

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С.В. Гайдук, С.А. Абейдулин

**СБОРНИК
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ
ПО КУРСУ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
на лабораторном оборудовании ГАЛСЕН**

Учебно-методическое пособие

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.3.01(075.8)
ББК 31.21
Г142

Р е ц е н з е н т:

А.В. Углов - канд. техн. наук, доцент кафедры
«Электроэнергетические системы атомных станций»

Гайдук С.В.

Г142 Сборник лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники» на лабораторном оборудовании ГАЛСЕН : учебно-методическое пособие / С.В. Гайдук, С.А. Абейдулин ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Севастопольский государственный университет. – Севастополь: СевГУ, 2021. - 100 с.: ил.-Текст : электронный.

Сборник лабораторных работ предназначен для студентов очной и заочной форм обучения. Учебно-методическое пособие соответствует программе подготовки бакалавров по направлению: 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника.

УДК 621.3.01(075.8)
ББК 31.21

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры «Электроэнергетические системы атомных станций» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», протокол № 7/21 от 17 марта 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Методические указания по проведению лабораторных работ.....	4
2. Основные правила техники безопасности.....	6
3. Комплект типового лабораторного оборудования ГАЛСЕН.....	7
4. Лабораторные работы.....	21
1) Лабораторная работа № 1.....	21
2) Лабораторная работа № 2	26
3) Лабораторная работа № 3	35
4) Лабораторная работа № 4	44
5) Лабораторная работа № 5	47
6) Лабораторная работа № 6	53
7) Лабораторная работа № 7	59
8) Лабораторная работа № 8	64
9) Лабораторная работа № 9	72
10) Лабораторная работа № 10	79
11) Лабораторная работа № 11	83
12) Лабораторная работа № 12	88
13) Лабораторная работа № 13	92
14) Лабораторная работа № 14	97
5. Библиографический список.....	100

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При проведении лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники» перед обучающимися ставятся следующие задачи:

1. Научиться собирать электрические схемы соединений элементов R , L , C , защитно-коммутационных аппаратов, регулирующих устройств, трансформаторов, измерительных приборов и т.д.

2. Углубить знания физических процессов, протекающих в электрических и магнитных цепях в стационарных и переходных режимах.

3. Изучить рабочие свойства основных элементов электрических и магнитных цепей.

4. Получить навыки по проведению измерений в электрических и магнитных цепях.

В электротехнической лаборатории для выполнения лабораторных работ студенты разбиваются на отдельные группы. Каждая группа в соответствии с программой работы проводит исследование электрической или магнитной цепи. Чтобы добиться качественного и организованного проведения лабораторных исследований, каждый студент должен хорошо к ней подготовиться. Эта подготовка заключается в следующем:

- ознакомлении с целью и программой работы;
- повторении теоретического материала;
- продумывании последовательности выполнения работы с учетом «Методических указаний»;
- подготовке бланка отчёта к работе.

Подготовленность студента проверяется руководителем (преподавателем) занятия путем устного опроса в течение 10 – 15 минут перед началом занятия. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются, по указанию руководителя приступают к изучению необходимого материала и подвергаются дополнительной проверке. Если студент не успевает выполнить весь объем работы в плановые часы, то обязан сделать это в часы самостоятельных занятий под руководством инженера.

Получив разрешение на работу, обучающиеся должны, прежде всего, ознакомиться с используемыми в лабораторной работе элементами схемы, а также проверить соответствие электроизмерительных приборов ожидаемым значениям измеряемых величин и записать их номинальные данные. После этого можно приступить к сборке схемы. Сборка схемы (как и вычерчивание ее на бланке отчета) выполняется в такой последовательности: сначала собирается главная цепь, то есть та, по ветвям которой проходит основной ток (трансформаторы, реостаты, катушки индуктивности, конденсаторы, амперметры, токовые обмотки ваттметров, фазометров и др.), а затем – вспомогательные цепи, сигнализации, управления, вольтметры, обмотки напряжения ваттметров, фазометров и др.). При этом необходимо таким образом расположить элементы схемы, подобрать и надежно закрепить

проводники требуемой длины и сечения, чтобы можно было легко проверить схему соединений и удобно выполнить работу. Схема после сборки должна быть тщательно проверена обучающимися и инженером. Затем следует приступить к выполнению программы работы в порядке и в соответствии с указаниями, изложенными в настоящем пособии. Каждая группа студентов при выполнении работы ведет протокол наблюдений. Особое внимание следует обратить на осмысленное, а не механическое выполнение каждой операции, стремиться понять физическую сущность происходящих в электрических цепях явлений. После выполнения задания, обучающиеся предъявляют результаты работы преподавателю. Затем приступают к оформлению отчетов.

При выполнении графической части отчета необходимо соблюдать следующие правила:

1. Выполняя построение графика функциональной зависимости между двумя переменными, значение аргумента откладывать на оси абсцисс, а значение функции – на оси ординат.

2. Масштабы для аргумента и функции выбирать так, чтобы в 1 см содержалось 1, 2, 5, 10 единиц или кратные этим цифрам значения.

3. На координатных осях наносить только шкалы, соответствующие выбранным масштабам. При этом буквенные обозначения величин должны быть нанесены у концов осей: аргумента – выше оси абсцисс, а функции – правее оси ординат. Числовые значения величин соответственно – ниже оси абсцисс и левее оси ординат. Если совмещаются зависимости нескольких функций от одного аргумента, то параллельно оси ординат наносится соответствующее число масштабных линий.

4. Опытные данные наносить на график в виде отчетливых точек, кружков или звездочек (для каждой кривой свои обозначения). По точкам и между точками с помощью лекал проводится плавная кривая или прямая, выражающая функциональную зависимость; не лежащие на этой линии точки чаще всего свидетельствуют о погрешности измерения, наблюдения или расчета.

5. Размер графиков не должен быть меньше $10 \times 10 \text{ см}^2$. При необходимости в бланк отчета можно клеивать дополнительные листы с графиками.

В выводах по работе необходимо сделать конкретный анализ полученных результатов по каждому пункту программы. При этом следует указать, какие явления или процессы наблюдались и каковы причины их возникновения, охарактеризовать измерительную технику, отметить особые свойства элементов схемы, дать оценку их эксплуатационным качествам. Оформленный отчет должен быть подписан студентами и сдан преподавателю в конце данного занятия (или в другой срок, указанный преподавателем). Студенты, по каким-либо причинам не выполнившие задания, обязаны выполнить лабораторную работу в часы самостоятельных занятий в срок, указанный преподавателем.

2. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Непосредственной причиной поражения человека при электротравме является электрический ток. Степень физиологического воздействия электрического тока определяется в основном его величиной, частотой, длительностью протекания и зависит от пути тока через тело человека. Наиболее вероятные пути тока: «рука-рука», «рука-ноги», «нога-нога». При этом сопротивление тела на пути тока колеблется в широких пределах и зависит от многих факторов, в том числе от влажности и чистоты кожи, от общего состояния человека, от величины поверхности соприкосновения и плотности контакта и пр.

Принято считать, что сопротивление тела человека в среднем равняется 1 000 Ом. В качестве допустимого безопасного синусоидального тока промышленной частоты 50 Гц при длительном воздействии принимается величина 30 мА.

В лаборатории напряжение сети имеет величину до 380 В, оно является безусловно опасным для жизни, а при определенных условиях может оказаться смертельным. Поэтому при выполнении лабораторных работ студенты обязаны строжайшим образом выполнять следующие правила техники безопасности:

1. Запрещается включать схему под напряжение без разрешения преподавателя или лаборанта.
2. При включении схемы под напряжение убедиться, что никто не касается токоведущих элементов схемы, и предупредить находящихся вблизи командой «ВКЛЮЧАЮ!».
3. Нельзя касаться руками голых токоведущих частей (оголенных проводов и контактов), обмоток проволочных реостатов и т.д.), когда цепь находится под напряжением.
4. Категорически запрещается делать какое бы то ни было переключение или изменение в схеме, когда она находится под напряжением.
5. Включение цепи, переключения проводов и выключателей, перемещение движков реостатов производить одной рукой, не касаясь другой металлических и плохо изолированных частей.
6. При возникновении каких-либо ненормальностей в лабораторной установке, а также при исчезновении напряжения немедленно отключить схему и доложить преподавателю или лаборанту.
7. Категорически запрещается производить какие-либо включения, и переключения на щитках и установках, не входящих в комплект оборудования выполняемой лабораторной работы.
8. На рабочем месте не должно быть никаких посторонних предметов.

Обучающиеся, изучившие правила техники безопасности, расписываются в специальном журнале у инженера лаборатории и только после этого допускаются к выполнению лабораторных работ.

При попадании человека под напряжение необходимо:

- если пострадавший находится в сознании, обеспечить ему покой;

- вызвать врача;
- при отсутствии у пострадавшего сознания, но при сохранившемся дыхании создать приток свежего воздуха, дать ему понюхать нашатырный спирт, обрызгать водой;
- при отсутствии у пострадавшего сознания, дыхания и пульса **НЕМЕДЛЕННО** начать делать искусственное дыхание и непрямой массаж сердца и продолжать их непрерывно до прибытия врача.

3. КОМПЛЕКТ ТИПОВОГО ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГАЛСЕН

Общая компоновка компьютеризованного комплекта оборудования показана на рис. 1. На лабораторном столе закреплена рама, в которой устанавливаются блок генераторов с наборным полем, блок мультиметров, модель однородной длинной линии, коннектор и блок однофазного источника питания. Расположение блоков в раме жёстко не фиксировано. Оно может изменяться для удобства проведения того или иного конкретного эксперимента. Компьютер, дисплей и клавиатура расположены на отдельном столе. Однофазный источник питается от трёхпроводной однофазной сети (фаза, ноль и земля). В нём смонтированы устройство защитного отключения при нарушении изоляции, автомат для защиты от сверхтоков и блок розеток и разъёмов (на тыльной стороне блока) для подключения всех остальных блоков и осциллографа.

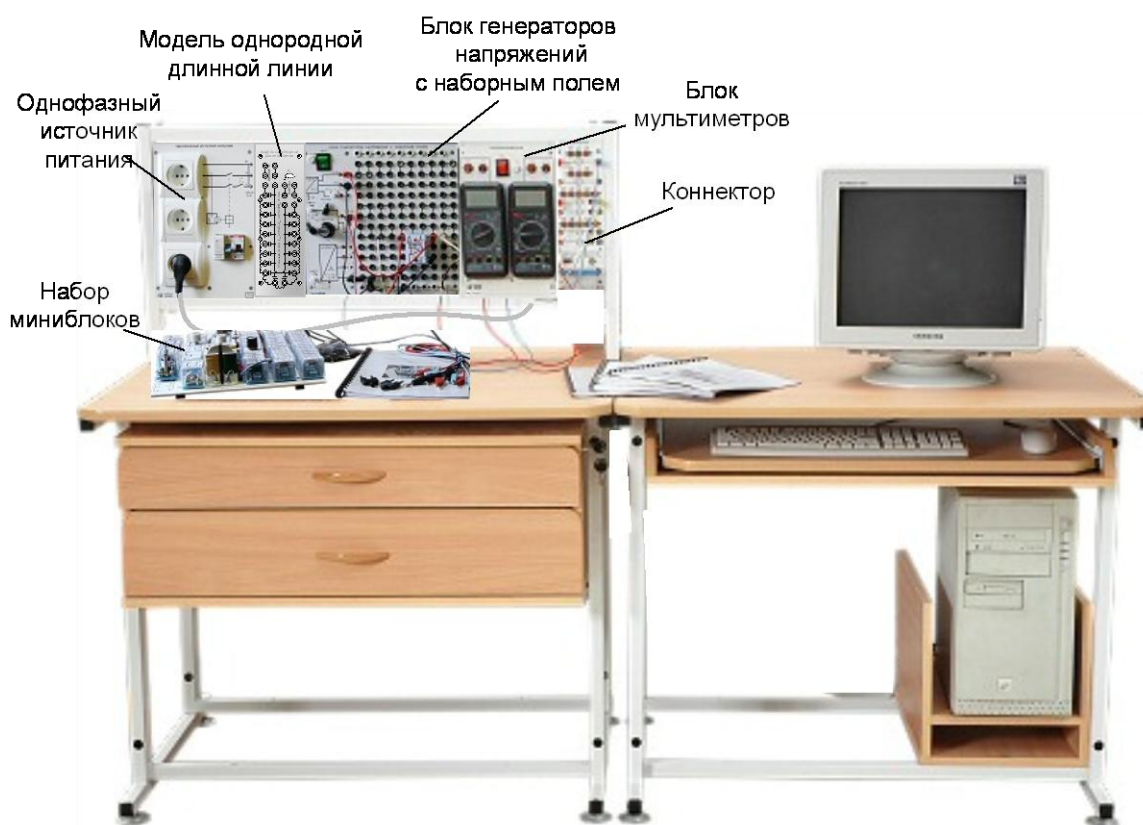


Рис. 1

В выдвижных ящиках стола хранятся набор миниблоков, соединительные провода, перемычки и шнуры питания, методические материалы. Ящики имеют встроенные замки.

Блок генераторов напряжений.

Блок генераторов напряжений (БГН) предназначен для формирования однофазных сигналов различной формы, регулируемых по амплитуде и частоте, формирования трёхфазного напряжения и постоянных напряжений для питания исследуемых схем.

Общий вид блока генераторов напряжений и наборной панели показан на рис. 2. Все источники напряжений включаются и выключаются общим выключателем «СЕТЬ» и защищены от внутренних коротких замыканий плавким предохранителем с номинальным током 0,5 А.

Синусоидальное, прямоугольное или импульсное напряжения на выходе генератора задается переключателем «ФОРМА». Амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «АМПЛИТУДА» в пределах от 0 до 12 В. Диапазон регулирования частоты генератора напряжений специальной формы - от 0,2 Гц до 200 кГц. Частота устанавливается ручкой энкодера-потенциометра. При горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода, частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра.

