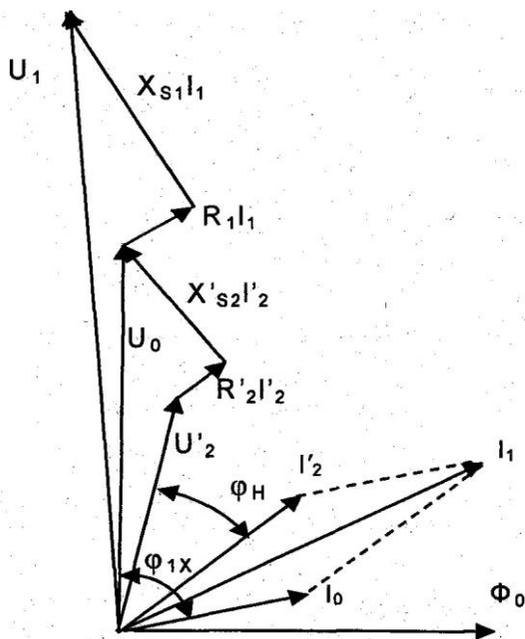


Рис. 7.4.2.

Таблица 7.4.1

W	$U_H$ , В	$I_H$ , мА	R, Ом	$S_H$ , ВА
100	2,33	600	0,9	1,4
300	7	200	4,8	1,4
900	21	66,7	37	1,4

## 7.4.2. Экспериментальная часть

### Задание

Проделайте опыты холостого хода и короткого замыкания, определите параметры Т-образной схемы замещения, сделайте измерения первичных и вторичных величин при заданной нагрузке и постройте векторную диаграмму.

### Порядок выполнения работы

- Соберите трансформатор с числом витков  $W_1 = 300$ ,  $W_2 = 100, 300$  или  $900$  по указанию преподавателя.
- Соберите цепь по схеме (рис. 7.4.3). Сопротивление  $R_{доб}$  служит для ограничения тока в опыте короткого замыкания и в первом опыте нужно вставить вместо него перемычку.
- Сделайте измерения при холостом ходе ( $R_H = \infty$ ) и запишите результаты в табл. 7.4.2. Вычислите разность фаз:  $\varphi_1 = \arccos P_1 / (U_1 \cdot I_1)$ , коэффициент трансформации  $U_1 / U_2$  и тоже запишите их значения в табл. 7.4.2.

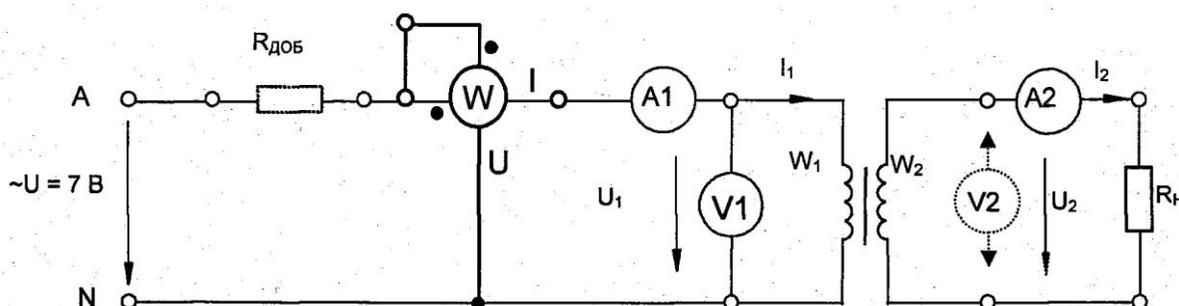


Рис.7.4.3.

- Прделайте опыт короткого замыкания. Для этого вставьте добавочное сопротивление  $R_{доб} = 22$  Ом и перемычку между выходными зажимами вместо  $R_H$ . Подберите более точно  $R_{доб}$  так, чтобы ток  $I_1$  был примерно (с точностью  $\pm 5\%$ ) равен номинальному току ( $200$  мА) обмотки  $300$  витков. Для этого можно использовать параллельное или последовательное соединение сопротивлений, имеющихся в наборе. Запишите результаты измерений.
- Вычислите угол  $\varphi_1$ , коэффициент трансформации  $I_2 / I_1$  и тоже запишите в табл. 7.4.2.
- Замените  $R_{доб}$  снова на перемычку и подберите сопротивление  $R_H$  так, чтобы токи были близки к номинальным (с точностью  $\pm 20\%$ ). Сделайте измерения и вычислите  $\varphi_1$ ,  $U_1 / U_2$ ,  $I_2 / I_1$  и запишите результаты в таблицу.

Таблица 7.4.2

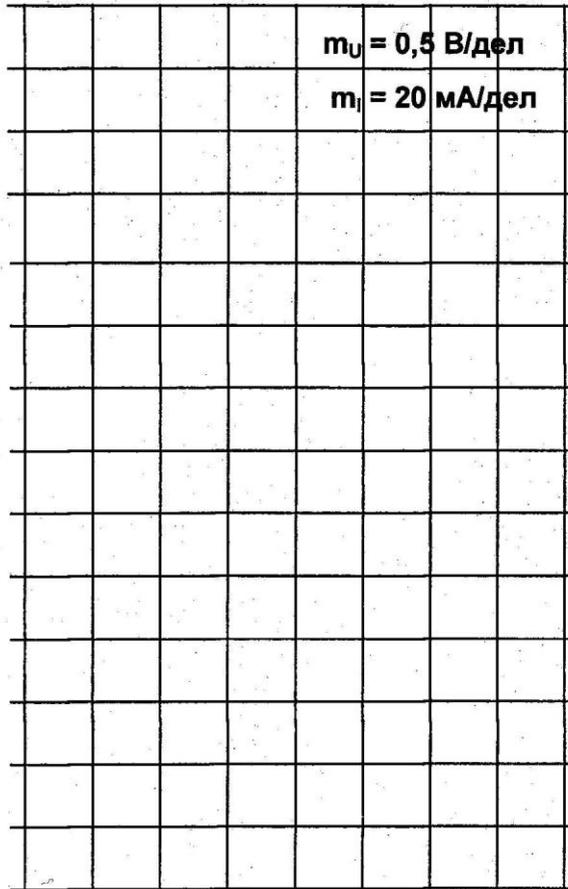
	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$P_1$ , Вт	$\varphi_1$ , град.	$U_1 / U_2$	$I_2 / I_1$
Опыт х.х								-
Опыт к.з							-	
Нагрузочный режим								

- Сделайте расчет параметров Т-образной схемы замещения трансформатора и запишите результаты в табл. 7.4.3.

Таблица 7.4.3

Из опыта х.х.		Из опыта к.з.	
$K_{TP} = U_{1X} / U_{2X} = \dots$		$K_{TP} = I_{2K} / I_{1K} = \dots$	
$Y_{1X} = I_{1X} / U_{1X} = \dots$	1/ОМ	$Z_{1K} = U_{1K} / I_{1K} = \dots$	ОМ
$G_0 = Y_{1X} \cos \varphi_{1X} = \dots$	1/ОМ	$R_K = Z_{1K} \cos \varphi_{1K} = \dots$	ОМ
$B_0 = Y_{1X} \sin \varphi_{1X} = \dots$	1/ОМ	$X_K = Z_{1K} \sin \varphi_{1K} = \dots$	ОМ

• Сделайте необходимые расчеты и постройте на рис. 7.4.4 векторную диаграмму в нагрузочном режиме. Сравните величину напряжения  $U_1$ , полученную построением с измеренным значением.



$$R_1 = R'_2 = R_K / 2 = \quad \text{ОМ};$$

$$X_{S1} = X'_{S2} = X_K / 2 = \quad \text{ОМ};$$

$$I'_2 = I_2 / K_{TP} = \quad \text{мА};$$

$$U'_2 = U_2 K_{TP} = \quad \text{В};$$

$$R'_2 I'_2 = \quad \text{В};$$

$$X'_{S2} I'_2 = \quad \text{В};$$

$$R_1 I_1 = \quad \text{В};$$

$$X_{S1} I_1 = \quad \text{В}.$$

Из диаграммы:

$$U_1 = \dots \text{ В}.$$

Из табл. 7.4.2:

$$U_1 = \dots \text{ В}.$$

Рис.7.4.4

## 7.5. Внешняя характеристика и коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора

### 7.5.1. Общие сведения

Ввиду наличия активных сопротивлений и магнитных потоков рассеяния выходное напряжение зависит от тока нагрузки. Эта зависимость называется внешней характеристикой. Вид внешней характеристики зависит от характера нагрузки (активная, индуктивная или емкостная). По оси абсцисс откладывают обычно ток нагрузки в относительных единицах  $I_2/I_{2\text{НОМ}}$ , а по оси ординат  $U_2/U_{2\text{НОМ}}$ .

От нагрузки зависят потери мощности и КПД трансформатора. В случае активной нагрузки КПД имеет максимальное значение при

$$I_2 / I_{2\text{НОМ}} = \sqrt{P_{1X} / P_{1K}}$$

### 7.5.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Снимите экспериментально внешнюю характеристику и зависимость КПД от тока трансформатора, нагруженного на активное сопротивление.

#### Порядок выполнения работы

- Соберите трансформатор с числом витков  $W_1 = 300$ ,  $W_2 = 100, 300$  или  $900$  по указанию преподавателя.
- Соберите цепь по схеме (рис. 7.5.1).

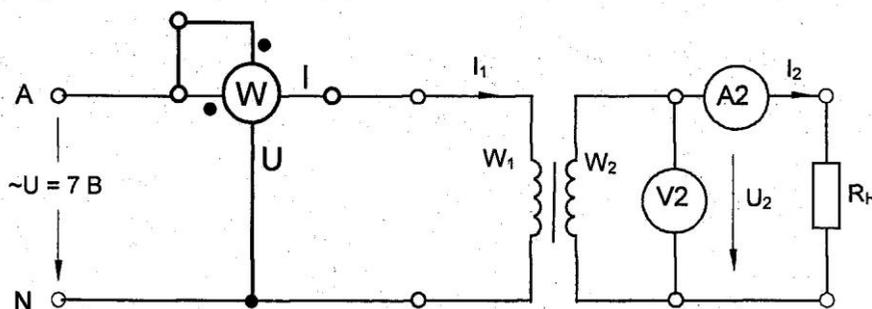


Рис. 7.5.1.

Изменяя сопротивление нагрузки, как указано в табл. 7.5.1, сделайте измерения  $U_2$ ,  $I_2$  и  $P_1$ , рассчитайте  $P_2 = U_2 \cdot I_2$ ,  $I_2/I_{2\text{НОМ}}$ ,  $U_2/U_{2\text{НОМ}}$ , КПД и постройте графики на рис. 7.5.2. (Номинальные параметры обмоток указаны в табл. 7.4.1)

Таблица 7.5.1.