Генератор постоянных напряжений предназначен для получения стабилизированных напряжений +15 В, -15 В и регулируемого напряжения от 0 до 13 В.

На лицевой панели блока указаны номинальные напряжения и токи каждого источника напряжения, а также диапазоны изменения регулируемых выходных величин. Все источники напряжений имеют общую точку, не соединённую с заземлённым корпусом блока. Подключение к этой точке осуществляется в гнезде «0». Источники защищены от перегрузок и внешних коротких замыканий самовосстанавливающимися предохранителями с номинальным током 0,2 А. О срабатывании предохранителя свидетельствует индикатор «I >».

Наборная панель (см. рис. 2) служит для расположения на ней миниблоков в соответствии со схемой данного опыта. В нижней части наборной панели показан фрагмент электрической цепи, собранной на наборном поле.

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 проводами и перемычками. Так на фрагменте цепи, показанной на рис. 2, напряжение от фазы С трёхфазного источника подводится с помощью перемычки 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.

Модель однородной длинной линии.

Модель однородной длинной линии представляет собой цепную схему из семнадцати симметричных одинаковых П-образных четырёхполюсников. Номинальные параметры звеньев указаны на лицевой панели: $L_{\text{звена}} = 0,16 \text{ мГн}$, $C_{\text{звена}} = 0,1 \text{ мкФ}$, $R_{\text{звена}} = 6,6 \text{ Ом}$. В начале цепной схемы и в конце её имеются дополнительные гнёзда для подключения амперметров, токоограничивающих резисторов, нагрузок. Для этой цели можно использовать также наборную панель.

Длина воздушной линии без потерь, соответствующая одному звену составляет 12 км, волновое сопротивление - 400 Ом, частота, при которой длина волны равна длине линии ($17 \times 12 \text{ км} = 204 \text{ км}$), равна 1470 Гц.

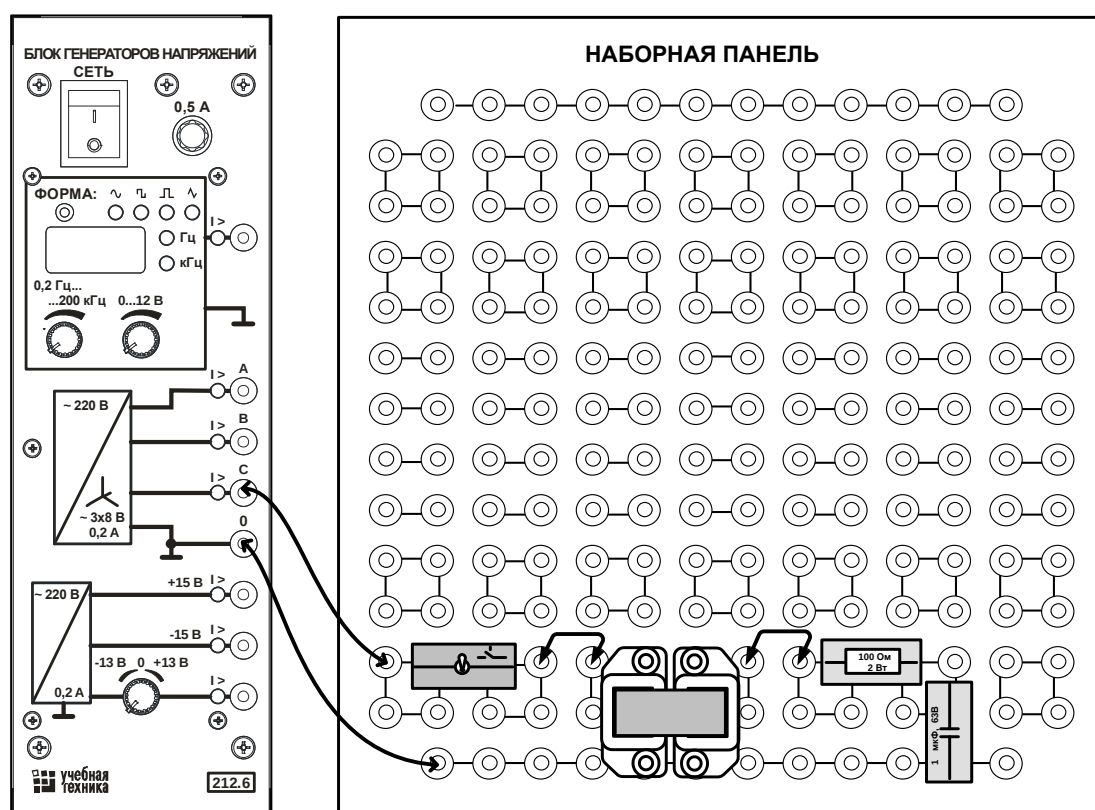


Рис. 2

Набор миниблоков 600.17.

Миниблоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы и т.п.), помещённые в прозрачные корпуса, имеющие штыри для соединения с гнёздами 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. Общий вид контейнера с миниблоками представлен на рис. 3.

В табл. 1 приведены характеристики одноэлементных миниблоков, а ниже дано описание более сложных миниблоков.

Т а б л и ц а 1

Наименование и характеристики	Наименование и характеристики
1. Резисторы МЛТ, 2 Вт, $\pm 5\%$: 2,2; 4,7; 10; 22; 33; 47; 100; 220; 330; 470 Ом. 1 кОм; 2,2 кОм; 47 кОм.	3. Потенциометр СП4-2М 1 кОм.
2. Конденсаторы К73-17 63...100 В: 0,22 мкФ; 0,47 мкФ; 1 мкФ; 4,4 мкФ (2 по 2,2 мкФ); SR-63 В, 10 мкФ; SR-63 В, 100 мкФ.	4. Лампа сигнальная СМН-10 55.
	5. Индуктивности: 33 мГн, 50 мА (09P333J); 100 мГн, 50 мА (3 шт. 9P333J).
	6. Стабилитрон КС456А, 5,6 В.
	7. Микропереключатель (тумблер).
	8. Транзистор КТ-503Г 150 мА, 60 В.
	9. Диоды КД 226(1N5408) 1А, 100 В.

10. Миниблоки **«Амперметр»** позволяют подключать амперметр в различные ветви исследуемой электрической цепи без разборки схемы. Эти миниблоки устанавливаются в наборную панель в тех местах схемы, где требуется измерять токи. В крышку миниблока встроено гнездо коаксиального разъёмного соединителя, а к амперметру подсоединяется кабель с соответствующим штырём.

11. Миниблок **«Фильтр обратного следования фаз»**. При подключении миниблока к симметричной трёхфазной системе напряжений прямого следования фаз напряжение на входе U_{mn} равно нулю. При подключении его к симметричной системе обратного следования $U_{mn} \cong 1,7U_{\text{л}}$. Предварительно нужно настроить сопротивления резистивных плеч так, чтобы выполнялись соотношения: $U_{Am} = 0,5U_{\text{л}}$ и $U_{Cn} = 0,5U_{\text{л}}$.

12 и 14. Миниблок **«Трансформатор»**. Трансформатор выполнен на разъёмном U-образном сердечнике из листовой электротехнической стали с толщиной листа 0,08 мм. Сечение сердечника 16×12 мм. На сердечнике установлены катушки 900 и 300 витков, и имеются две сменные катушки 300 и 100 витков. Катушки легко переставляются в ходе лабораторной работы. Номинальные параметры трансформаторов при частоте 50 Гц приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

W	$U_{\text{н}}$, В	$I_{\text{н}}$, мА	R, Ом	$S_{\text{н}}$, ВА
100	2,33	600	0,9	1,4
300	7	200	4,8	1,4
900	21	66,7	37	1,4

13. Миниблок **«Магнитная цепь»** (рис. 4) представляет собой трансформатор с регулируемым зазором в магнитопроводе. Магнитопровод выполнен из двух Ш-образных ферритовых сердечников марки М2000НМ. На среднем стержне магнитопровода расположены две одинаковые обмотки (намагничивающая и измерительная) по 200 витков каждая. Зазор может регулироваться винтом, один оборот которого изменяет зазор на 0,5 мм (шаг

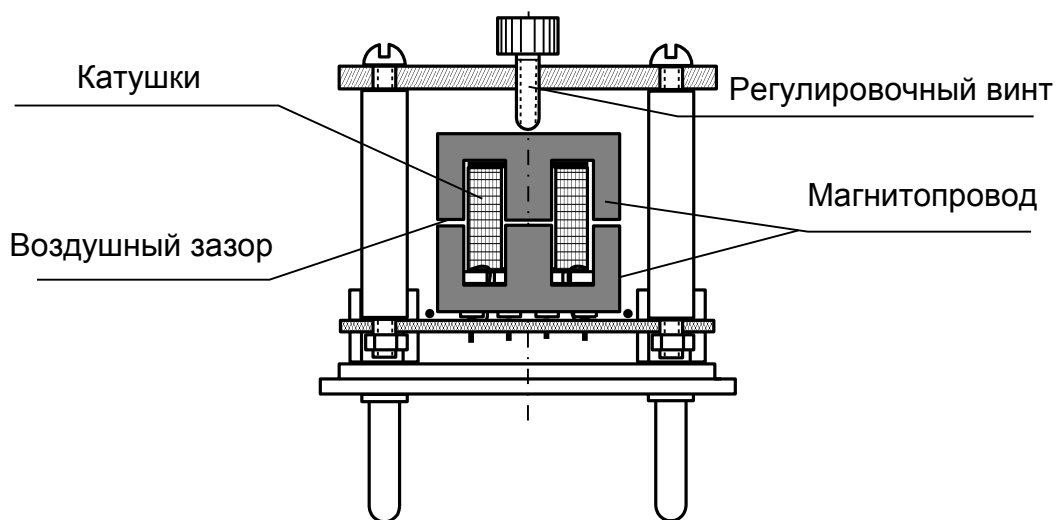


Рис. 4

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

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

Параметры $R_{вх}$ и C указаны на упрощенной принципиальной схеме интегратора (рис. 5).

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

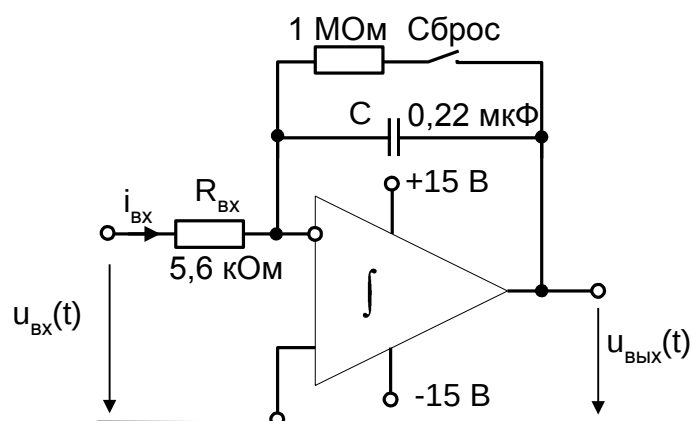


Рис. 5

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 $+15 \text{ В}$ или -15 В , включается светодиод «Перегрузка».

Блок мультиметров.

Блок мультиметров предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, а также для проверки диодов и транзисторов. Общий вид блока представлен на рис. 6. 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 защищён предохранителем 2 А, который не может перегореть от токов, создаваемых источниками данного стенда.

До подключения мультиметра к цепи необходимо выполнить следующие операции:

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

Присоединение мультиметра как вольтметра, амперметра и омметра показано на рис. 7.

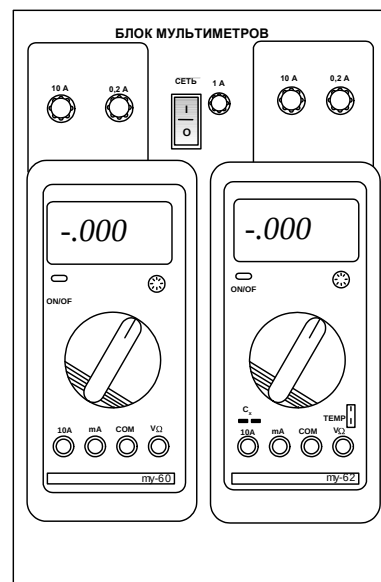


Рис. 6

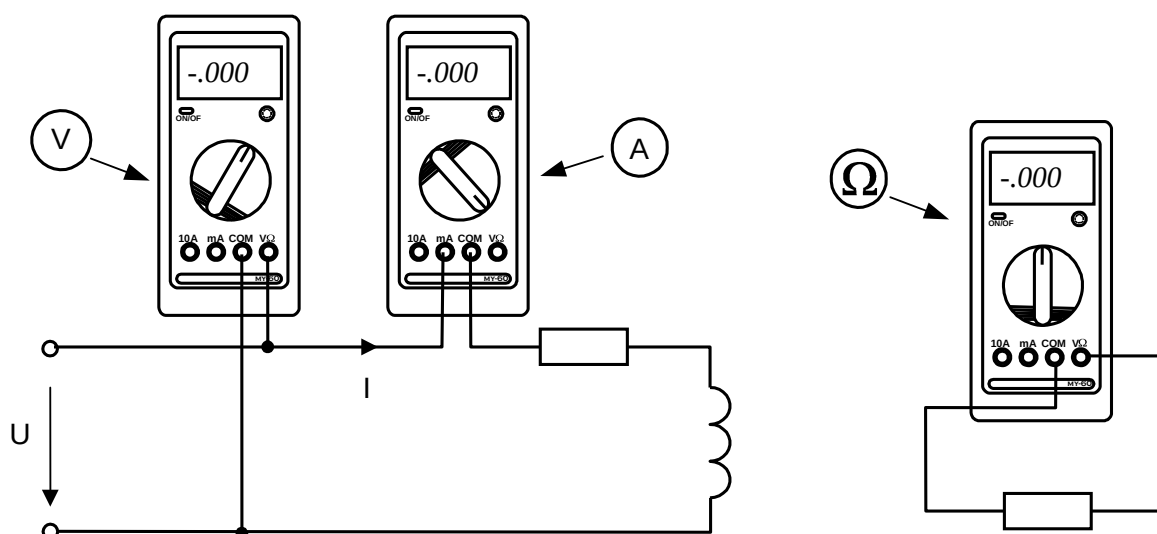


Рис. 7

Коннектор.