$R_n$ , Ом	$U_2$ , В	$I_2$ , мА	$P_1$ , мВт	$P_2$ , мВт	$U_2/U_{2НОМ}$	$I_2/I_{2НОМ}$	КПД
х.х.							
330							
220							
100							
47							
22							

*Примечание: В табл. 7.5.1 указаны значения сопротивлений  $R_n$  для случая, когда  $W_1 = W_2 = 300$  витков. При  $W_2 = 900$  витков их надо увеличить, а при  $W_2 = 100$  - уменьшить в 10 раз. Поскольку в наборе нет сопротивлений меньше 10 Ом, можно использовать в качестве активных сопротивлений катушки трансформаторов (без сердечника). Их сопротивления указаны в табл. 7.4.1.*

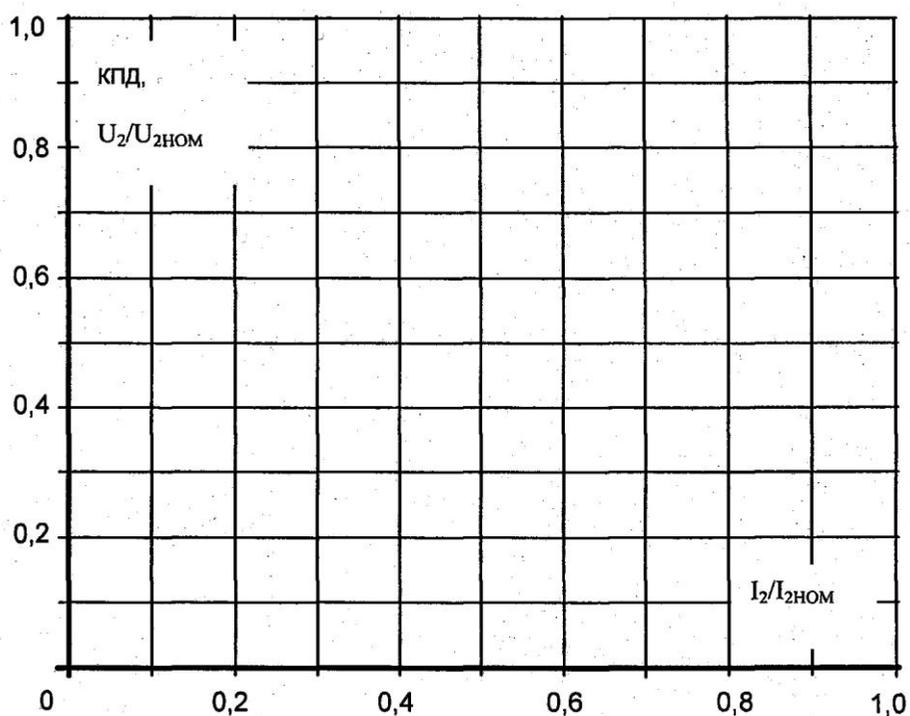


Рис.7.5.2.

## 8. Трехфазные цепи синусоидального тока

### 8.1. Напряжения в трехфазной цепи

#### 8.1.1. Общие сведения

**Трехфазная система напряжений (ЭДС)** - это совокупность трех синусоидальных напряжений (ЭДС), сдвинутых относительно друг друга по фазе. Система называется симметричной, если амплитуды всех трех напряжений одинаковы, а фазовые сдвиги составляют  $120^\circ$ .

Обычный трехфазный генератор, применяемый в электроэнергетике, состоит из неподвижного статора и вращающегося ротора. На роторе имеется обмотка возбуждения, по которой протекает постоянный ток от синусоидального источника. Постоянный ток создает магнитное поле, вращающееся вместе с ротором. На статоре имеется три обмотки, смещенные относительно друг друга в пространстве на  $120^\circ$ . В них наводятся три одинаковых синусоидальных ЭДС, смещенных во времени. Фазовый сдвиг составляет  $120^\circ$ .

Временная развертка этих напряжений приведена на рис. 8.1.1. Они же представлены в виде векторов на диаграмме (рис. 8.1.2).

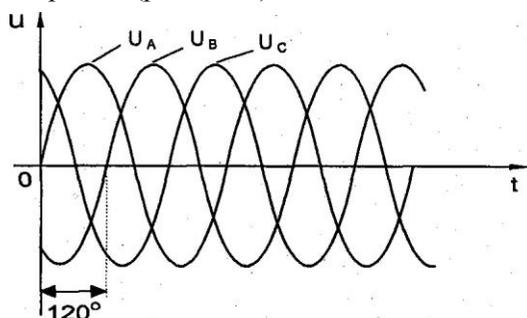


Рис. 8.1.1

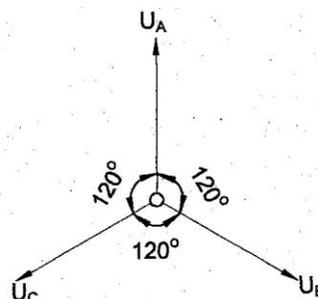


Рис. 8.1.2

В трехфазных электрических генераторах и нагрузках (в частности, двигателях) в качестве основных схем соединения фаз используются «звезда» (рис. 8.1.3) и «треугольник» (рис. 8.1.4). Соединение в звезду может выполняться с нейтральным проводом (на рисунке он показан пунктиром) или без него.

В схеме «звезда» напряжения между выводами А, В и С называются **линейными**, тогда как напряжение между любой из этих точек и нейтралью N принято называть **фазным**. Векторная диаграмма напряжений такой трехфазной цепи приведена также на рис. 8.1.3, где показаны соотношения между фазами и величинами линейных  $U_L$  и фазных  $U_\Phi$  напряжений. Так, в частности, между их действующими значениями имеется следующая связь:

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_\Phi$$

В схеме «треугольник» линейные напряжения равны соответствующим фазным.

В последующих экспериментах изучаются напряжения и токи в трехфазных цепях с соединением «звезда» и «треугольник». Измеряются и рассчитываются обычно действующие значения напряжений и токов.

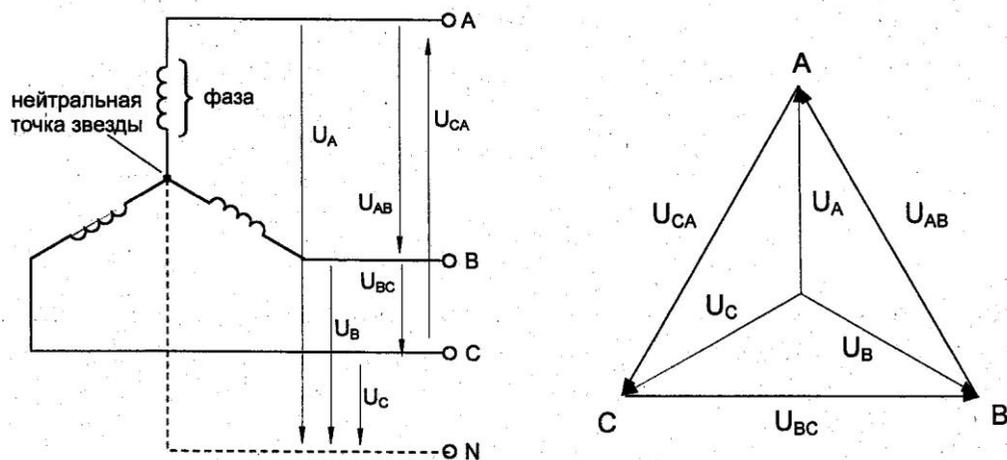


Рис. 8.1.3

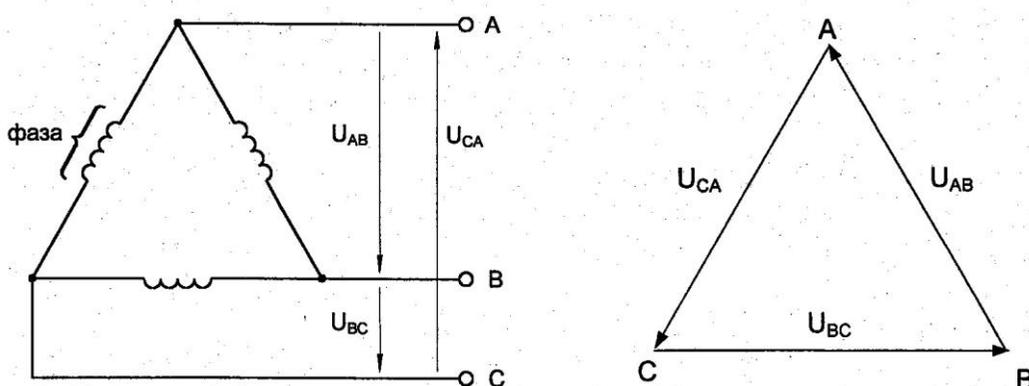


Рис. 8.1.4

Необходимое для экспериментов трехфазное напряжение частотой 50 Гц берется не непосредственно из питающей сети, а создается с помощью специального генератора синусоидальных напряжений. При этом из соображений электробезопасности величина линейного напряжения ограничена 12 В.

### 8.1.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Произведите измерения фазных и линейных напряжений трёхфазного источника напряжения. С помощью осциллографа измерьте углы сдвига фазных напряжений относительно друг друга.

#### Порядок выполнения эксперимента

- Подключите выходы трехфазного генератора А и В к входам осциллографа (рис. 8.1.5), приготовьте мультиметр для измерения переменных напряжений.
- Настройте осциллограф так, чтобы на экране было изображение одного периода двух напряжений, причём синхронизацию произведите по второму каналу.

**Примечание:** для измерения разности фаз необходимо использовать режим прерывистого (не поочерёдного!) изображения сигналов двух каналов осциллографа.

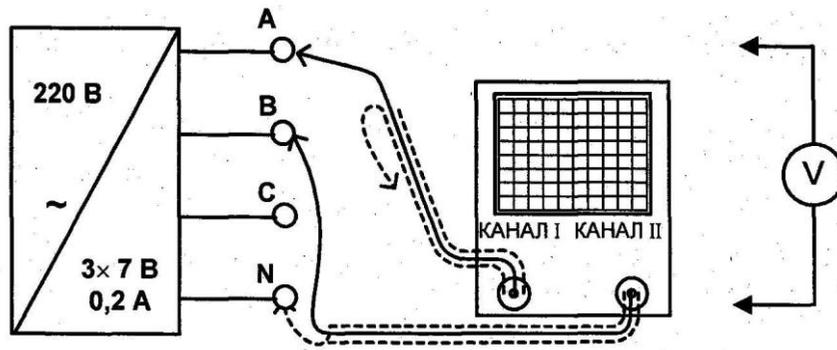


Рис. 8.1.5

- Перенесите на график (рис. 8.1.6) осциллограммы напряжений  $U_A$ ,  $U_B$ , переключите вход первого канала осциллографа на фазу C и перенесите осциллограмму напряжения  $U_C$  на график.
- Измерьте вольтметром все фазные и линейные напряжения. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 8.1.1.

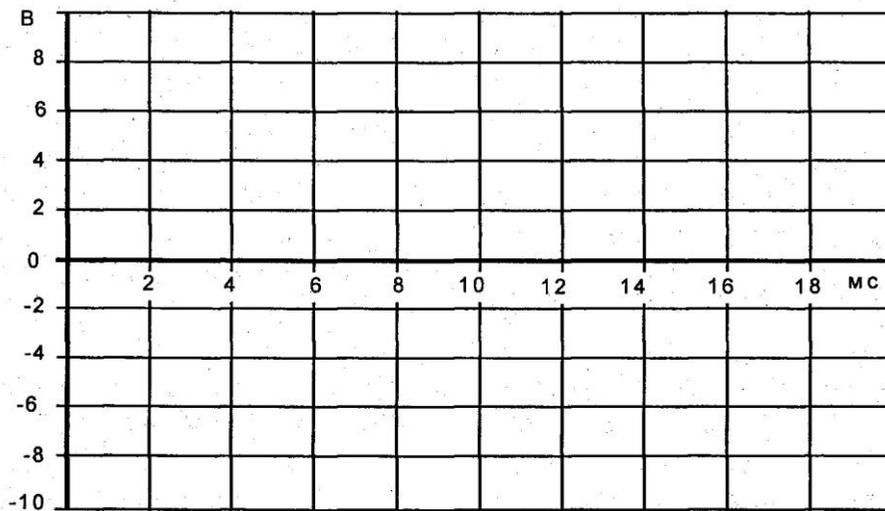


Рис. 8.1.6

Таблица 8.1.1.

Измерения		Расчет
$U_A$ , В		Среднее значение фазных напряжений: $U_{\Phi} = (U_A + U_B + U_C) / 3 = \dots$ В
$U_B$ , В		
$U_C$ , В		
$U_{AB}$ , В		Среднее значение линейных напряжений: $U_{Л} = (U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}) / 3 = \dots$ В
$U_{BC}$ , В		
$U_{CA}$ , В		
$\psi_A - \psi_B$ , град		Отношение $U_{\Phi} / U_{Л} = \dots$
$\psi_B - \psi_C$ , град		
$\psi_C - \psi_A$ , град		
		Средний угол сдвига между фазными напряжениями: $\varphi = \frac{(\psi_A - \psi_B) + (\psi_B - \psi_A) + (\psi_C - \psi_A)}{3} = \dots$

## 8.2. Трёхфазная нагрузка, соединенная по схеме «звезда»

### 8.2.1. Общие сведения

Если нагрузки (приемники) соединены в трёхфазную цепь по схеме «звезда» (рис. 8.2.1), то к сопротивлениям нагрузки приложены фазные напряжения. Линейные токи равны фазным и определяются по закону Ома:

$$I_A = \frac{U_A}{R_A}; I_B = \frac{U_B}{R_B}; I_C = \frac{U_C}{R_C}$$

а ток в нейтрали равен векторной сумме этих токов:  $I_N = I_A + I_B + I_C$

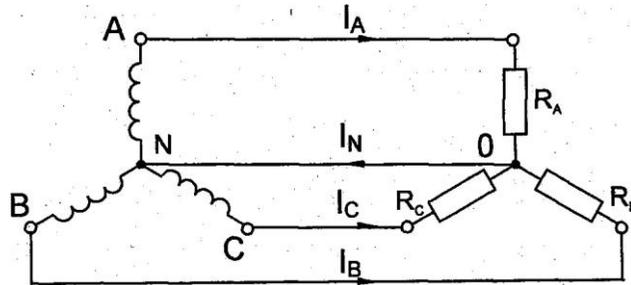


Рис. 8.2.1

При симметричных напряжениях  $U_A, U_B, U_C$  и одинаковых сопротивлениях  $R_A = R_B = R_C = R$  токи  $I_A, I_B, I_C$  также симметричны и их векторная сумма ( $I_N$ ) равна нулю. Тогда

$$I_L = I_\Phi = U_\Phi / R; I_N \approx 0.$$

Если же сопротивления фаз нагрузки неодинаковы, то через нулевой провод протекает некоторый ток  $I_N$  а в схеме без нейтрали происходит смещение точки 0 на векторной диаграмме напряжений. Это поясняется на векторных диаграммах (рис. 8.2.2).

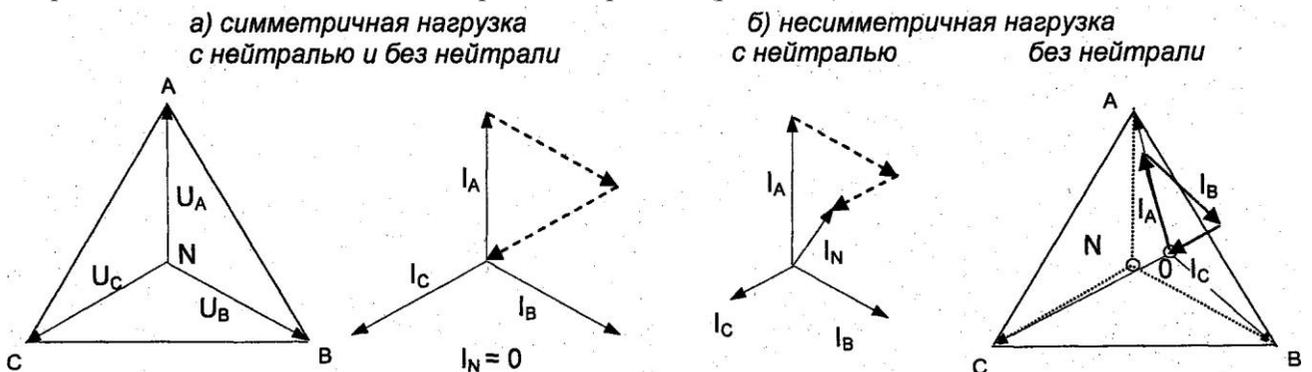


Рис. 8.2.2.

Мощность трёхфазной нагрузки складывается из мощностей фаз:  $\sum P = P_A + P_B + P_C$ .

Когда нагрузка симметричная и чисто резистивная, имеем

$$\sum P = 3P_\Phi = 3 \cdot U_\Phi \cdot I_\Phi.$$

При смешанной (активно-индуктивной или активно-емкостной) нагрузке:

Активная мощность

$$\Sigma P = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \cos\varphi$$

Реактивная мощность

$$\Sigma Q = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \sin\varphi$$

$$\Sigma S = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л}$$

## 8.2.2. Экспериментальная часть

### Задание

Для трехфазной цепи с соединением «звезда» при симметричной и несимметричной нагрузках измерьте с помощью мультиметра действующие значения токов  $I_{Л}$  и  $I_{N}$ , а также напряжений  $U_{Л}$  и  $U_{\Phi}$ , вычислите мощности  $P_{\Phi}$  и  $\Sigma P_{\Phi}$ , постройте векторные диаграммы.

### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь с симметричной нагрузкой ( $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$ ) согласно схеме (рис. 8.2.3).

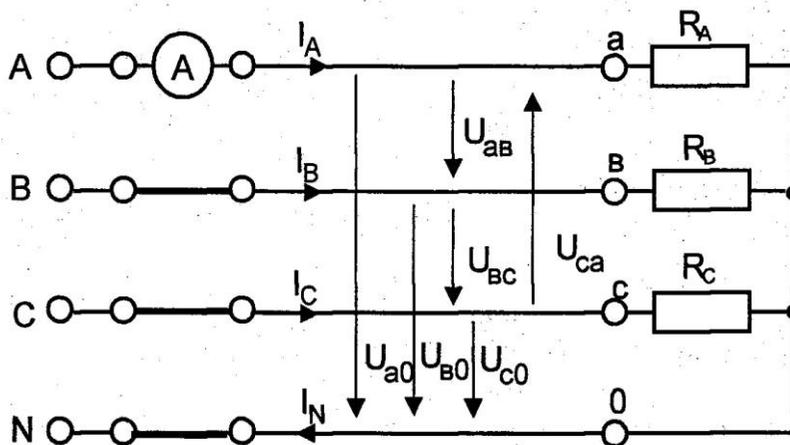


Рис. 8.2.3

- Измерьте напряжения и токи на нагрузке в схеме с нейтральным проводом и вычислите мощности. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 8.2.1.
- Уберите из схемы нейтральный провод (перемычку между точками N и 0) и повторите опыт.



### 8.3. Трехфазные нагрузки, соединенные по схеме «треугольник»

#### 8.3.1. Общие сведения

Если нагрузки (приемники) соединены в трехфазную цепь по схеме «треугольник» (рис. 8.3.1), нагрузка  $R_{AB}$ ,  $R_{BC}$  и  $R_{CA}$  каждой фазы включается на *линейное напряжение*, которое в данном случае равно *фазному*  $U_{Л} = U_{Ф}$

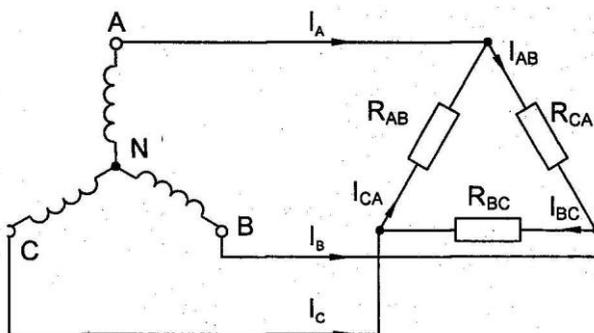


Рис. 8.3.1

Фазные токи  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$  и  $I_{CA}$  определяются по закону Ома:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}}; \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{R_{BC}}; \quad I_{CA} = \frac{U_{CA}}{R_{CA}}.$$

Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}; \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}.$$

При симметричных напряжениях  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  и одинаковых нагрузках фаз  $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R$  токи также симметричны:

$$I_{Ф} = U_{Ф} / R; \quad I_{Л} = I_{Ф} / \sqrt{3}.$$

Это поясняется на векторных диаграммах (рис. 8.3.2).

а) симметричная нагрузка

б) несимметричная нагрузка

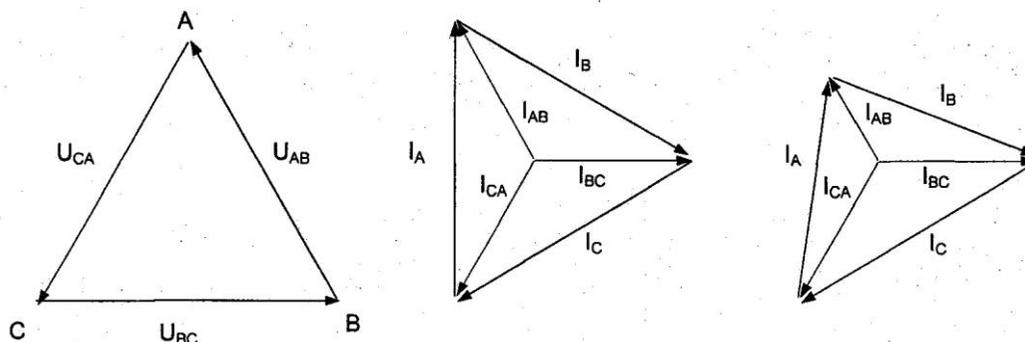


Рис.8.3.2.