Коннектор входит только в компьютеризованный вариант комплекта и предназначен для ввода измеряемых токов и напряжений в компьютер для измерений с помощью программы «ВП ТОЭ». Он содержит делители напряжений для ввода напряжений, шунты для ввода токов, блоки гальванической развязки измеряемых сигналов, и разъем для подключения USB кабеля связи коннектора с компьютером. Общий вид лицевой панели коннектора показан на рис. 8.

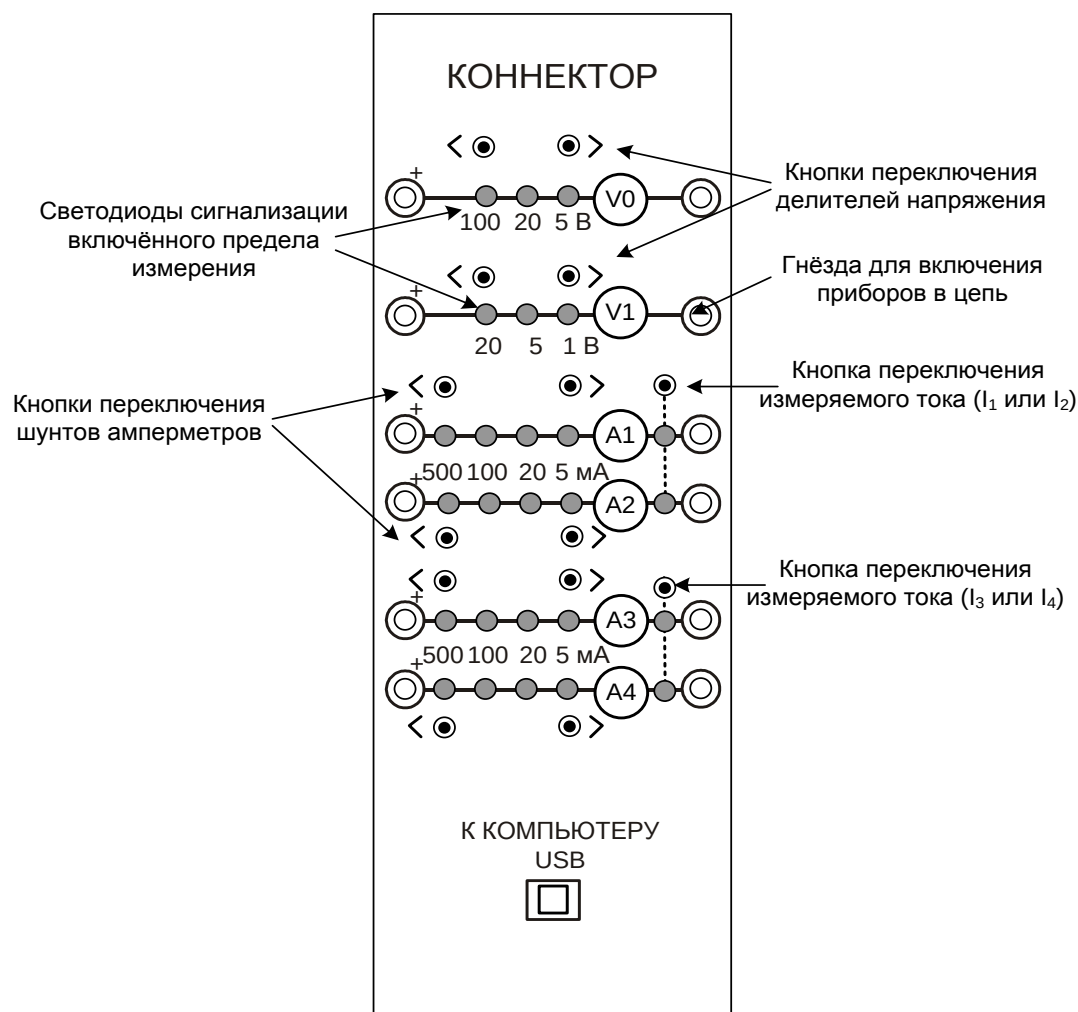


Рис. 8

Изображенные на лицевой панели измерительные приборы V0, V1, A1...A4 включаются в цепь как обычные вольтметры и амперметры. Коннектор имеет два канала для ввода напряжений в компьютер и два канала для ввода токов. Однако, в цепь можно включить четыре амперметра и кнопками переключения измеряемого тока выбирать вводимое в компьютер значение I_1 или I_2 , I_3 или I_4 . О выбранном токе сигнализирует светодиод на лицевой панели коннектора и надпись на виртуальном амперметре на экране дисплея.

Кнопки переключения делителей напряжения и шунтов предназначены для выбора пределов измерения, как в обычных измерительных приборах.

Порядок работы с виртуальными амперметрами и вольтметрами.

При работе с виртуальными приборами придерживайтесь следующего порядка.

- Соберите цепь согласно схеме опыта, включив в нее вместо реальных амперметров и вольтметров виртуальные приборы, изображенные на лицевой панели коннектора.
- Включите виртуальные приборы двойным щелчком левой кнопки мыши на ярлыке «ВП ТОЭ». В результате откроется блок «Приборы I» (рис. 9), в котором содержатся вольтметры и амперметры. Часть из них активизирована по умолчанию (т. е. включены пределы измерения).
- Расположение приборов в окне этого блока можно изменить, щелкнув левой кнопкой мыши на обозначении прибора и выбрав в открывшемся перечне

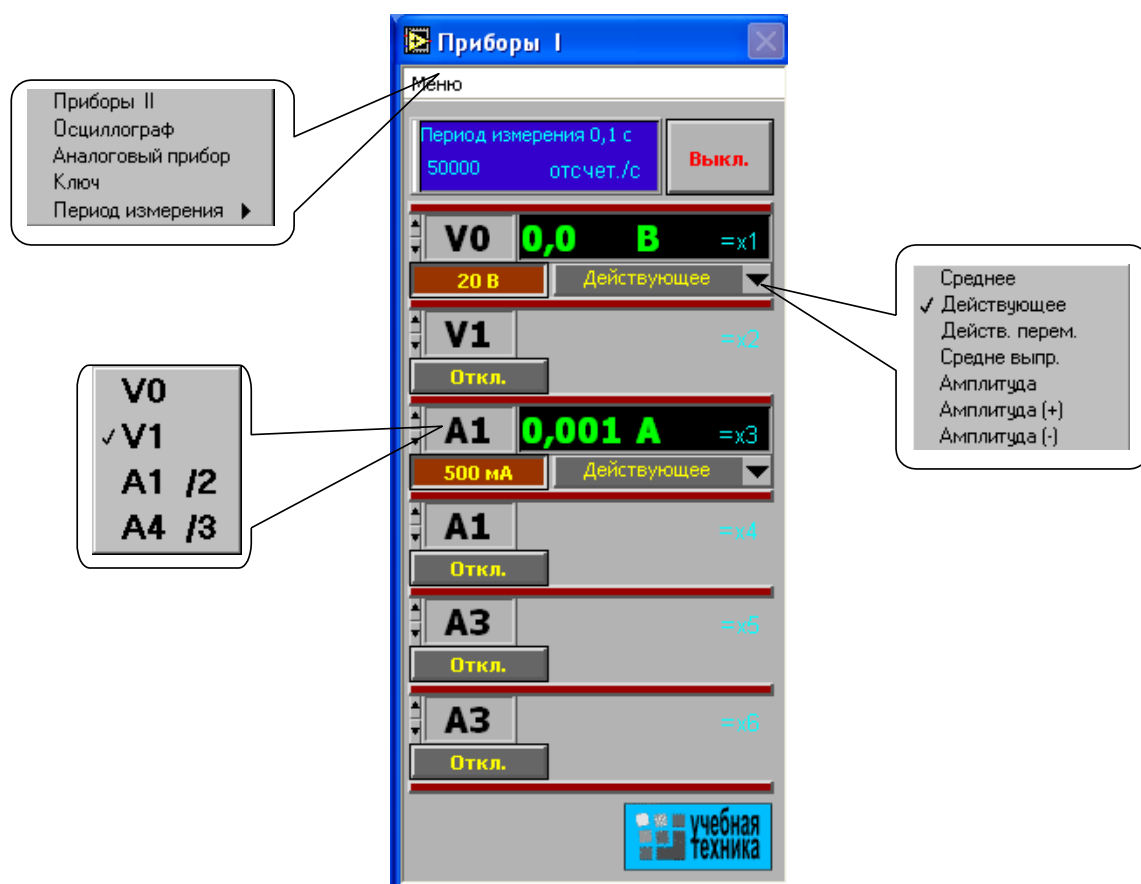


Рис. 9

нужный прибор. К одному и тому же каналу коннектора, таким образом, можно подключить несколько виртуальных приборов для одновременного измерения, например, действующего, амплитудного, среднего и др. значений одного и того же напряжения (тока).

- Активизируйте нужные виртуальные приборы, щелкнув в соответствующих окнах на кнопках «Откл». Для отключения прибора щелкните в окне предела измерения. Чем больше каналов задействовано в виртуальных измерениях тока и напряжения, тем ниже частота сканирования и меньше значений вводится в компьютер за период измерения. Период измерения, в течение

которого производится ввод данных в компьютер, по умолчанию равен 0,1 с. Его можно изменить, открыв меню, как показано на рис. 10 и выбрав мышью строку «Период измерения».

При выполнении измерений переменных напряжений и токов необходимо обращать внимание на число отсчётов в секунду, которое указано в верхней части панели «Приборы I». Необходимо, чтобы число отсчётов, приходящихся на один период измеряемого сигнала (не путать с периодом измерения!), было не менее десяти. При меньшем числе отсчётов резко возрастает погрешность измерений.

- Выберите род измеряемой величины, щелкнув в окне «Действующее» и выбрав из открывшегося списка нужное значение. (Для цепи постоянного тока это, скорее всего, «Среднее»). В этом окне пункт «Действ. перем.» означает действующее значение сигнала, из которого исключена постоянная составляющая.
- Выберите пределы измерения амперметров и вольтметров, нажав соответствующие кнопки на коннекторе (см. рис. 9). Выбранные пределы отображаются автоматически в соответствующих окнах виртуальных приборов. Когда измеряемый сигнал превышает допустимый для данного канала уровень, окно с показанием виртуального прибора начинает мигать красным цветом, а в верхней части панели включается надпись «Перегрузка! Перейдите на больший предел». Она гаснет, как только предел измерения становится больше измеряемой величины.
- При снижении измеряемой величины ниже значения следующего (более низкого) предела измерения включается надпись «Перейдите на меньший предел». Через некоторое время она гаснет самостоятельно, но окно данного виртуального прибора продолжает мигать, предупреждая о том, что данное измерение желательно сделать точнее.
- Для того, чтобы закрыть окно виртуальных приборов, необходимо щелкнуть по клавише «Выкл».

Измерение сопротивлений, мощностей и углов сдвига фаз с помощью виртуальных приборов.

Сначала включите блок «Приборы I». Затем для «включения» виртуальных ваттметров, омметров, фазометра и т.д. выберите из меню блока «Приборы I» позицию «Приборы II». При этом откроется блок с тремя приборами, которые вычисляют сопротивления, углы сдвига фаз мощности и т. д. по мгновенным значениям токов и напряжений, введенным в компьютер через коннектор. Первые два прибора этого блока имеют свое меню, из которого выбираются измеряемые величины (см. рис. 10).

Для активизации прибора достаточно выбрать в соответствующих окнах две величины, через которые определяется искомая величина. Например, если на входе цепи включен вольтметр V_0 и амперметр A_4 , то для измерения входных мощностей (P , Q , S), входных сопротивлений (R , X , Z), а также угла сдвига фаз между напряжением и током ($\varphi = \varphi_U - \varphi_I$), необходимо в верхнем окне прибора выбрать V_0 , а в нижнем A_4 . Для измерения угла сдвига фаз между токами I_1 и I_4 ($\varphi = \varphi_{I1} - \varphi_{I4}$) в верхнем окне должно быть A_1 , а в нижнем A_4 (но не

наоборот, иначе будет $\varphi_{14}-\varphi_{11}$). Для измерения частоты или периода необходимо указать только одну величину (в верхнем окне). Очевидно, что для цепи постоянного тока из перечисленных здесь величин имеет смысл измерять только активное сопротивление и активную мощность.

Третий (нижний) прибор в этом блоке производит вычисления по формуле, вводимой самим пользователем. Аргументами этой формулы могут быть 4 из 8 величин $x_1...x_8$ (не более!), измеряемых приборами первого и второго блоков. Обозначения $x_1...x_8$ имеются на рис. 9 и 10. Например, если измеряются две активные мощности – в верхнем окне мощность источника, а в нижнем нагрузки, то третий прибор можно запрограммировать на определение КПД. Для этого нужно ввести аргументы x_7 и x_8 , напечатать формулу $y = x_8/x_7$ и щелкнуть на клавише «Начать счет».