Мощность  $\Sigma P$ , потребляемая трехфазной нагрузкой при ее соединении в «треугольник», складывается из мощностей фаз  $\Sigma P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$ . При симметричной чисто активной нагрузке

$$\Sigma P = 3P_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi}$$

При смешанной (активно-индуктивной или активно-емкостной) нагрузке:

Активная мощность

$$\Sigma P = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \cos\varphi$$

Реактивная мощность

$$\Sigma Q = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л} \cdot \sin\varphi$$

Полная мощность

$$\Sigma S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{Л} \cdot I_{Л}$$

### 8.3.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Для трехфазной цепи с соединением «треугольник» при симметричной и несимметричной активных нагрузках измерить с помощью мультиметра или виртуальных приборов действующие значения токов  $I_{Л}$  и  $I_{\phi}$ , а также напряжений  $U_{Л}$ , затем вычислить мощности  $P_{\phi}$  и  $\Sigma P$ .

#### Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь с симметричной нагрузкой ( $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = 1 \text{ кОм}$ ) согласно схеме (рис. 8.3.3). Для измерения шести токов (три фазных и три линейных) включите в цепь перемычки.

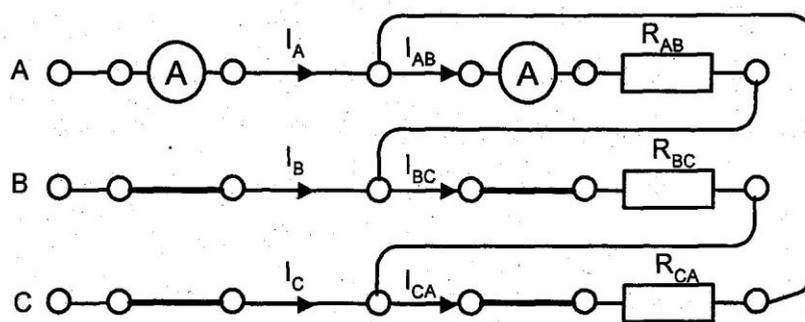


Рис. 8.3.3

- Измерьте мультиметрами напряжения и токи согласно табл. 8.3.1 и вычислите мощности.

Таблица 8.3.1

Схема «треугольник»		Нагрузка симметричная	Нагрузка несимметричная
Линейные токи, мА	$I_A$		
	$I_B$		
	$I_C$		
Фазные токи, мА	$I_{AB}$		
	$I_{BC}$		
	$I_{CA}$		
Фазные и линейные напряжения, В	$U_{AB}$		
	$U_{BC}$		
	$U_{CA}$		
Фазные мощности, мВт	$P_{AB}$		
	$P_{BC}$		
	$P_{CA}$		
Общая мощность, мВт	$\sum P$		

- Повторите измерения и вычисления для несимметричной нагрузки ( $R_{AB}=1 \text{ кОм}$ ,  $R_{BC}=680 \text{ Ом}$ ,  $R_{CA}=330 \text{ Ом}$ ).
- На рис. 8.3.4 в масштабе постройте векторные диаграммы.

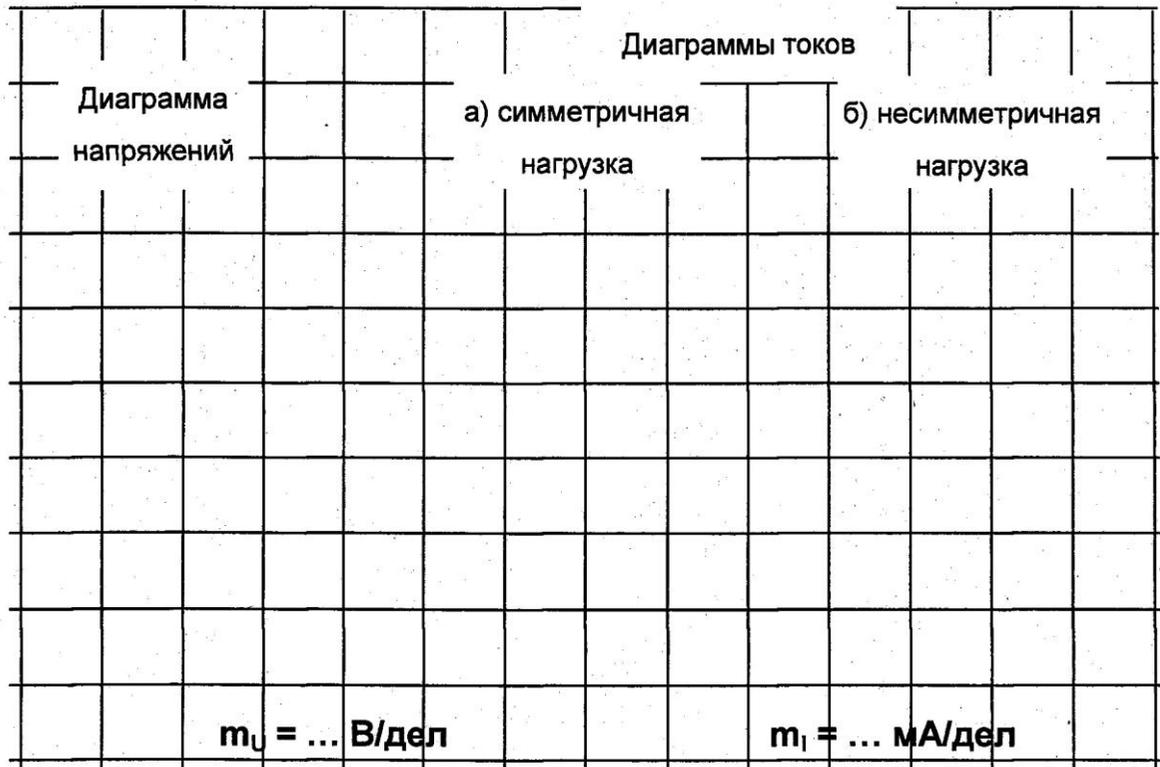


Рис. 8.3.4.

## 8.4. Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду

### 8.4.1. Общие сведения

Аварийными являются режимы, возникают при коротких замыканиях в нагрузке или в линиях и обрыве проводов. Остановимся на некоторых типичных аварийных режимах.

#### Обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке

В симметричном режиме  $I_N = 0$ , поэтому обрыв нейтрального провода не приводит к изменению токов и напряжений в цепи и такой режим не является аварийным. Однако, при несимметричной нагрузке  $I_N \neq 0$ , поэтому обрыв нейтрали приводит к изменению всех фазных токов и напряжений. На векторной диаграмме напряжений точка «O» нагрузки, совпадающая до этого с точкой «N» генератора, смещается таким образом, чтобы сумма фазных токов оказалась равной нулю (рис.8.4.1). Напряжения на отдельных фазах могут существенно превысить номинальное напряжение.

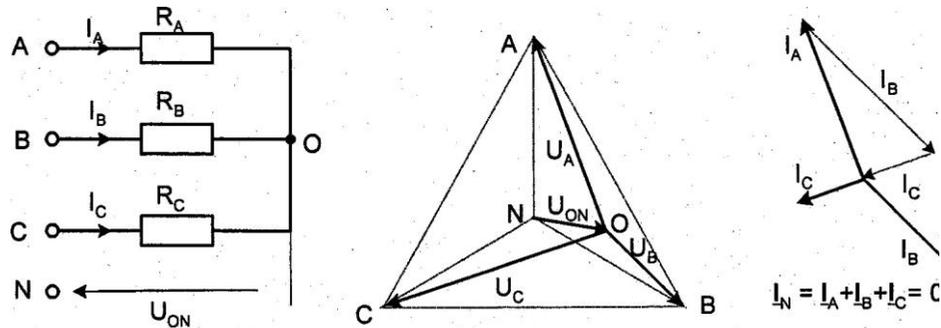


Рис. 8.4.1

#### Обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме с нулевым проводом

При обрыве провода, например, в фазе A ток этой фазы становится равным нулю, напряжения и токи в фазах B и C не изменяются, а в нулевом проводе появляется ток  $I_N = I_B + I_C$ . Он равен току, который до обрыва протекал в фазе A (рис. 8.4.2).

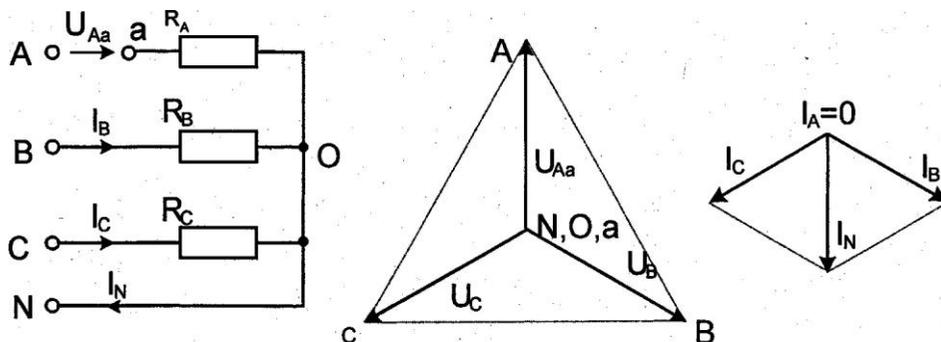


Рис.8.4.2

#### Обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме без нулевого провода

При обрыве, например, фазы А сопротивления  $R_A$  и  $R_B$  оказываются соединёнными последовательно и к ним приложено линейное напряжение  $U_{BC}$ . Напряжение на каждом из сопротивлений составляет  $\sqrt{3}/2$  от фазного напряжения в нормальном режиме. Нулевая точка нагрузки на векторной диаграмме напряжений смещается на линию BC, и при  $R_B = R_C$  она находится точно в середине отрезка BC (рис.8.4.3)

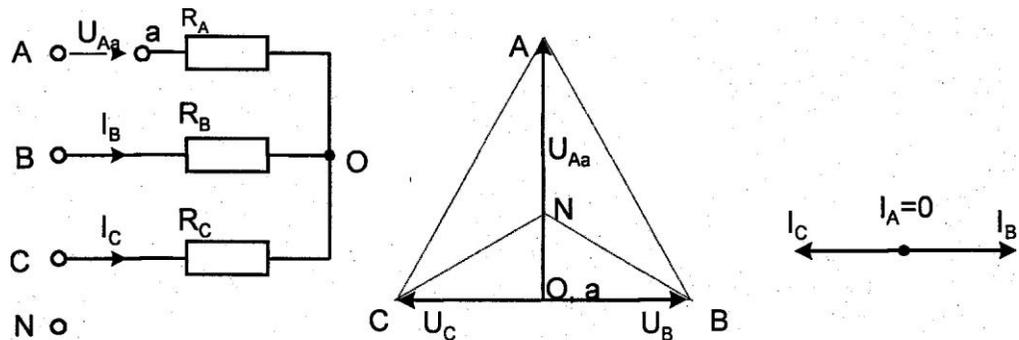


Рис.8.4.3 Короткие замыкания

При коротком замыкании фазы нагрузки в схеме с нулевым проводом ток в этой фазе становится очень большим (теоретически бесконечно большим) и это приводит к аварийному отключению нагрузки защитой. В схеме без нулевого провода при замыкании, например, фазы А, нулевая точка нагрузки смещается в точку «А» генератора. Тогда к сопротивлениям фаз В и С прикладываются линейные напряжения. Токи в этих фазах возрастают в  $\sqrt{3}$  раз, а ток в фазе А - в 3 раза (рис. 8.4.4).