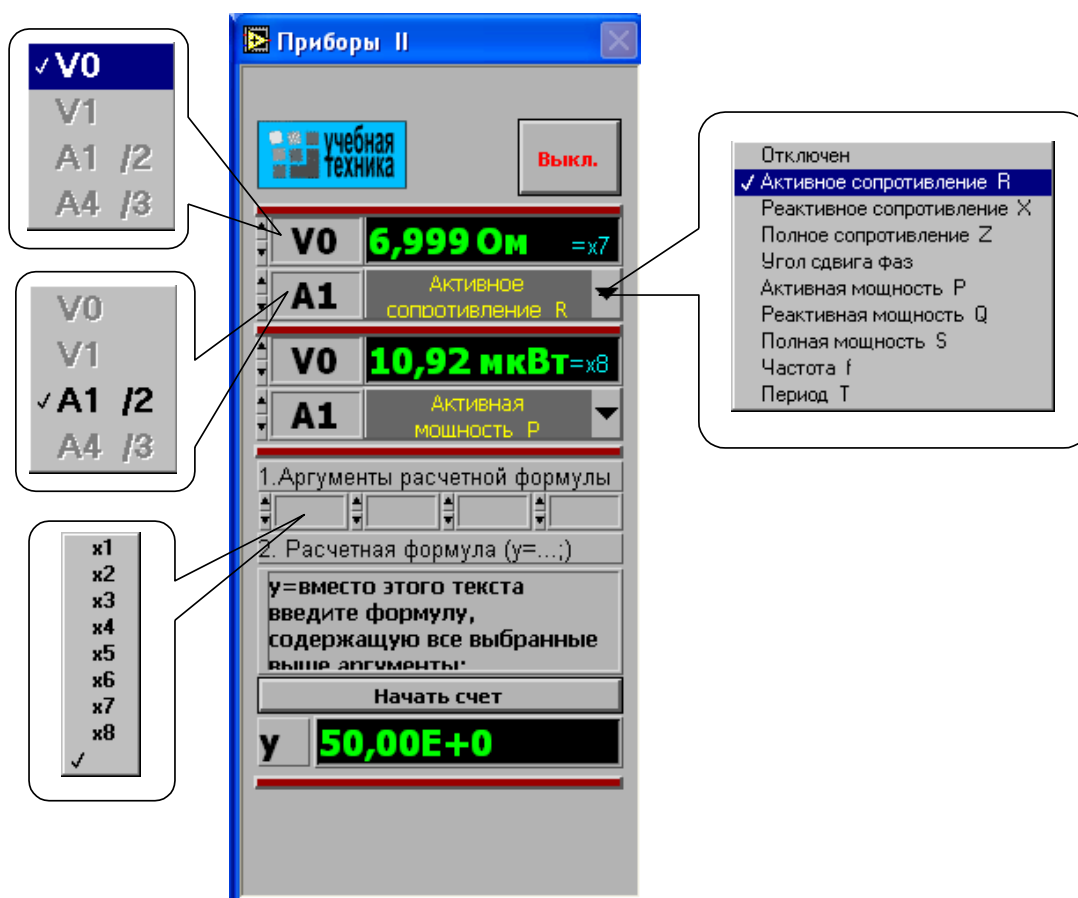


Рис. 10

Виртуальный осциллограф.

Виртуальный осциллограф позволяет наблюдать временные диаграммы сигналов, подаваемых на вход коннектора (двух напряжений и двух токов) в режиме «Развертка» или зависимость одного входного сигнала от любого другого в режиме «ХУ». Для его включения необходимо подать на вход коннектора исследуемые сигналы, включить и настроить, как описано выше, блок «Приборы I» и выбрать в меню этого блока строку «Осциллограф». После этого на дисплее появится изображение виртуального прибора «Осциллограф» (рис. 11). Назначение всех его окон показано на рисунке.

Один из пяти блоков входов и вертикального отклонения луча с пояснениями показан на рис. 12. На любой из пяти входов осциллографа можно подать сигнал с любого входа коннектора. При этом в окне входа осциллографа появляется соответствующее обозначение входа коннектора (виртуального прибора) и появляется луч на экране, цвет которого соответствует цвету фона переключателя исследуемого сигнала.

Масштаб изображения по вертикали устанавливается автоматически и изменяется ступенчато при изменении амплитуды сигнала, но его можно зафиксировать, нажав на кнопку фиксации масштаба (рис.12). После этого он меняться не будет. Предусмотрено и ручное плавное изменение масштаба внутри ступени. Органы управления горизонтальным перемещением луча показаны на рис.13.

В правом верхнем углу осциллографа (рис. 11) имеется движок управления степенью сглаживания фильтра (появляется только при его включении), а также меню изменения характеристик графика: непрерывный, ступенчатый, гистограмма, точечный, размер и форма точек, толщина линий и т.п. Меню открывается при щелчке на любом из изображенных там пяти лучей.

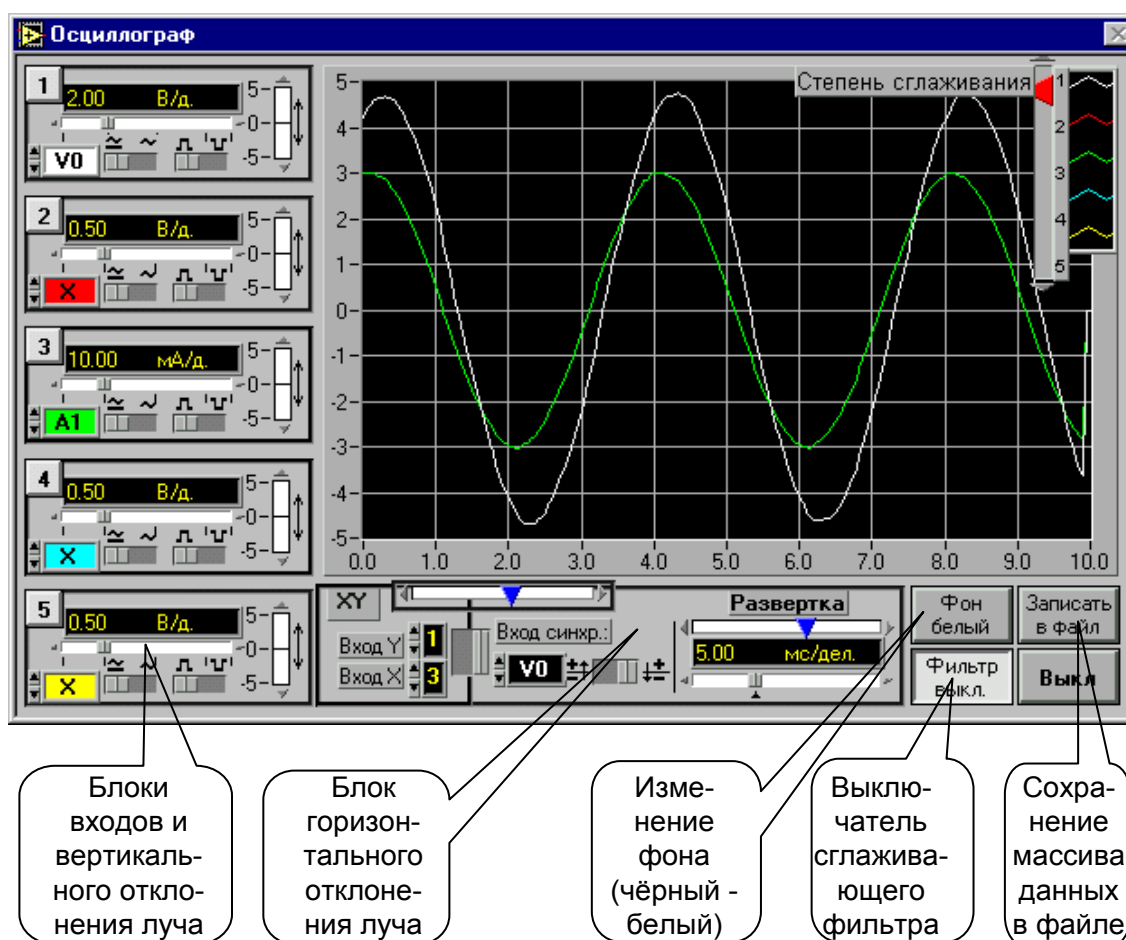


Рис. 11

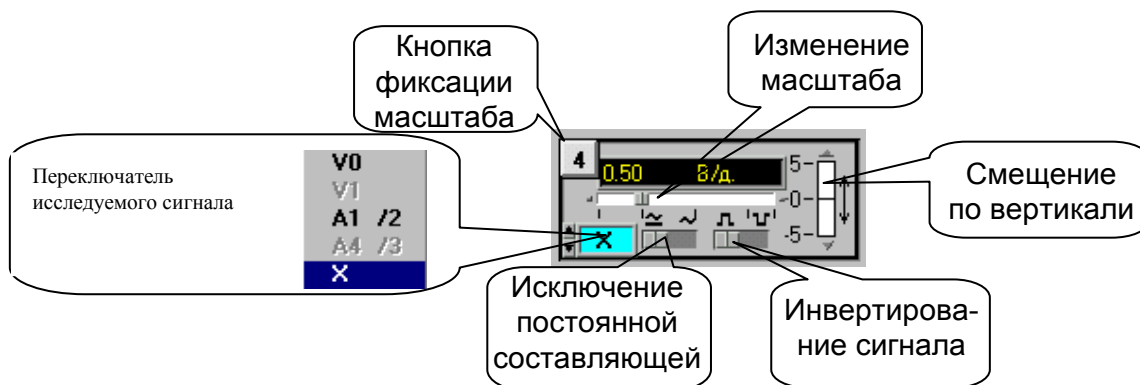


Рис. 12

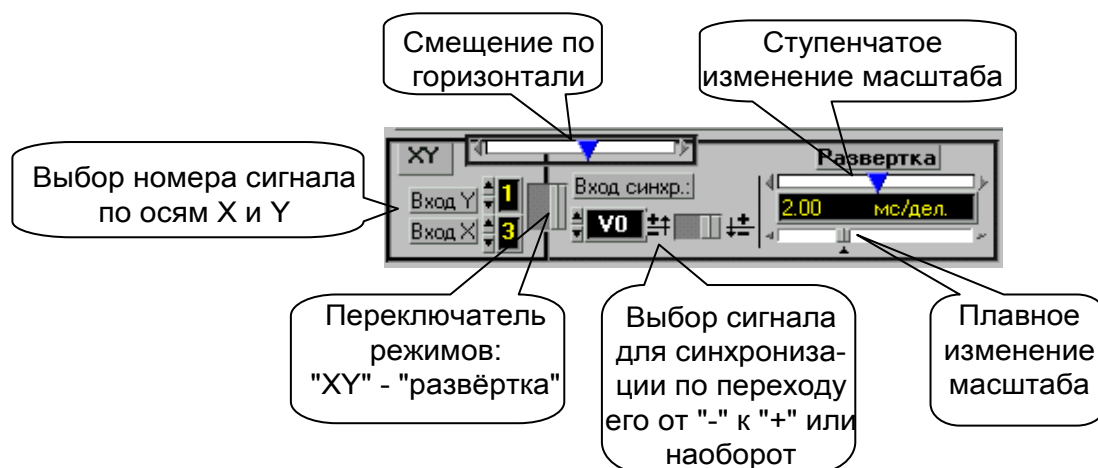


Рис. 13

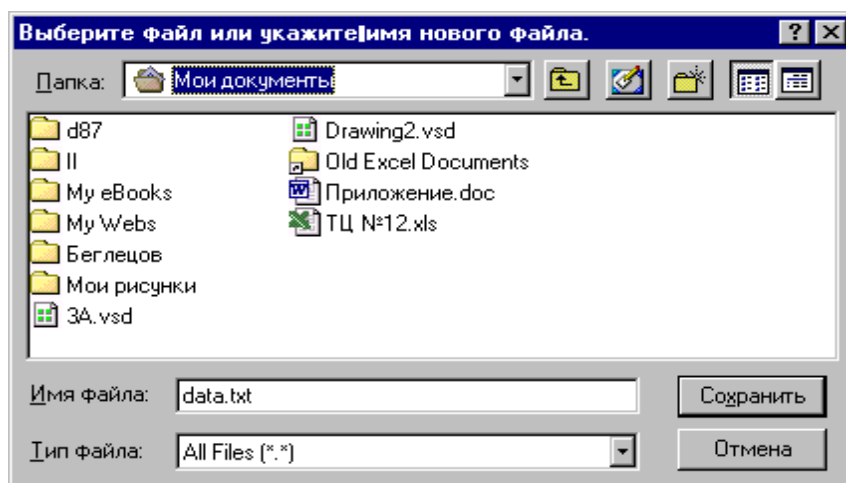


Рис. 14

Кнопка «Записать в файл» позволяет записать в файл таблицу мгновенных значений всех подключенных сигналов за один период измерения. После щелчка на этой кнопке появляется окно диалога (рис. 14), в котором нужно выбрать диск, папку и имя файла, в который Вы хотите записать данные и. Выбрав файл, нажмите клавишу «Сохранить».

Виртуальный псевдоаналоговый прибор.

Для наблюдения динамики изменения измеряемой величины более удобным является стрелочный прибор. Поэтому в комплексе «ВП ТОЭ» имеется псевдоаналоговый стрелочный прибор, который может дублировать показания любого из рассмотренных выше цифровых приборов (рис.15).

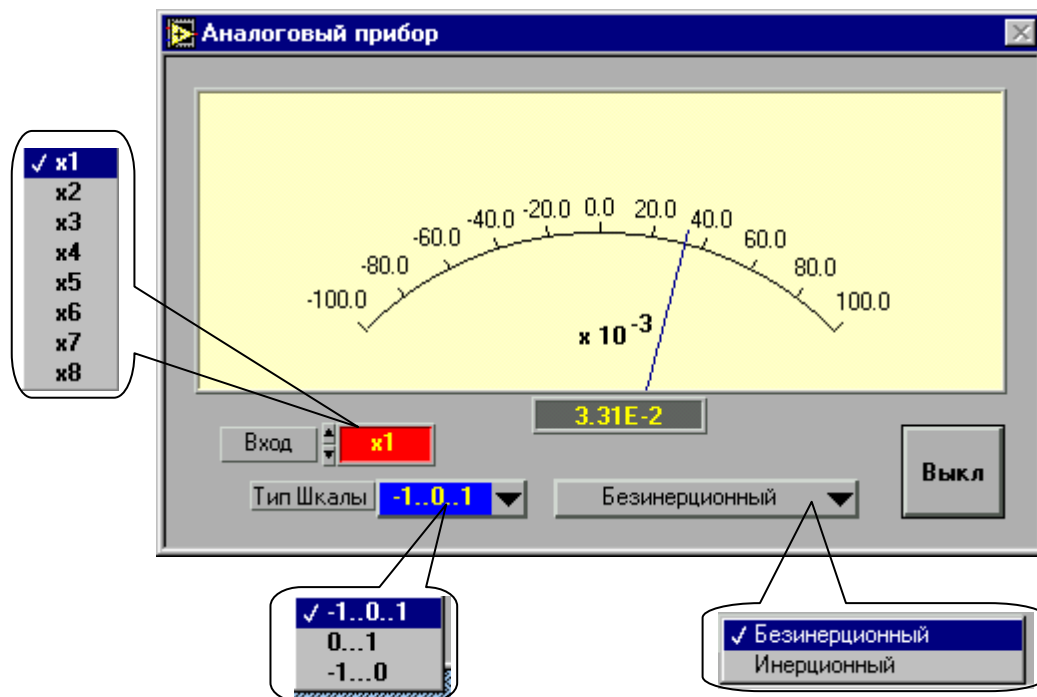


Рис. 15

Он открывается щелчком мыши на строке «Аналоговый прибор» в меню блока «Приборы I» и подключается к любому из восьми приборов x1...x8. На нем имеется также окно выбора типа: шкалы и клавиша «Инерционный - Безинерционный», с помощью которой можно замедлить или ускорить движение стрелки. Шкала прибора перенастраивается автоматически при выходе стрелки за ее пределы. Показание стрелки дублируется в цифровом виде в специальном окне прибора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ПЕРЕДАЧА МОЩНОСТИ ОТ АКТИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА К НАГРУЗКЕ

1.1. Цель работы

1. Экспериментально определить параметры эквивалентного генератора.
2. Рассмотреть закономерности передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке.

1.2. Схема лабораторной установки

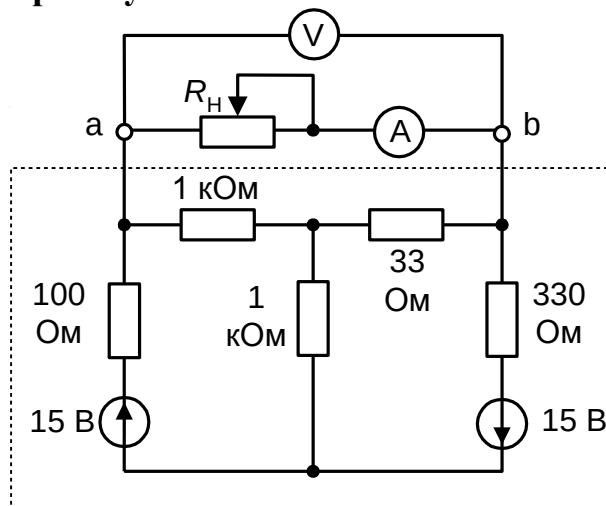


Рис. 1.1. Принципиальная схема цепи

1.3. Основные теоретические положения

Двухполюсник это любая, сколь угодно сложная цепь, имеющая два зажима для подключения внешних цепей. Активный двухполюсник имеет внутри себя источники питания. При расчёте электрических цепей, согласно теореме об эквивалентном генераторе, он может быть заменён эквивалентной ЭДС, равной напряжению холостого хода двухполюсника и внутренним сопротивлением, равным входному сопротивлению двухполюсника (рис. 1.2).

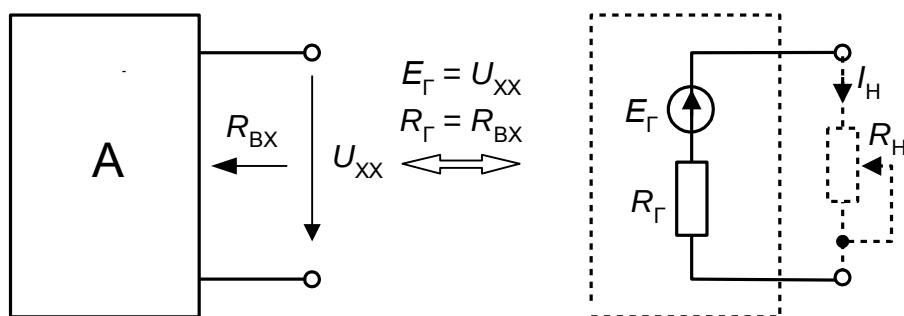


Рис. 1.2. Принципиальная схема двухполюсника

После такой замены могут быть найдены ток, напряжение, и мощность, потребляемая в нагрузке по формулам:

$$I_H = \frac{E_\Gamma}{R_\Gamma + R_H}; \quad U_H = I_H R_H = \frac{E_\Gamma R_H}{R_\Gamma + R_H}; \quad P_H = I_H U_H = \frac{E_\Gamma^2 R_H}{(R_\Gamma + R_H)^2}. \quad (1)$$

Согласно этим выражениям ток, напряжение, и мощность изменяются при увеличении сопротивления нагрузки, как показано на графике (рис. 1.3). В нагрузке выделяется максимальная мощность при $R_H = R_\Gamma$. Такой режим называется согласованным.

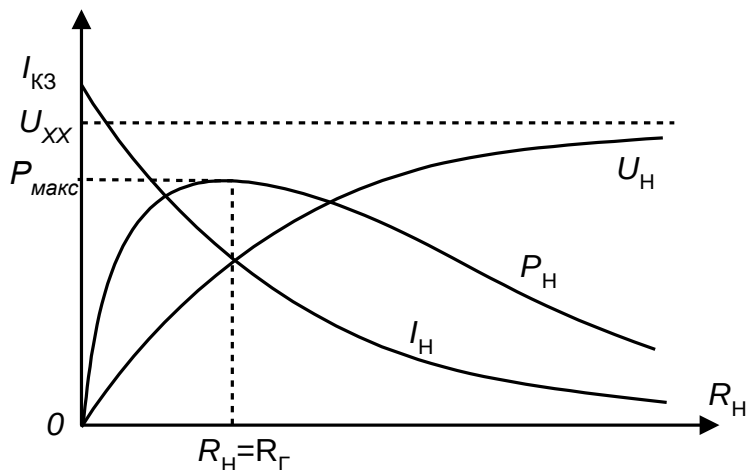


Рис. 1.3

Параметры эквивалентного генератора могут быть определены экспериментально из опытов холостого хода и короткого замыкания. При холостом ходе непосредственно измеряется $U_{XX} = E_\Gamma$, а при коротком замыкании измеряется ток короткого замыкания I_{K3} и вычисляется $R_\Gamma = U_{XX} / I_{K3}$.

1.4. Порядок проведения работы

1.4.1 Задание на подготовку к работе

Задача. Источник напряжения постоянного тока U_1 через двухпроводную линию, сопротивление которой R_Γ , нагружен на сопротивление R_H (рис. 1.4). Определить ток I в цепи, мощность на нагрузке P_H , мощность источника P_o и его КПД при следующих значениях: $R_H = 0$; $0,25 \cdot R_\Gamma$; $0,5 \cdot R_\Gamma$; $1 \cdot R_\Gamma$; $2 \cdot R_\Gamma$; $5 \cdot R_\Gamma$.

По найденным значениям построить графики зависимости тока (I), мощности нагрузки (P_H), мощности источника (P_o), КПД линии ($\eta = \frac{P_H}{P_o} \cdot 100\%$), Напряжение на нагрузке (U_2) от отношения R_H/R_Γ . Определить при каком соотношении R_H и R_Γ на нагрузке выделяется максимальная мощность. Определить КПД в этом режиме. Исходные данные U_1 , R_Γ , R_H берутся из табл. 1.1 в соответствии с вариантом по списку.

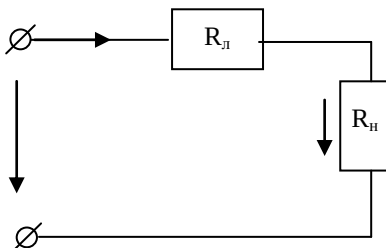


Рис. 1.4

Т а б л и ц а 1.1

№ варианта	№ варианта	U_1 , В	R_L , Ом	R_H , Ом
1	11	6,4	6	0...16
2	12	6,4	9	0...16
3	13	6,4	6,6	0...16
4	14	6,4	4,6	0...16
5	15	6,4	12,2	0...70
6	16	6,4	11,8	0...70
7	17	6,4	14	0...70
8	18	6,4	21	0...70
9	19	6,4	23	0...16
10	20	6,4	25	0...70

Заполнить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- решённую задачу по номеру варианта;
- ответы на контрольные вопросы.

1.4.2. Задание на выполнение работы

Экспериментально определить параметры эквивалентного генератора, снять зависимости $I_H(R_H)$, $U_H(R_H)$ и $P_H(R_H)$ и построить графики. определить параметры эквивалентного генератора расчётом по известной схеме и номинальным параметрам элементов, рассчитать те же зависимости и сравнить с экспериментальными.

1.4.3. Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 1.5) и монтажной схеме (рис. 1.6). Включите питание и, вращая ручку переменного резистора, убедитесь, что ток и напряжение на нагрузке изменяются.
- Выньте из гнезд наборного поля переменный резистор 1 кОм и измерьте напряжение холостого хода. Запишите его значение в верхнюю строку табл. 1.2 (смотри бланк отчета к лабораторной работе).
- Вставьте на место резистора перемычку и измерьте ток короткого замыкания, вычислите R_T и запишите их значения также в верхнюю строку табл. 1.2 (смотри бланк отчета к лабораторной работе)
- Вставьте на своё место переменный резистор и, изменяя значение сопротивления нагрузки, записывайте в табл. 1.2 (смотри бланк отчета к лабораторной работе) значения тока и напряжения на нагрузке.
- На рис. 1.7, 1.8, 1.9 (смотри бланк отчета к лабораторной работе) постройте графики $I_H(R_H)$, $U_H(R_H)$ и $P_H(R_H)$ по результатам измерений или эксперимента.

- Сделайте расчёт параметров эквивалентного генератора, применяя метод эквивалентного генератора, рассчитайте зависимости $I_H(R_H)$, $U_H(R_H)$ и $P_H(R_H)$ при $R_H = 0 \dots 1$ кОм по расчётным формулам (1), результаты занесите в табл. 1.2.2, на рис. 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3, (смотри бланк отчета к лабораторной работе) совместно с опытными графиками постройте расчётные.
- Сравните результаты и сделайте выводы.

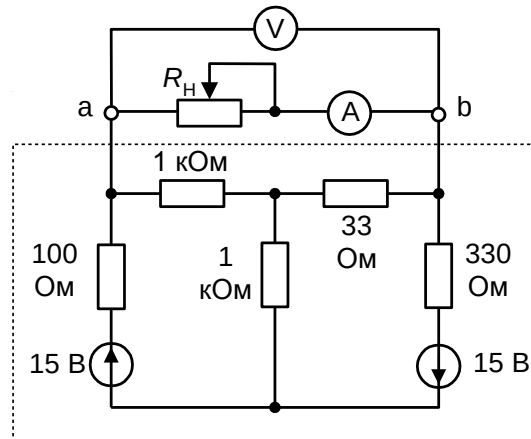


Рис. 1.5. Принципиальная схема цепи.

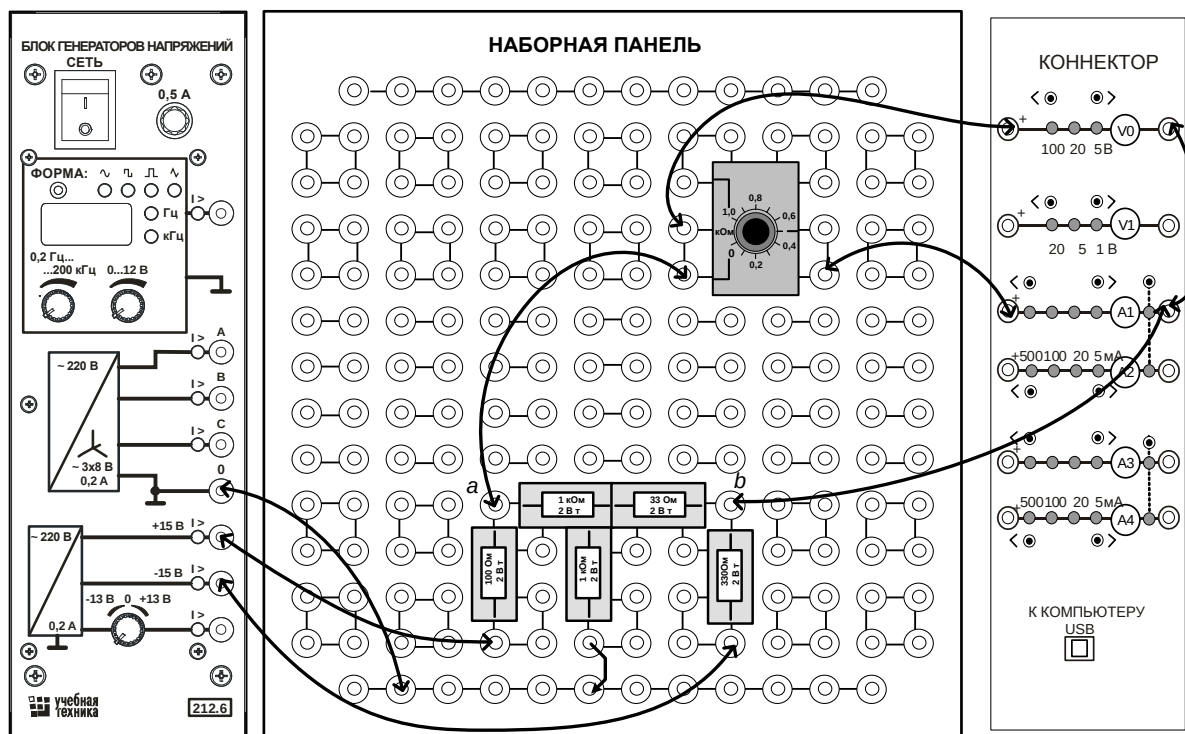


Рис. 1.6. Монтажная схема.