Короткие замыкания между линейными проводами и в той и в другой схеме приводят к аварийному отключению нагрузки.

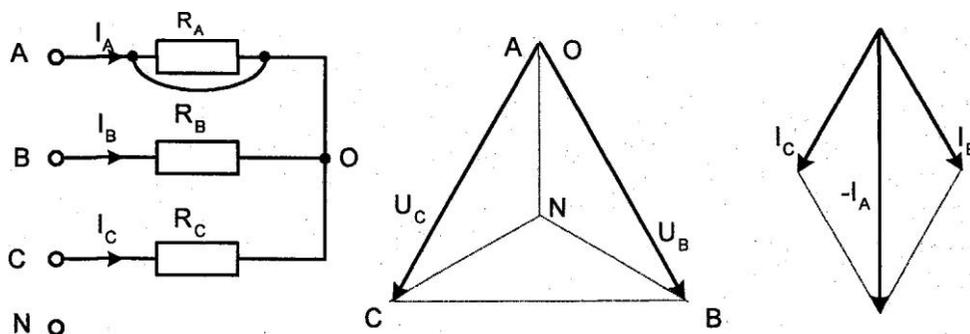


Рис.8.4.4

## 8.4.2. Экспериментальная часть

### Задание

Экспериментально исследовать аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

### Порядок выполнения работы







## 8.5 Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник

### 8.5.1. Общие сведения

При коротких замыканиях в фазах нагрузки или между линейными проводами токи резко возрастают и происходит аварийное отключение установки защитой.

Обрывы фаз или линейных проводов при соединении нагрузки в треугольник не приводят к перегрузкам по токам или напряжениям, как это иногда случается при соединении нагрузки в звезду.

**При обрыве одной фазы нагрузки** (рис. 8.5.1) ток этой фазы становится равным нулю, а в оставшихся двух фазах ток не меняется. Два линейных тока уменьшаются в  $\sqrt{3}$  раз, т. е. становятся равными фазному току, а третий остаётся неизменным.

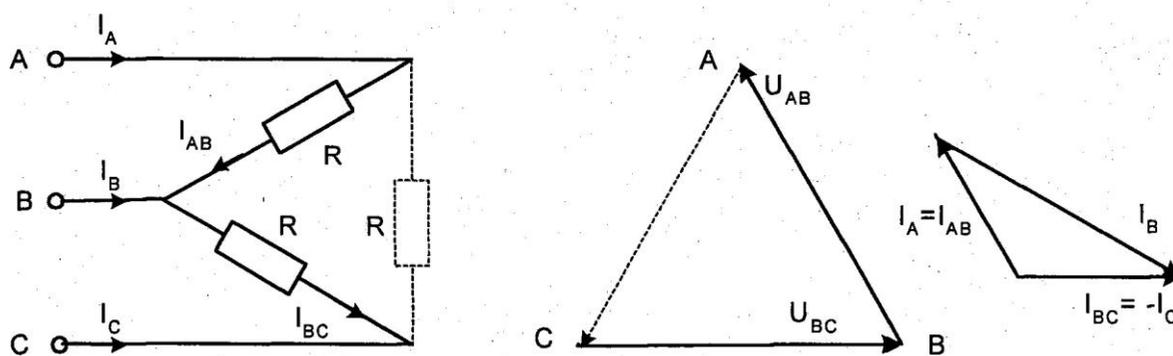


Рис. 8.5.1.

**При обрыве линейного провода** (например, В) фазные сопротивления  $R_{AB}$  и  $R_{BC}$  оказываются соединёнными последовательно и включёнными параллельно с сопротивлением  $R_{CA}$  на напряжение  $U_{CA}$  (рис. 8.5.2). Цепь фактически становится однофазной.

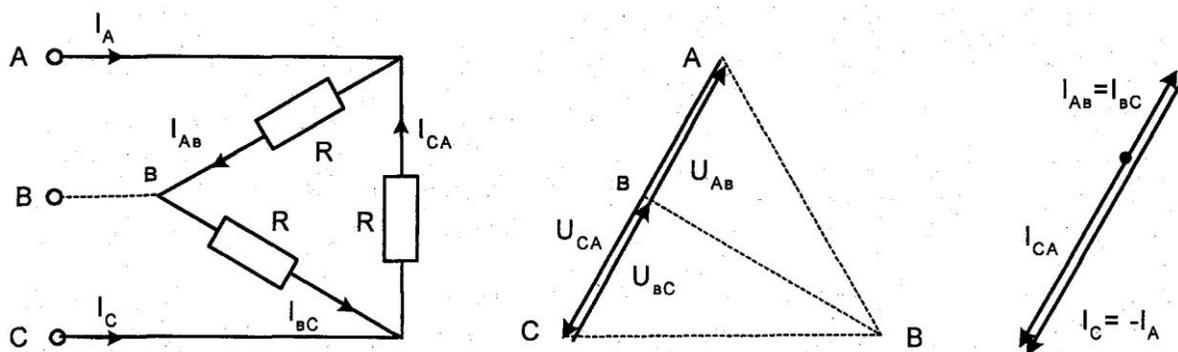


Рис. 8.5.2

**При одновременном обрыве линейного провода и одной фазы** нагрузки цепь также становится однофазной (рис. 8.5.3 и 8.5.4).

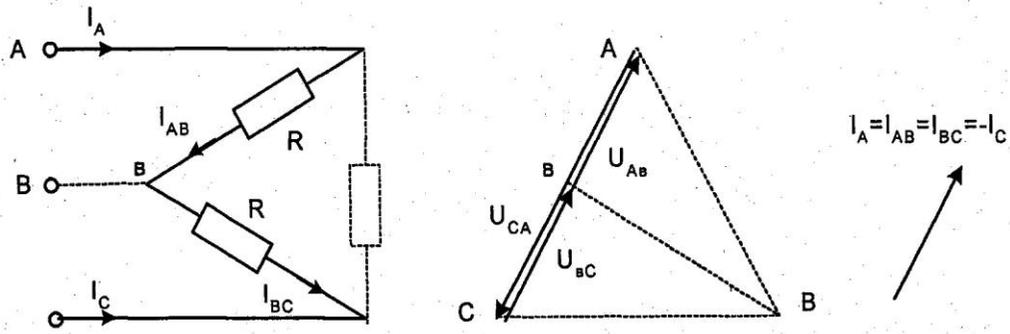


Рис.8.5.3

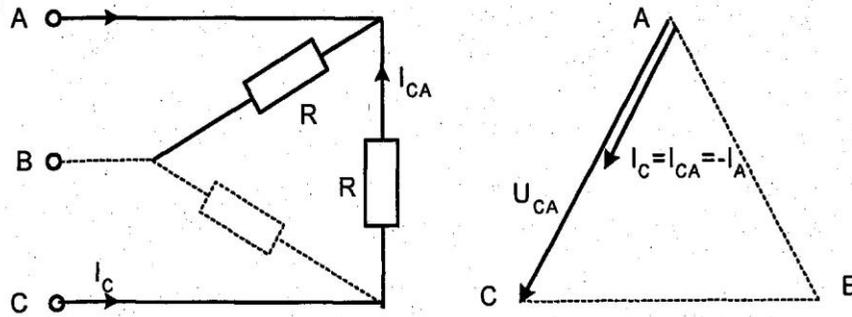


Рис.8.5.4

## 8.5.2. Экспериментальная часть

### Задание

Экспериментально исследовать аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник.

### Порядок выполнения работы

• Соберите цепь согласно схеме (рис.8.5.5). с сопротивлениями фаз  $R_{AB}=R_{BC}=R_{CA}=1\text{КОМ}$ . Для удобства измерения фазных и линейных токов включите в цепь переключки.

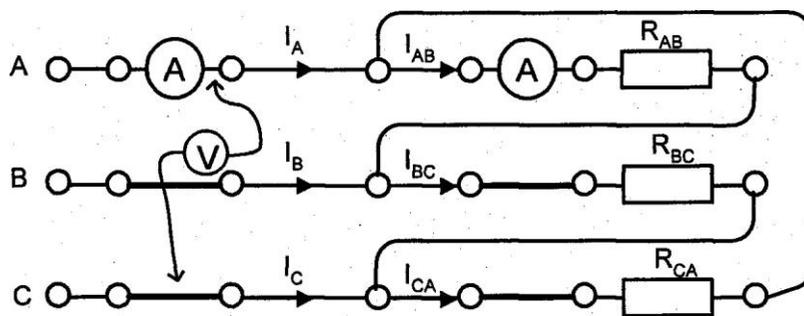


Рис.8.5.5

• Прделайте измерения фазных и линейных токов (отличных от нуля) во всех режимах, указанных в табл. 8.5.1.

- По экспериментальным данным постройте векторные диаграммы для каждого аварийного случая в выбранном масштабе.
- Ответьте на контрольные вопросы.