1.5. Выводы

В выводах следует рассмотреть следующие вопросы:

1. Проанализировать закономерности передачи энергии по линиям постоянного тока.
2. Обосновать возможность передачи электроэнергии по линиям постоянного тока.
3. Соответствуют ли расчётные данные экспериментальным.

1.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение падения напряжения.
2. Дать определение КПД линии.
3. Что необходимо сделать, чтобы линия находилась в режиме холостого хода, короткого замыкания?
4. Чему равен ток в линии, потери мощности и КПД линии при холостом ходе?
5. Куда расходуется электроэнергия при коротком замыкании нагрузки.
6. Сформулировать закон Ома для участка цепи без ЭДС.
7. Запишите выражение для мощности источника и мощности нагрузки.
8. Дать определение уравнению баланса мощностей.

1.7. Список литературы

1. ТОЭ, Л.А. Бессонов, М. – Высшая школа, 1973. - С. 67 - 70.
2. ОТЦ, Г.В. Зевеке и др. М. – Энергоатомиздат, 1989. - С. 103 -106.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 2

ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ R, L, C. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА

2.1. Цель работы.

1. Исследовать режимы работы электрической цепи переменного синусоидального тока.
2. Исследовать частотные характеристики последовательного резонансного контура.

Часть 1. Цепь синусоидального тока при последовательном соединении R, L, C.

2.2.1. Схема лабораторной установки

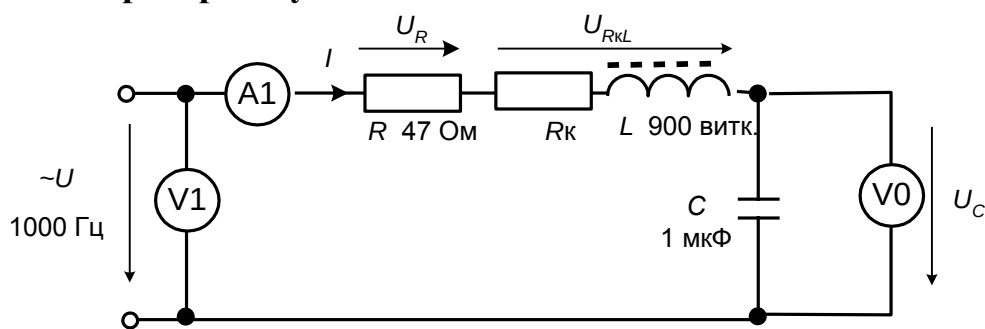


Рис. 2.1. Принципиальная схема установки

2.3.1. Основные теоретические положения

В цепи переменного тока кроме сопротивлений используются также катушки индуктивности и конденсаторы.

На сопротивлениях, которые в цепи переменного тока называют ещё **активными сопротивлениями**, связь между током и напряжением определяется законом Ома. Если по активному сопротивлению R протекает синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, то напряжение на этом сопротивлении $u = U_m \sin \omega t$, где $\omega = 2\pi f$ – круговая (циклическая) частота, а амплитуды тока и напряжения связаны законом Ома: $U_m = RI_m$.

Если по идеальной индуктивности L (т.е. активное сопротивление провода катушки равно нулю) протекает ток $i = I_m \sin \omega t$, то напряжение на ней $u = U_m \sin (\omega t + 90^\circ)$, т.е. напряжение на катушке опережает ток на 90° , или ток отстает от напряжения по фазе на 90° . Амплитуды тока и напряжения связаны соотношением, аналогичным закону Ома: $U_m = X_L I_m$, где $X_L = \omega L$ – **индуктивное сопротивление**.

Если по конденсатору, ёмкость которого C , протекает синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, то напряжение на нём $u = U_m \sin (\omega t - 90^\circ)$ отстает от тока по фазе на 90° . Амплитуда напряжения связана с током также выражением, аналогичным закону Ома: $U_m = X_C I_m$, где $X_C = 1/\omega C$ – **ёмкостное сопротивление**.

Выражения аналогичные закону Ома применяются и для действующих значений синусоидальных токов и напряжений:

$$U_R = RI_R; \quad U_L = X_L I_L; \quad U_C = X_C I_C.$$

При последовательном соединении R , L , и C (рис. 2.2, а) через все элементы протекает один и тот же ток. Тогда напряжение на всей цепи можно определить по второму закону Кирхгофа, как сумму напряжений на отдельных элементах. При сложении, чтобы учесть фазовые сдвиги между напряжениями, удобно использовать векторные диаграммы. На векторной диаграмме действующие (или амплитудные) значения токов и напряжений изображают векторами, длины которых равны численным значениям токов и напряжений, а углы между ними соответствуют фазовым сдвигам (рис. 2.2, б).

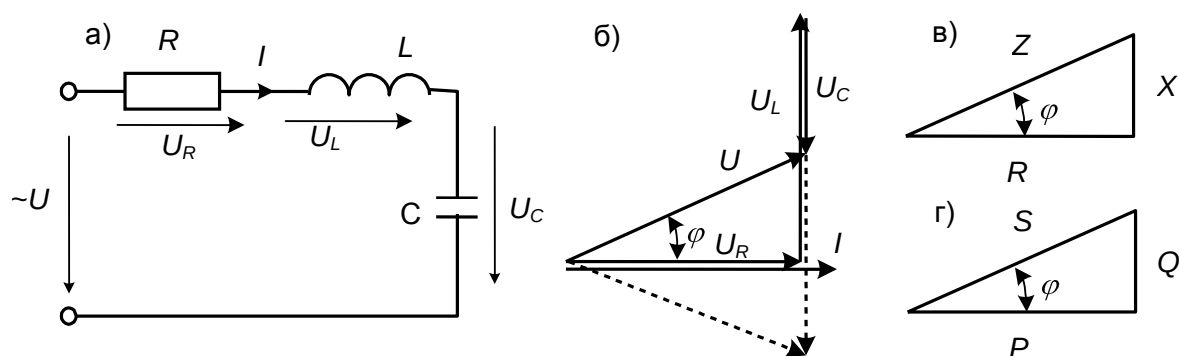


Рис. 2.2. Последовательное соединение R , L , и C

Из векторной диаграммы следует, что напряжение на всей цепи:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{R^2 I^2 + (X_L I - X_C I)^2} = ZI,$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$ - **полное сопротивление** цепи при последовательном соединении R , L , и C , а $X = X_L - X_C$ - реактивное сопротивление. Из векторной диаграммы следует также, что угол сдвига между током и напряжением: $\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{X}{R}$.

Все соотношения между активным, реактивным и полным сопротивлениями, а также углом φ , хорошо иллюстрируются с помощью треугольника сопротивлений (рис. 2.2, в), который подобен треугольнику напряжений.

Если $X_L > X_C$, то угол φ положительный и напряжение опережает ток. Этот случай показан на векторной диаграмме сплошными линиями. Если же $X_L < X_C$, то угол φ отрицательный, и напряжение отстает от тока (показано на векторной диаграмме пунктиром). Если же, наконец, $X_L = X_C$, тогда и $U_L = U_C$ и $\varphi = 0$, и ток совпадает с напряжением по фазе. Этот случай называется **резонансом напряжений**.

Условие резонанса $X_L = X_C$ или $\varphi = 0$ можно также записать в виде:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{или} \quad \omega^2 LC = 1.$$

Отсюда можно определить частоту, индуктивность или ёмкость, при которой в цепи будет наблюдаться резонанс.

При синусоидальном токе мощность, потребляемая цепью, периодически изменяется во времени с двойной частотой. Однако, кроме переменной составляющей, она содержит также и постоянную составляющую. Среднее значение мощности за период называется **активной мощностью**: $P = UI \cos \varphi = I^2 R$. Она измеряется в Вт. Кроме активной мощности в цепях переменного тока используют понятия **полной мощности** $S = UI = I^2 Z$, (В·А), **реактивной мощности** $Q = UI \sin \varphi = I^2 X$, (вар), а также индуктивной мощности $Q_L = I^2 X_L$, (вар) и ёмкостной мощности $Q_C = I^2 X_C$, (вар). Очевидно, что $Q = Q_L - Q_C$. Все соотношения между мощностями можно проиллюстрировать треугольником мощностей, подобным треугольникам напряжений и сопротивлений (рис. 2.2, г). При резонансе, когда $X = X_L - X_C = 0$ и $\varphi = 0$, реактивная мощность также равна нулю, а активная равна полной мощности.

Параметры цепи переменного тока R , X_L и X_C можно определить по показаниям трёх приборов вольтметра, амперметра и ваттметра. Измерив этими приборами U , I , и P , определяем $Z = U/I$ и $\varphi = \arccos P/UI$. Затем из треугольника сопротивлений определяем $R = Z \cos \varphi$ и $X = Z \sin \varphi$.

Часть 2. Частотные характеристики последовательного резонансного контура

2.2.2. Схема лабораторной установки

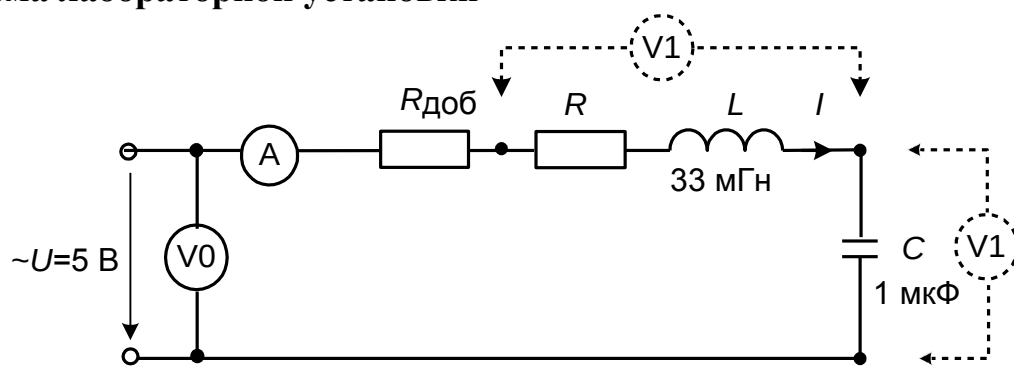


Рис. 2.3. Принципиальная схема установки

2.3.2. Основные теоретические положения

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. 2.4, а) активное сопротивление не зависит от частоты, а индуктивное, ёмкостное и реактивное сопротивления изменяются в соответствии со следующими выражениями:

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

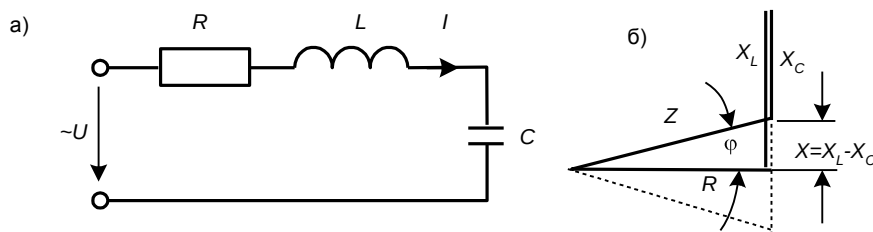


Рис. 2.4. Последовательный резонансный контур

Полное сопротивление, как следует из треугольника сопротивлений (рис. 2.4, б): $Z(\omega) = \sqrt{R^2 + X^2}$.

Вид этих зависимостей от частоты представлен на рис. 2.5, а. 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. 2.5, б показаны графики изменения тока, напряжений на участках цепи и фазового сдвига при изменении частоты и неизменном приложенном напряжении в соответствии со следующими формулами:

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

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

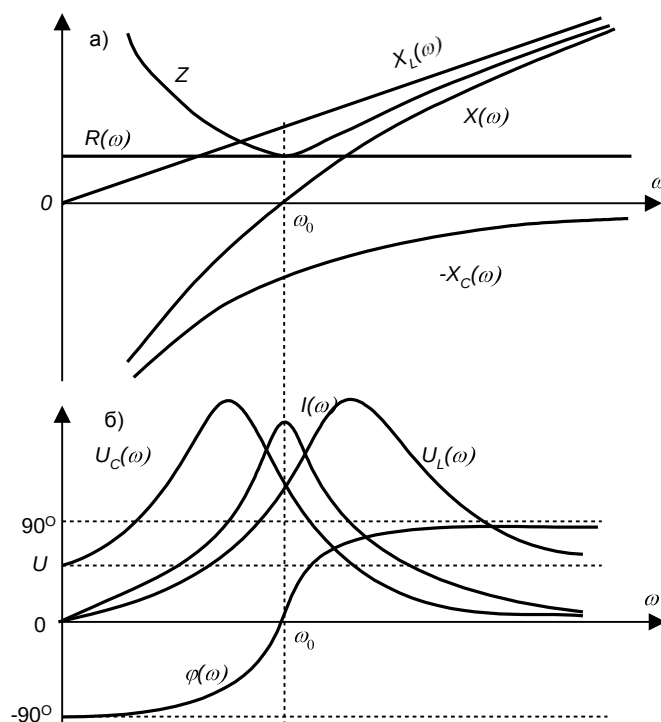


Рис. 2.5

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

2.4. Порядок проведения работы

2.4.1 Задание на подготовку к работе

Задача № 1. В схему включены три вольтметра (рис. 2.6), измеряющие действующие значения напряжения. Определить показания вольтметров V_1 и V_2 при показаниях вольтметра V . Значения приложенного напряжения и сопротивлений цепи в табл. 2.1 по номеру варианта. Построить векторную диаграмму.

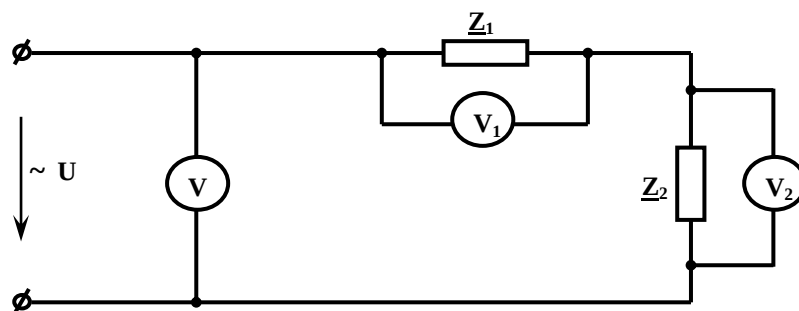


Рис. 2.6

Таблица 2.1

№ варианта	№ варианта	U, В	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом
1	11	127	30	j40
2	12	127	30	-j40
3	13	220	j40	30
4	14	220	-j40	30
5	15	127	$15 + j15$	20
6	16	127	20	$15 + j15$
7	17	220	$15 - j15$	20
8	18	127	20	$15 - j15$
9	19	220	$15 + j15$	j20
10	20	127	-j20	$15 - j15$

Задача № 2. К генератору синусоидального напряжения, действующее значение которого равно U , частота $f = 50$ Гц, подключена цепь, состоящая из последовательно соединенных элементов (схему изобразить), параметры которых R , L , C , см. таблицу 2.1. Определить величину C_p , соответствующую резонансу напряжений, построить графики зависимостей $U_k = f(C)$; $U_c = f(C)$; $I = f(C)$; $\varphi = f(C)$ при неизменных значениях напряжения U и частоты f . Емкость C изменять в пределах от 0 до $2 C_p$. Определить, при каком значении C ток в цепи становится максимальным.

Таблица 2.2

№ варианта	№ варианта	U, В	L, м Гн	R, Ом
1	11	30	525	21
2	12	35	300	11,8
3	13	40	278	12,2
4	14	30	345	14
5	15	35	210	21
6	16	40	383	17
7	17	45	525	17
8	18	50	300	21
9	19	55	278	14
10	20	60	345	12,2

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- решённые задачи, согласно варианту;
- ответы на контрольные вопросы.

2.4.2. Задание на выполнение работы

Часть 1.

- Определить экспериментально параметры цепи с последовательным соединением R , L и C для трёх случаев $X_L > X_C$, $X_L = X_C$ и $X_L < X_C$. Построить векторные диаграммы. Сделать расчёт цепи при резонансе и сравнить результаты расчёта с экспериментальными данными.

Часть 2.

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

2.4.3. Порядок выполнения эксперимента

Часть 1.

- Измерьте омметром и запишите активное сопротивление катушки индуктивности 900 витков.
- Снимите с трансформатора катушку 900 витков, вставьте в неё **только одну половинку** разъёмного сердечника и соберите цепь, принципиальная схема которой показана на рис. 2.7, а монтажная – на рис. 2.8.
- Активизируйте виртуальные приборы для измерения тока, напряжений и активной мощности.

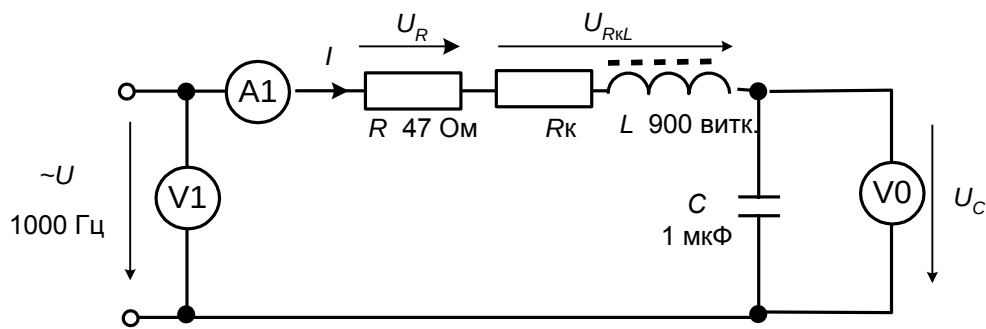


Рис. 2.7. Принципиальная схема

- Установите переключатель сигналов генератора напряжений в положение «~», регулятор частоты – в положение 1000 Гц и регулятор напряжения в крайнее правое положение (максимальная амплитуда).
- Включите генератор и, регулируя частоту, добейтесь резонанса по максимуму тока.
- Измерьте мощность, ток и напряжения на входе цепи, на резисторе, на катушке с активным внутренним сопротивлением и на конденсаторе. Запишите эти показания приборов в строку $X_L = X_C$ табл. 2.2.1.
- Включите параллельно конденсатору 1 мкФ конденсатор 0,47 мкФ и запишите показания приборов в строку $X_L > X_C$.
- Оставьте в цепи один конденсатор 0,47 мкФ и запишите показания приборов в строку $X_L < X_C$.
- По опытным данным рассчитайте напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях катушки и занесите результаты также в табл. 2.2. (смотри бланк отчета к лаб. работе)
- На рис. 2.9 (смотри бланк отчета к лаб. работе) постройте в масштабе векторные диаграммы для всех случаев.
- По экспериментальным данным определите параметры цепи Z , φ , R , X и сведите результаты расчёта в табл. 2.2.2.
- Определите те же эквивалентные параметры цепи Z , φ , R , X по номинальным данным, указанным на этикетках (кроме катушки) и сведите результаты расчёта в табл. 2.2.3. Сравните результаты. Проверьте расчёт путём непосредственного измерения сопротивлений Z , R , X и угла φ виртуальными приборами.

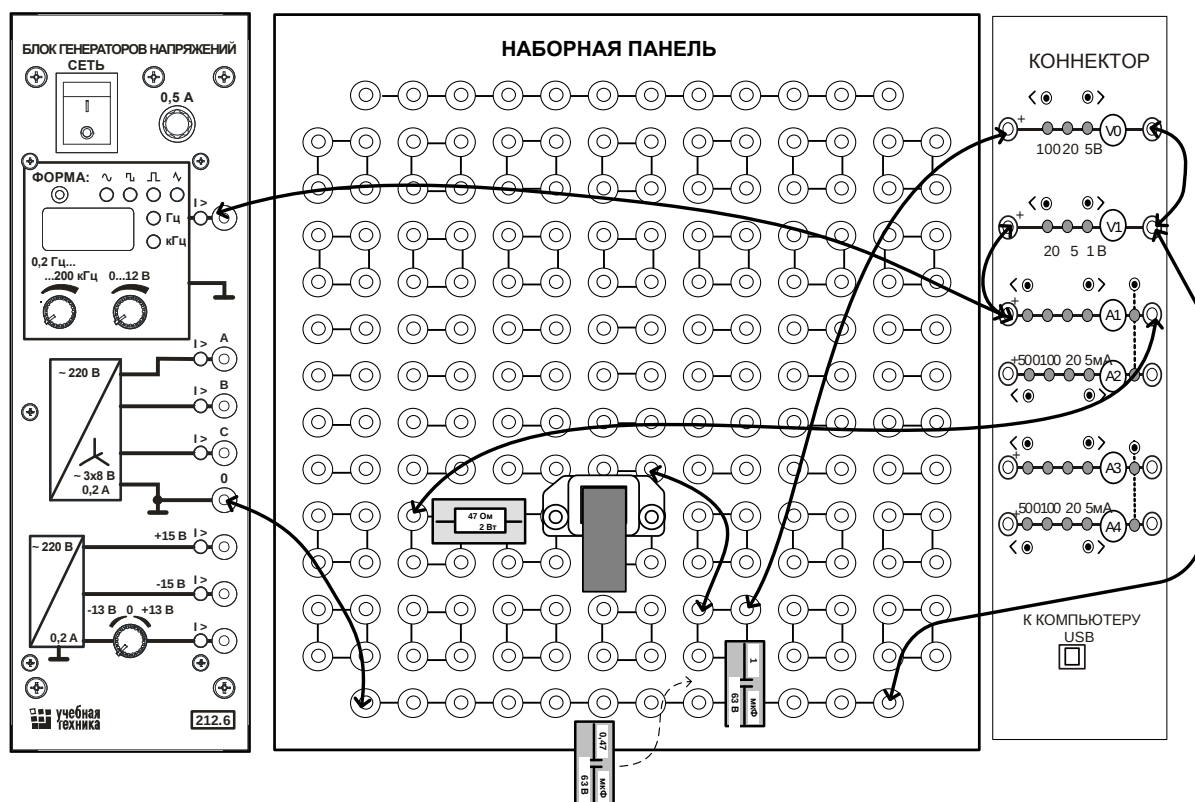


Рис. 2.8. Монтажная схема

Часть 2

- Измерьте омметром активное сопротивление катушки индуктивности, указанной на схеме (рис. 2.9).
- Вычислите резонансную частоту, характеристическое сопротивление и добротность резонансного контура.
- Соберите цепь согласно схеме (рис. 2.9), включив в неё в качестве измерительных приборов соответствующие гнезда коннектора (или мультиметры). Сопротивление R – внутреннее сопротивление катушки индуктивности. Добавочное сопротивление $R_{доб}$ на этом этапе примите равным нулю. Подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения и установите его параметры: $U=5\text{ В}$, $f=f_0$.

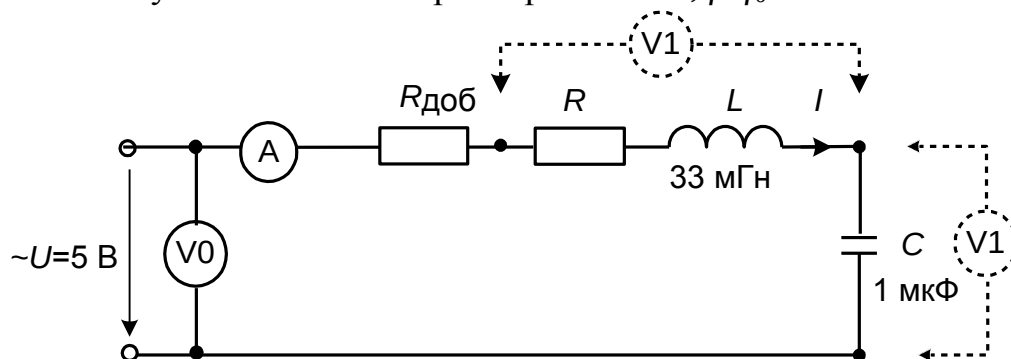


Рис. 2.9. Принципиальная схема

- Включите виртуальные приборы и по показанию фазометра настройте более точно резонансный режим, изменяя частоту приложенного

напряжения. Сравните экспериментальную резонансную частоту с расчётной.

- Изменяя частоту от 0,2 до 2 кГц, запишите в табл. 2.4. показания виртуальных приборов и по этим результатам на рис. 2.10 и 2.11(смотри бланк отчета к лаб. работе) постройте графики частотных характеристик при добротности $Q > 1$.
- Включите в цепь добавочное сопротивление $R_{доб} = 100 \dots 330 \text{ Ом}$ и убедитесь, что резонансная частота не изменилась, а ток и напряжения U_L и U_C при резонансе стали меньше.

2.5. Выводы

В выводах рассмотреть следующие вопросы:

1. Как определяется результирующее сопротивление цепи по известным сопротивлениям элементов.
2. Для каких значений токов и напряжений в цепях переменного тока выполняются первый и второй законы Кирхгофа.
3. При каких соотношениях между индуктивным и емкостным сопротивлениями имеет место резонанс напряжений.
4. Проанализировать графики частотных характеристик последовательного резонансного контура.

2.6. Контрольные вопросы

1. Записать формулу комплексного сопротивления цепи с последовательным соединением R , L и C .
2. Записать формулу реактивного сопротивления цепи с последовательным соединением R , L и C .
3. В каких случаях последовательная цепь R , L и C носит емкостной характер, индуктивный характер, активный характер?
4. Дать определение резонанса напряжений.
5. Чему равен угол φ при резонансе?
6. Как определить резонансную частоту?
7. Какое значение принимает ток при резонансе?
8. Когда напряжение на реактивных элементах при резонансе будет больше приложенного к цепи напряжения?

2.7. Список литературы.

1. Л.А.Бессонов, ТОЭ. М. – Высшая школа, 1973. - С. 146 - 149.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат, 1989. - С.114 - 123.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 3

ЦЕПЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА

3.1. Цель работы.

1. Исследовать режимы работы электрической цепи переменного синусоидального тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора.
2. Исследовать частотные характеристики параллельного резонансного контура.

Часть 1. Цепь синусоидального тока при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора

3.2.1. Схема лабораторной установки

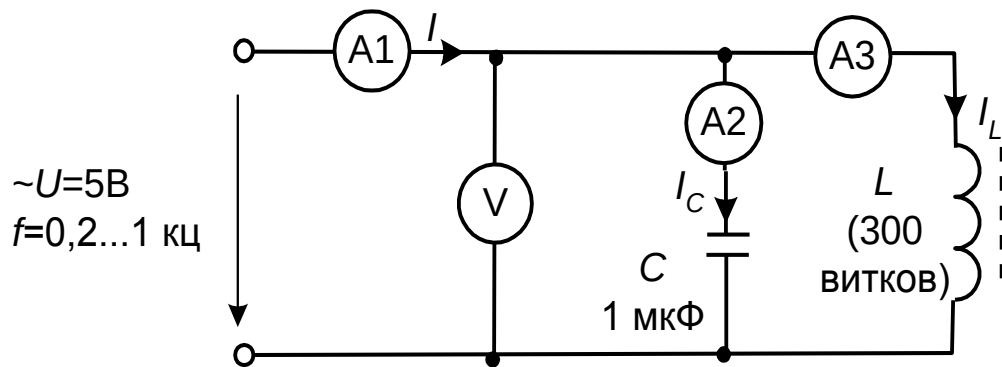


Рис. 3.1. Принципиальная схема установки

3.3.1. Основные теоретические положения.