Таблица 8.5.1

Режим	$I_{AB}, \text{мА}$	$I_{BC}, \text{мА}$	$I_{CA}, \text{мА}$	$I_A, \text{мА}$	$I_B, \text{мА}$	$I_C, \text{мА}$
Симметричный режим, $R_{\Phi}=1 \text{ кОм}$						
Обрыв фазы <b>AB</b> нагрузки						
Обрыв линейного провода <b>A</b>						
Обрыв фазы <b>AB</b> и линии <b>C</b>						
Обрыв фазы <b>AB</b> и линии <b>A</b>						

### Векторные диаграммы

#### 2. Обрыв фазы AB нагрузки

$m_U = \dots\dots\dots \text{В/см}$							$m_I = \dots\dots\dots \text{мА/см}$								



## 9. Расчёт и экспериментальное исследование цепи при несинусоидальном приложенном напряжении

### 9.1. Общие сведения

Несинусоидальное периодическое напряжение, приложенное к электрической цепи, можно разложить в ряд Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k),$$

где

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d\omega t; \quad B_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \sin(k\omega t) d\omega t; \quad C_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cos(k\omega t) d\omega t;$$

$$U_{km} = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}; \quad \psi_k = \arctg(C_k/B_k).$$

Расчёт цепи проводят с использованием принципа наложения в следующей последовательности:

- рассчитывают цепь при постоянном приложенном напряжении  $U_0$ ;
- рассчитывают цепь (обычно комплексным методом) при синусоидальном приложенном напряжении с амплитудой  $U_{1m}$  частоты и частотой  $\omega$  ( $k=1$ );
- повторяют расчёт при  $k=2, 3, 4, \dots$ , учитывая, что индуктивные сопротивления увеличиваются с ростом частоты ( $X_L = k\omega L$ ), а ёмкостные уменьшаются ( $X_C = 1/\omega C$ );
- переходят к мгновенным значениям и суммируют постоянную и синусоидальные составляющие тока (напряжения) в каждой ветви;
- определяют действующие значения токов и напряжений, а также мощности по формулам:

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum U_{km}^2}; \quad I = \sqrt{I_0^2 + \sum I_{km}^2}; \quad P = U_0 I_0 + \sum U_k I_k \cos \varphi_k; \quad Q = \sum U_k I_k \sin \varphi_k; \quad S = UI,$$

где  $U_k, I_k$  - действующие значения синусоидальных составляющих.

Чем больше гармоник взято для расчёта, тем выше точность полученных результатов. Ниже в качестве примера приведен расчёт тока в цепи с последовательным соединением  $R, L$ , и  $C$  при двухполярном прямоугольном приложенном напряжений. Расчёт выполнен с помощью программы MathCAD. На графике построены две кривые тока: в одной учтены только основная (первая) и третья гармоники, а в другой учтены 5 гармоник - с первой по одиннадцатую.

$$n := 1, 3.. 11$$

$$U_m := 8 \quad f := 450$$

$$R := 100 \quad R_k := 74 \quad L := 0.04 \quad C := 10^{-6}$$

$$\omega := 2 \cdot 3.14 \cdot f$$

$$U_n := \frac{4 \cdot U_m}{3.14 \cdot n}$$

n =	U <sub>n</sub> =
1	10.191
3	3.397
5	2.038
7	1.456
9	1.132
11	0.926

$$Z_n := R + R_k + j \cdot \left( n \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{n \cdot \omega \cdot C} \right)$$

$$I_n := \frac{U_n}{Z_n}$$

$$i(t) := \sum_{n=1}^{11} \text{Im}(I_n \cdot e^{j \cdot n \cdot \omega \cdot t})$$

$$i1(t) := \sum_{n=1}^3 \text{Im}(I_n \cdot e^{j \cdot n \cdot \omega \cdot t})$$

Номера гармоник, принятые для расчёта

Амплитуда и частота приложенного напряжения

Параметры элементов цепи (R<sub>k</sub>-сопротивление катушки, R-добавочное сопротивление

Вычисление круговой частоты

Вычисление амплитуд гармоник для прямоугольного двуполярного напряжения

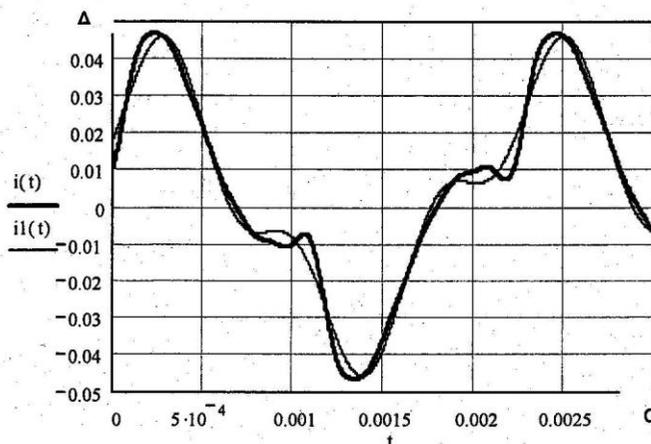
Вычисленные амплитуд гармоник приложенного напряжения

Вычисление комплексного сопротивления цепи для каждой гармоники

Расчёт амплитуд тока каждой гармоники по закону Ома в комплексной форме

Переход к мгновенным значениям и суммирование всех рассчитанных гармоник тока

Суммирование первой и третьей гармоник тока



Расчётные графики

## 9.2. Экспериментальная часть

### Задание

Рассчитайте мгновенное и действующее значение тока и напряжения на конденсаторе, а также потребляемую цепью активную мощность при прямоугольном периодическом приложенном напряжении, постройте график изменения тока на входе цепи, проверьте результаты расчёта путём осциллографирования и непосредственных измерений.

### Порядок выполнения работы

- Выберите один из приведенных ниже вариантов параметров цепи (рис. 9.1) и выполните расчёт согласно заданию, учитывая основную гармонику и одну - две высших. По результатам расчёта мгновенных значений на рис.9.2 постройте графики, а действующие значения тока, напряжения и мощность запишите в табл. 9.1.

#### Варианты параметров элементов цепи и приложенного напряжения:

$L = 10 \text{ мГн}$  ( $R_K=17 \text{ Ом}$ ),  $L = 40 \text{ мГн}$  ( $R_K=70 \text{ Ом}$ ),  $L = 100 \text{ мГн}$ , ( $R_K=170 \text{ Ом}$ );

$C = 0,22, 0,47$  или  $1 \text{ мкФ}$ ;

$R = 47, 100, 150,$  или  $220 \text{ Ом}$ ;

$U_m=8...10\text{В}, f=0,5...1 \text{ кГц}$ .

- Соберите цепь (рис.9.1) с принятыми в расчёте параметрами элементов, включите ваттметр и осциллограф.

- Установите на источнике принятое значение частоты и амплитуду прямоугольных импульсов, настройте осциллограф и перенесите осциллограммы на рис. 9.3. Запишите показание ваттметра.

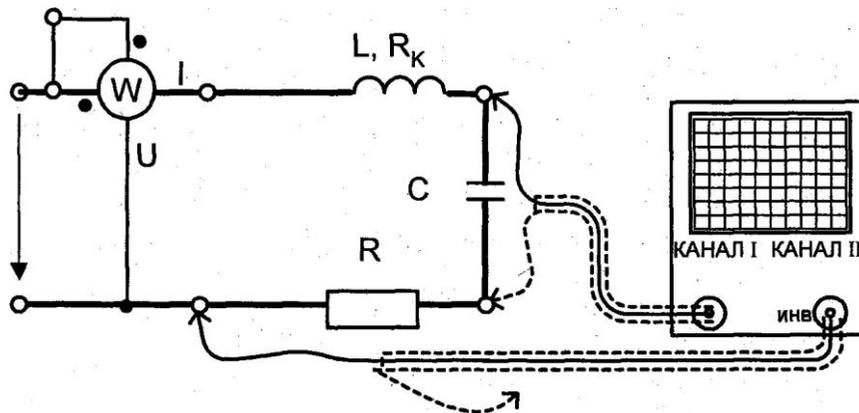


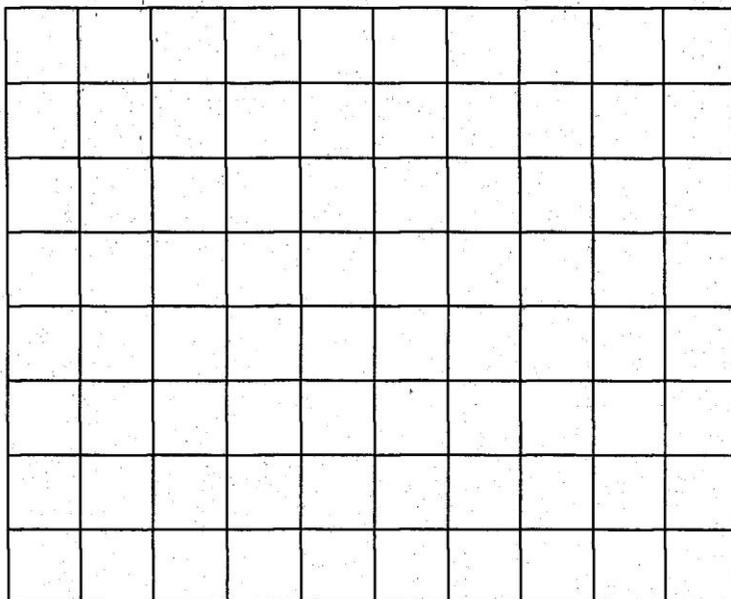
Рис.9.1

- Сравните результаты расчёта и эксперимента и сделайте выводы.

Таблица 9.1

	$I, \text{ мА}$	$U_c, \text{ В}$	$P, \text{ мВт}$
Расчётные значения			

Расчётные графики



**Масштабы**

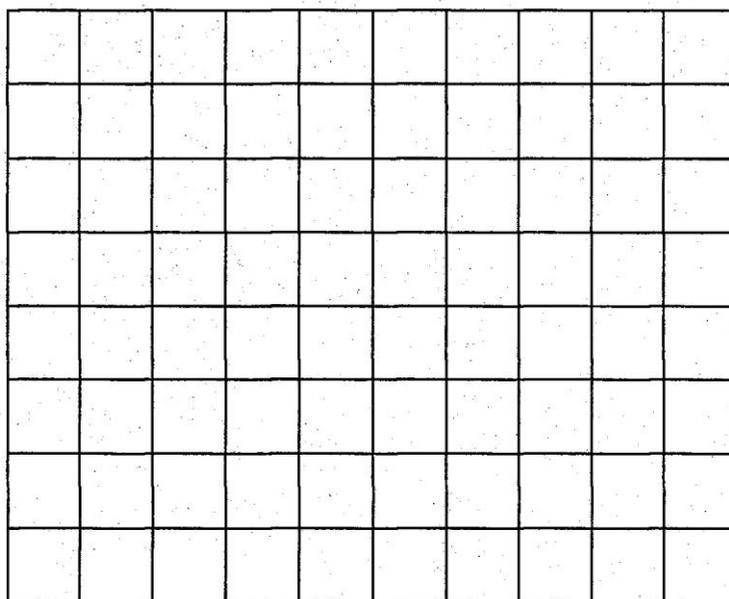
По напряжению:  
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По току:  
 $m_I = \dots\dots\dots \text{мА/дел.}$

По времени:  
 $m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел.}$

Рис.9.2

Экспериментальные графики



**Масштабы**

По каналу I:  
 $m_U = \dots\dots\dots \text{В/дел.}$

По каналу II:  
 $m_I = m_U / R = \dots\dots\dots \text{мА/дел.}$

По времени:  
 $m_t = \dots\dots\dots \text{мс/дел.}$

Рис. 9.4

## 10. Переходные процессы в линейных электрических цепях

### 10.1. Переходный процесс в цепи с конденсатором и резисторами

#### 10.1.1 Общие сведения

Цепь с одним конденсатором и сопротивлениями описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому свободная составляющая тока или напряжения в любой ветви имеет одно слагаемое вида  $Ae^{pt}$ , где  $p$  - корень характеристического уравнения, а  $A$  - постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение может быть составлено в виде:

$$Z(p) = 0 \text{ или } Y(p) = 0,$$

где  $Z(p)$  и  $Y(p)$  - входные операторные сопротивление и проводимость. Они могут быть получены заменой в выражениях комплексного сопротивления или проводимости цепи аргумента  $j\omega$  на оператор  $p$ .

Постоянные интегрирования  $A$  для каждого тока или напряжения определяется из начальных условий. Для определения постоянной  $A$  необходимо знать значение искомой функции в первый момент времени после коммутации (при  $t = +0$ ).

Начальное значение напряжения на конденсаторе определяется из первого закона коммутации:  $u_C(+0) = u_C(-0)$ . В свою очередь  $u_C(-0)$  определяется из расчёта цепи до коммутации. Начальные значения других величин (токов и напряжений, которые могут изменяться скачком) рассчитываются по закону Ома и законам Кирхгофа в момент времени  $t = +0$ .

Таким образом, все токи и напряжения в переходном режиме изменяются по экспоненциальному закону с одной и той же постоянной времени ( $\tau = 1/|p|$ ) от начального значения до установившегося. Причём, начальное значение напряжения на конденсаторе равно напряжению на нём непосредственно перед коммутацией, т. е. скачком не меняется.

В данной работе коммутация (включение и выключение) осуществляется транзистором, на базу которого подаются отпирающие импульсы тока от источника синусоидального напряжения с частотой 50 Гц. В результате оба переходных процесса периодически повторяются и их можно наблюдать на осциллографе.

#### 10.1.2. Экспериментальная часть

##### Задание

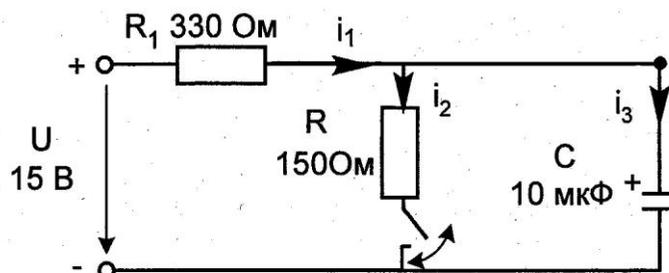


Рис. 10.1.1

Рассчитайте докоммутационные ( $t = -0$ ), начальные ( $t = +0$ ) и установившиеся ( $t \rightarrow \infty$ ) значения токов и напряжения на конденсаторе в цепи (рис. 10.1.1) в двух случаях: **I. -ключ**

закрывается; 2. - ключ размыкается. В каждом из этих случаев определите постоянную времени цепи, снимите осциллограммы рассчитанных величин и убедитесь, что все токи и напряжение на конденсаторе изменяются с одной постоянной времени, а напряжение на конденсаторе не имеет скачков.

### Порядок выполнения работы

- При включении ключа в цепи (рис. 10.1.1) рассчитайте токи и напряжение на конденсаторе до коммутации ( $t = - 0$ , ключ разомкнут), в первый момент после коммутации ( $t = + 0$ , ключ замкнут) и в новом установившемся режиме ( $t \rightarrow \infty$ ). Результаты расчёта занесите в табл. 10.1.1.
- Повторите расчёт при размыкании ключа. Результаты занесите в табл. 10.1.2.
- Составьте характеристическое уравнение, определите корень  $p$  и постоянную времени  $\tau = 1/|p|$  для первого и для второго случаев, занесите результаты в табл. 10.1.1 и 10.1.2.
- Соберите цепь согласно схеме (рис. 10.1.2). Обратите внимание на полярность электролитического конденсатора.
- Включите осциллограф, установите развёртку 2 мС/дел, отрегулируйте усиление, используя ступенчатые переключатели каналов осциллографа, и перерисуйте изображения тока и напряжения на график (рис. 10.1.3). Не забудьте указать масштаб для каждой кривой.
- Определите по графику или непосредственно по осциллографу докоммутационные ( $t = - 0$ ) начальные ( $t = + 0$ ) и установившиеся ( $t \rightarrow \infty$ ) значения тока и напряжения на конденсаторе в двух случаях: 1. - *ключ замыкается*; 2. - *ключ размыкается*. Занесите их также в табл. 10.1.1 и 10.1.2 и сравните с расчётными значениями.
- Отключите один из каналов осциллографа, а другой переключите на резистор второй ветви. Определите по осциллограмме начальные и установившиеся значения токов при включении и выключении и запишите их в табл. 10.1.1 и 10.1.2. Прделайте то же самое для первой ветви. Сравните результаты с расчётом.

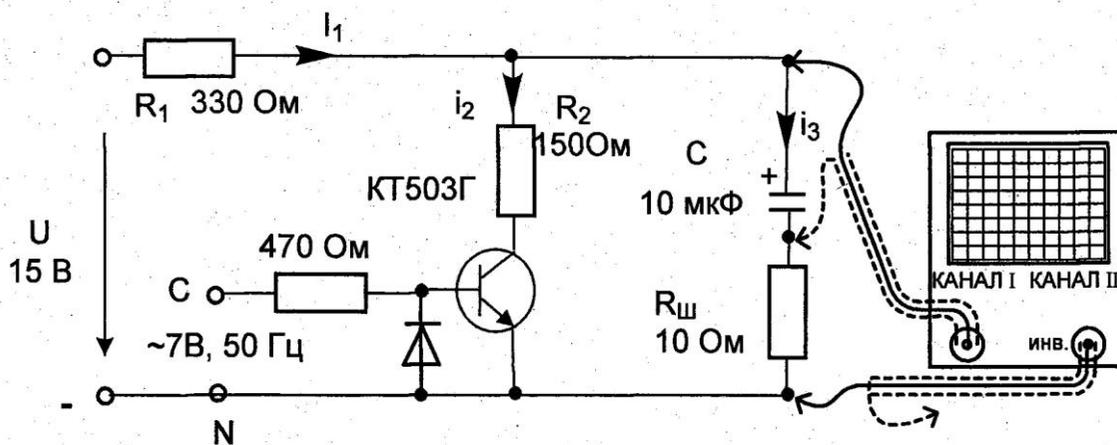


Рис.

- Определите по графикам постоянные времени при замыкании и размыкании ключа. Сравните их с расчётными значениями и занесите в табл. 10.1.1 и 10.1.2.
- Проанализируйте результаты и сделайте выводы.

**1. - ключ замыкается**

Таблица 10.1.1

$t$	$u_C, B$	$I_1, mA$	$I_2, mA$	$I_3, mA$	$\tau, мС$
- 0, расчёт					Расчёт: $\tau =$ мС Эксперимент: $\tau =$ мС
- 0, эксперимент					
+ 0, расчёт					
+ 0, эксперимент					
$\infty$ , расчёт					
$\infty$ , эксперимент					

**2. - ключ размыкается**

Таблица 10.1.1

$t$	$u_C, B$	$I_1, mA$	$I_2, mA$	$I_3, mA$	$\tau, мС$
- 0, расчёт					Расчёт: $\tau =$ мС Эксперимент: $\tau =$ мС
- 0, эксперимент					
+ 0, расчёт					
+ 0, эксперимент					
$\infty$ , расчёт					
$\infty$ , эксперимент					


**Масштабы**

По каналу I:

$m_U = \dots\dots\dots B/\text{дел.}$

По каналу II:

$m_I = m_U / R_{ш} = \dots\dots\dots mA/\text{дел.}$

По времени:

$m_t = \dots\dots\dots мс/\text{дел.}$

Рис.10.1.3

## 10.2. Процессы включения и отключения цепи с катушкой индуктивности

### 10.2.1 Общие сведения

Цепь с одной катушкой индуктивности, так же как и цепь с одним конденсатором описывается дифференциальным уравнением первого порядка. Поэтому все токи и напряжения в переходном режиме изменяются по экспоненциальному закону с одной и той же постоянной времени ( $\tau = 1/|p|$ ) от начального значения до установившегося.

Причём, начальное значение тока в индуктивности равно току в ней непосредственно перед коммутацией, так как ток в катушке не может изменяться скачком по закону коммутации. Напряжение на катушке может изменяться скачком и при отключении может достигать весьма больших значений.

В данной работе коммутация (включение и выключение цепи) осуществляется транзистором, на базу которого подаются прямоугольные отпирающие импульсы тока от генератора напряжений специальной формы с частотой 200 Гц. Поэтому оба переходных процесса периодически повторяются и их можно наблюдать на осциллографе.

### 10.2.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Вывести на дисплей осциллографа кривые тока и напряжения на катушке индуктивности при подключении и отключении источника постоянного напряжения. В каждом из этих случаев определить экспериментально и рассчитать докоммутационные ( $t = - 0$ ), начальные ( $t = + 0$ ) и установившиеся ( $t \rightarrow \infty$ ) значения тока и напряжения на катушке, определить по осциллограмме постоянную времени цепи

#### Экспериментальная часть

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 10.2.1). В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор). Установите частоту, форму и амплитуду сигнала генератора напряжений специальной формы.
- Включите осциллограф, установите развёртку 0,5 мС/дел, отрегулируйте усиление и перерисуйте изображение тока и напряжения на катушке на график (рис. 10.2.2). Не забудьте указать масштаб для каждой кривой.
- Определите по графику или непосредственно по осциллографу докоммутационные ( $t = - 0$ ) начальные ( $t = + 0$ ) и установившиеся ( $t \rightarrow \infty$ ) значения токов и напряжений на катушке в двух случаях: **1. - ключ замыкается; 2. - ключ размыкается.** Занесите их в табл. 10.2.1.

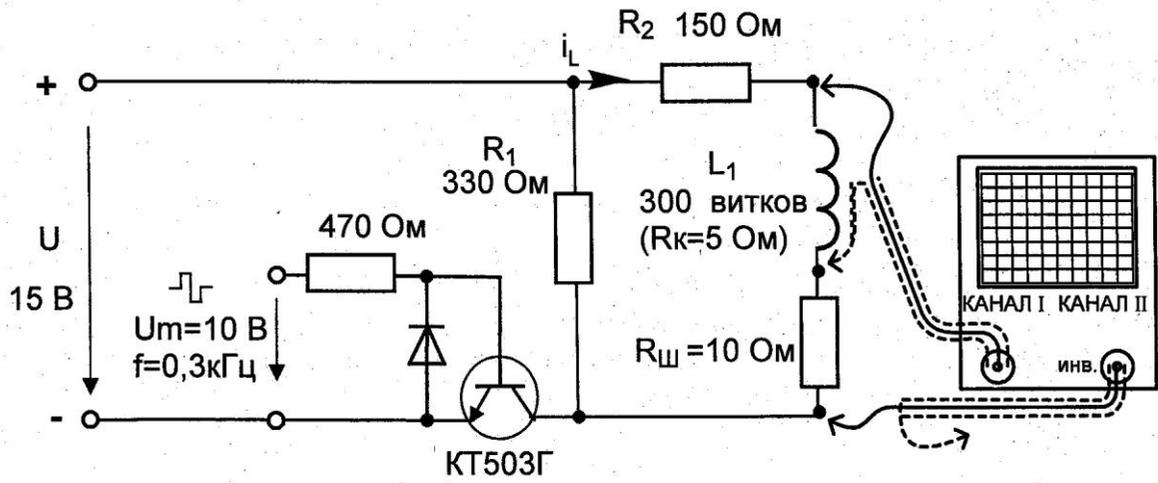
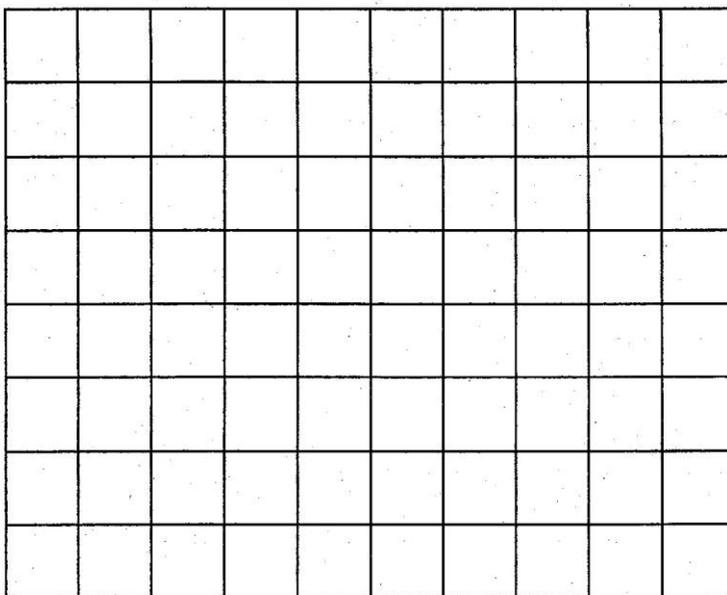


Рис. 10.2.1

- Рассчитайте токи и напряжения на катушке для этих же моментов времени, занесите результаты также в табл. 10.2.1. Сравните результаты расчёта и эксперимента.
- Определите по осциллограммам постоянные времени при включенном и при отключенном источнике питания.

Таблица 10.2.1

t	Включение, $\tau =$ мС		Выключение, $\tau =$ мС	
	$u_L, B$	$i_L, mA$	$u_L, B$	$i_L, mA$
- 0, расчёт				
- 0, эксперимент				
+ 0, расчёт				
+ 0, эксперимент				
$\infty$ , расчёт				
$\infty$ , эксперимент				



**Масштабы**

По каналу I:

$m_U = \dots \text{В/дел.}$

По каналу II:

$m_I = m_U / R_{ш} = \dots \text{мА/дел.}$

По времени:

$m_t = \dots \text{мс/дел.}$

Рис.10.2.2

### 10.3. Затухающие синусоидальные колебания в R-L-C контуре

#### 10.3.1. Общие сведения

В замкнутом контуре (рис. 10.3.1) после отключения его от источника постоянного или переменного напряжения могут возникнуть затухающие синусоидальные колебания, обусловленные начальным запасом энергии в электрическом поле конденсатора и в магнитном поле катушки индуктивности.

В общем случае состояние цепи определяется из дифференциального уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + u_C = 0.$$

Поскольку  $i = C du_C/dt$ , то

$$RC \frac{du_C}{dt} + LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = 0,$$

или

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = 0.$$

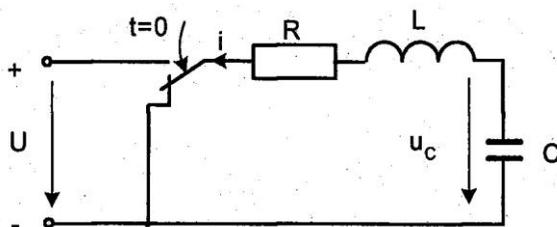


Рис. 10.3.1.

Вид решения этого дифференциального уравнения зависит от характера корней характеристического уравнения:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0.$$

Корни этого уравнения:

$$p_{12} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Когда  $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC} > 0$ , т.е.  $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} = R_{кр}$ , корни вещественные отрицательные и процесс изменения тока и напряжений имеет аperiodический затухающий характер (рис. 10.3.2а). Если же  $R < R_{кр}$  то возникает колебательный процесс (рис. 10.3.2б). Тогда решение дифференциального уравнения можно преобразовать к виду:

$$u_C = \frac{u_0}{\sin \psi} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \psi); \quad i = \frac{u_0}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t,$$

где

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

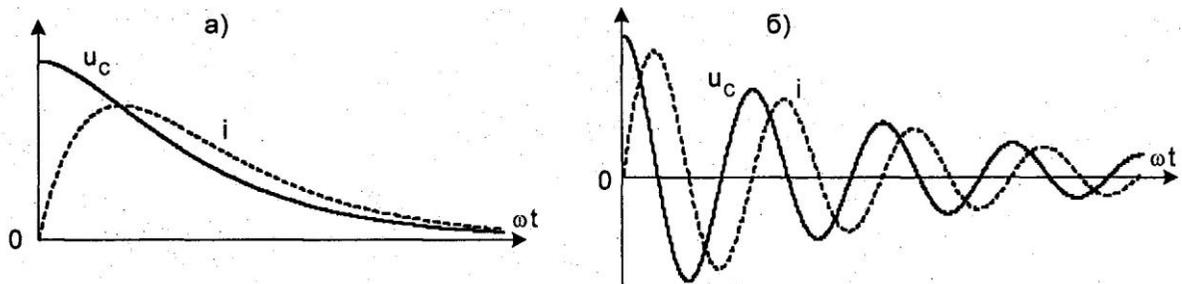


Рис. 10.3.2.

При уменьшении сопротивления от некоторого значения большего, чем  $R_{кр}$  сначала увеличивается скорость затухающего аperiodического процесса, затем, при  $R=R_{кр}$  качественно изменяется характер процесса - он становится колебательным - и при дальнейшем уменьшении сопротивления увеличивается частота колебаний и уменьшается затухание. При  $R$ , стремящемся к нулю, частота стремится к резонансной частоте  $\omega_0=1/\sqrt{LC}$ , а затухание  $\delta$  - к нулю.

В данной работе заряд конденсатора до напряжения  $u_0$  осуществляется однополярными прямоугольными импульсами напряжения и исследуется процесс его разряда на сопротивление и индуктивность во время пауз между импульсами. Повторяющийся процесс заряда и разряда конденсатора можно наблюдать на электронном или виртуальном осциллографе.

### 10.3.2. Экспериментальная часть

#### Задание

Исследовать влияние активного сопротивления на характер процесса разряда конденсатора на сопротивление и индуктивность. Сравнить экспериментальные частоту и затухание колебаний с расчётными значениями.

#### Порядок выполнения работы

- Измерьте омметром и запишите активное сопротивление катушки индуктивности, указанной на схеме (рис.10.3.3):

$R_{к} =$  Ом.

- Вычислите резонансную частоту и критическое сопротивление колебательного контура:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \quad \text{Гц};$$

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = \quad \text{Ом};$$

• Соберите цепь согласно схеме (рис. 10.3.3), выведите подстроенный резистор  $R_{доб}$  на ноль и установите на источнике напряжения однополярные прямоугольные импульсы частотой 200 Гц максимальной амплитуды.

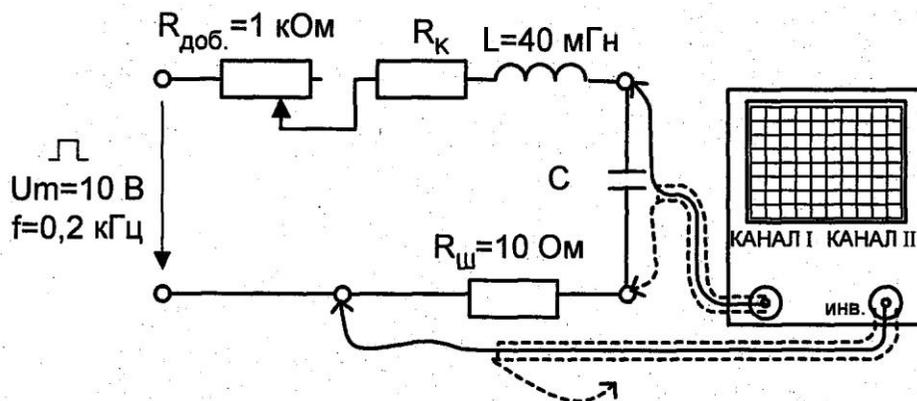


Рис. 6.10.3.

Настройте осциллограф для наблюдения кривых  $U_c(t)$  и  $i(t)$ . Определите по осциллографу период затухающих колебаний и вычислите частоту:

$T =$  мс,  $f =$  Гц.

Убедитесь, что полученное значение частоты близко к резонансной частоте.

• Плавно увеличивая добавочное сопротивление  $R_{доб}$ , убедитесь, что частота колебаний слегка уменьшается, а затухание увеличивается и при большом сопротивлении процесс становится апериодическим.

• Установите регулятор потенциометра в положение, при котором процесс меняет характер, отключите питание и измерьте омметром добавочное сопротивление:

$R_{доб} =$  Ом.

• Вычислите суммарное активное сопротивление колебательного контура:

$R_{ш} + R_{доб} + R_{к} =$  Ом

Убедитесь, что эта сумма близка к  $R_{кр}$ .

## Литература

1. Теоретические основы электротехники, Т 1,2, 3. Учебник для вузов / К.С. Демирчан, Л.Р.Нейман, Н.В. Коровин, В.Л.Чечурин. - СПб: Питер, 2004
2. Основы теории цепей. Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, СВ. Страхов. -М.: Энергоатом издат, 1989.
3. Атабеков Г.И. Основы теории цепей, Учебник для вузов. М.: Энергия, 1969.
1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. - М.: Гардарики, 2000.
4. Герасимов В.Г., Кузнецов Э.В., Николаева О.В. и др. Электротехника и электроника: В 3 кн. Учебник для студентов неэлектротехнических специальностей вузов. Кн 1. Электрические и магнитные цепи. - М.: Энергоатомиздат, 1996.
5. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н. Электротехника / Учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Матерников В.Е. Электротехника. Учебное пособие для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: [Учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов]: В 2 кн. - М.: Энергоатомиздат, 1995.