В общем случае, на входе цепи синусоидального тока, содержащей сопротивления, индуктивности и ёмкости (рис. 3.2, а) протекает ток, сдвинутый по фазе относительно напряжения на угол φ , что можно показать на векторной диаграмме (рис. 3.2, б). Действующее значение этого тока определяется по закону Ома: $I = U/Z = UY$, где $Y = 1/Z$ – **полная проводимость** цепи.

Если ток отстаёт от напряжения ($\varphi > 0$), то говорят, что цепь носит индуктивный характер, если опережает ($\varphi < 0$) – ёмкостный характер. Второй случай показан на векторной диаграмме пунктиром.

Ток можно представить в виде суммы двух составляющих: **активной**, совпадающей по фазе с приложенным напряжением и **реактивной**, сдвинутой относительно напряжения на $+90^\circ$ или -90° .

Активная составляющая тока $I_a = I \cos \varphi = UY \cos \varphi = UG$, где $G = Y \cos \varphi$ называется **активной** проводимостью.

Реактивная составляющая тока $I_p = I \sin \varphi = UY \sin \varphi = UB$, где $B = Y \sin \varphi$ называется **реактивной** проводимостью.

Все соотношения между проводимостями Y , G , и B , а также углом φ могут быть наглядно представлены в виде треугольника проводимостей, подобного треугольнику токов (рис. 3.2, в).

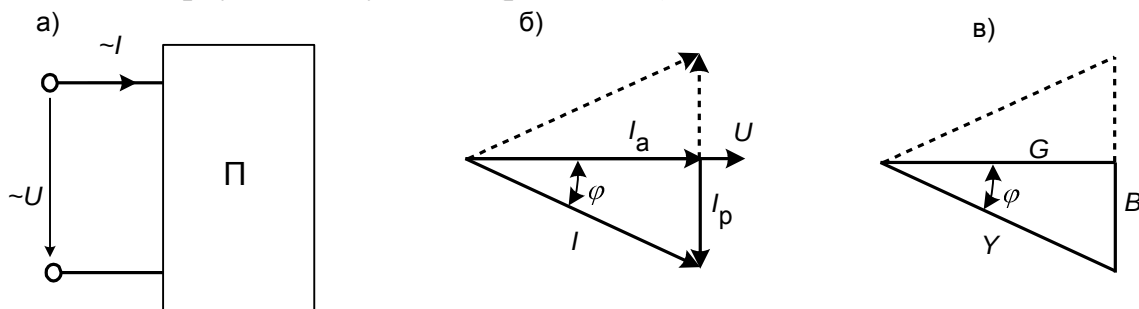


Рис. 3.2

Если катушка, обладающая индуктивностью L и активным сопротивлением R соединена параллельно с конденсатором ёмкостью C (рис. 3.2, а), то напряжение на них одно и то же, а ток I на входе цепи представляет сумму тока в катушке I_k , отстающим от напряжения на угол φ , и тока в конденсаторе I_C , опережающего напряжение на 90° .

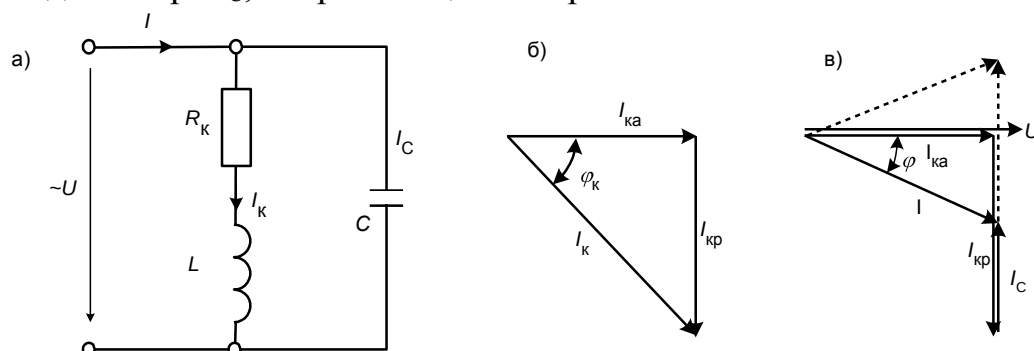


Рис. 3.3

Для сложения токов сначала представим ток в катушке в виде двух составляющих: активной $I_{ка}$, и реактивной $I_{кр}$, как показано на (рис. 3.3, б), а затем нарисуем из конца вектора $I_{кр}$ вектор тока в конденсаторе (рис.3.3, в), опережающий напряжение на 90° и получим суммарный ток. Из векторной диаграммы следует, что

$$I = \sqrt{I_{ка}^2 + (I_{кр} - I_C)^2} = \sqrt{U^2 G^2 + U^2 (B_L - B_C)^2} = U \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = UY,$$

где $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{G^2 + B^2}$, - полная проводимость этой цепи.

В свою очередь:

$B = B_L - B_C$ - реактивная проводимость всей цепи;

$B_L = Y_k \sin \varphi_k$ - индуктивная проводимость катушки;

$B_C = \omega C$ - ёмкостная проводимость конденсатора;

$G = Y_k \cos \varphi_k$ - активная проводимость катушки;

Из векторной диаграммы следует также, что угол сдвига между током и

напряжением $\varphi = \arctg \frac{I_{кр} - I_C}{I_{ка}} = \arctg \frac{B_L - B_C}{G} = \arctg \frac{B}{G}$.

Если $B_L > B_C$, то угол φ положительный и напряжение опережает ток. Этот случай показан на векторной диаграмме сплошными линиями. Если же

$B_L < B_C$, то угол φ отрицательный, и напряжение отстаёт от тока (показано на векторной диаграмме пунктиром). Если же, наконец, $B_L = B_C$, тогда и $I_{кр} = I_C$ и $\varphi = 0$, и ток совпадает с напряжением по фазе. Этот случай называется резонансом токов.

Условие резонанса $B_L = B_C$ или $\varphi = 0$ можно также записать в виде:

$$Y_K \sin \varphi_K = \omega C.$$

В свою очередь, $Y_K = \frac{1}{Z_K} = \frac{1}{\sqrt{R_K^2 + \omega^2 L^2}}$, а $\sin \varphi_K = \frac{\omega L}{\sqrt{R_K^2 + \omega^2 L^2}}$, поэтому

$$\frac{L}{R_K^2 + \omega^2 L^2} = C.$$

Отсюда можно определить ёмкость, индуктивность или частоту, при которой в цепи будет наблюдаться резонанс.

Часть 2. Частотные характеристики параллельного резонансного контура.

3.2.2. Схема лабораторной установки. Та же что и в части 1.

3.3.2. Основные теоретические положения.

В параллельном резонансном контуре (рис. 3.4, а) активная проводимость не зависит от частоты, а индуктивная, ёмкостная и реактивная проводимости изменяются в соответствии со следующими выражениями:

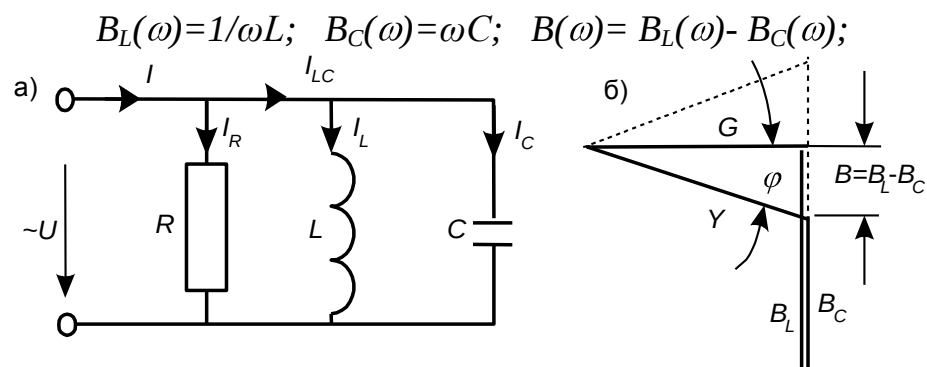


Рис. 3.4. Параллельный резонансный контур

Полная проводимость, как следует из треугольника проводимостей (рис. 3.4, б): $Y(\omega) = \sqrt{G^2 + B^2}$. Вид этих зависимостей от частоты представлен на рис. 3.5, а. 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. 3.5, а). Реальные кривые могут несколько

отличаться от рассмотренных идеальных, так как здесь не учитывалось активное сопротивление катушки.

Угол сдвига фаз (рис. 3.5, б) изменяется в соответствии с выражением:

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

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

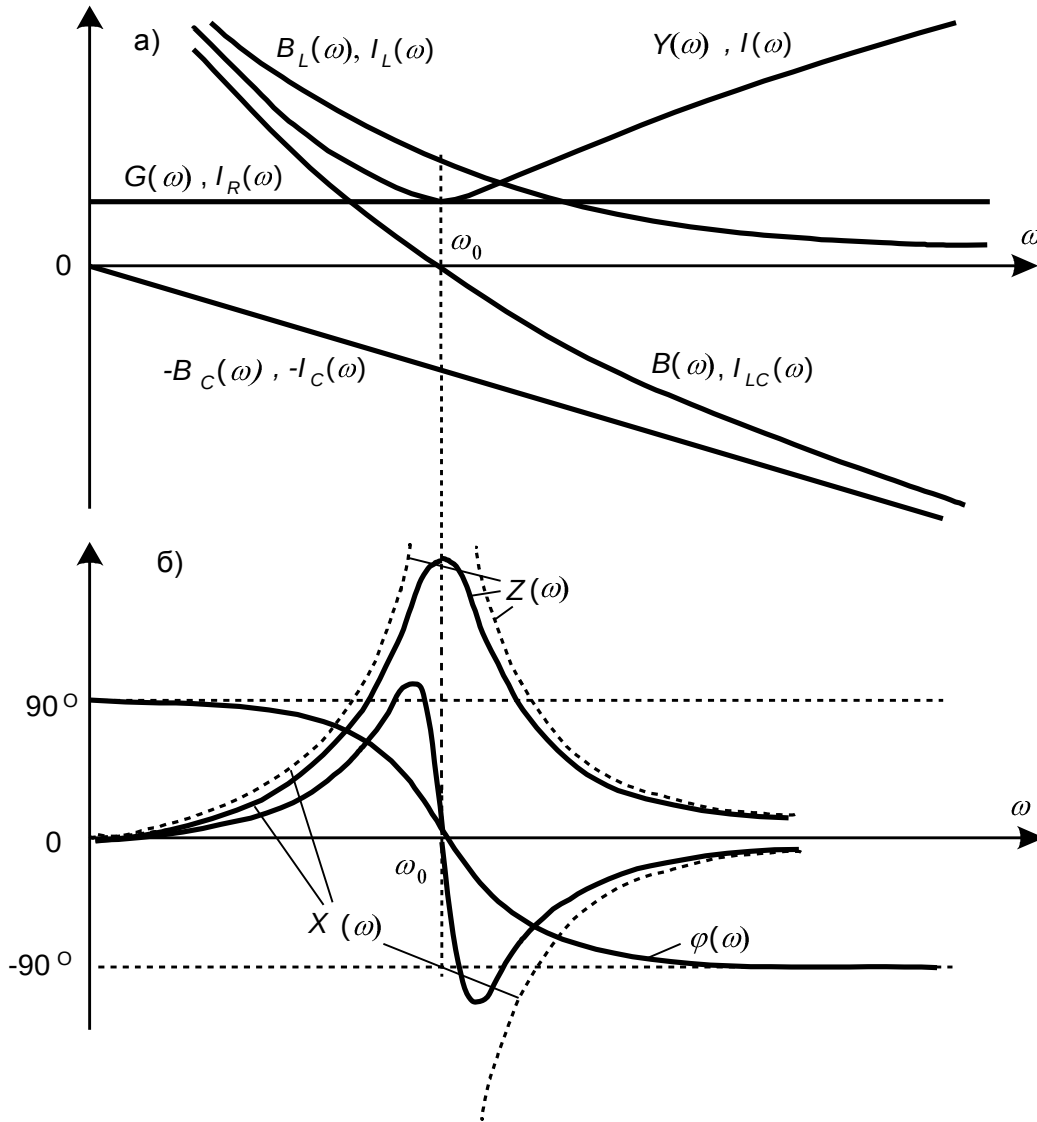


Рис. 3.5. Графики проводимостей

На рис. 3.5, б кроме $\varphi(\omega)$ построены также зависимости от частоты полного $Z(\omega)$ и реактивного $X(\omega)$ сопротивлений. В общем случае (см. сплошные линии на рис. 3.5): $Z(\omega) = 1/Y(\omega) = 1/\sqrt{(G^2 + B^2)}$; $X(\omega) = B/(G^2 + B^2)$.

При резонансе полное сопротивление принимает максимальное значение, а реактивное обращается в ноль. В идеализированном случае, когда активная проводимость настолько мала, что ей можно пренебречь ($G = 0$): $X(\omega) = 1/B$; $Z(\omega) = 1/|B|$.

Тогда в точке резонанса кривые $X(\omega)$ и $Z(\omega)$ имеют разрыв (см. пунктирные линии на рис. 3.5, б).

3.4. Порядок проведения работы.

3.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача № 1. В схему включены три амперметра, измеряющие действующие значения тока (см. рис. 3.6). Определить показания амперметров при показаниях вольтметра. Значения приложенного напряжения и сопротивлений цепи в табл. 3.1 по номеру варианта. Построить векторную диаграмму напряжения и токов.

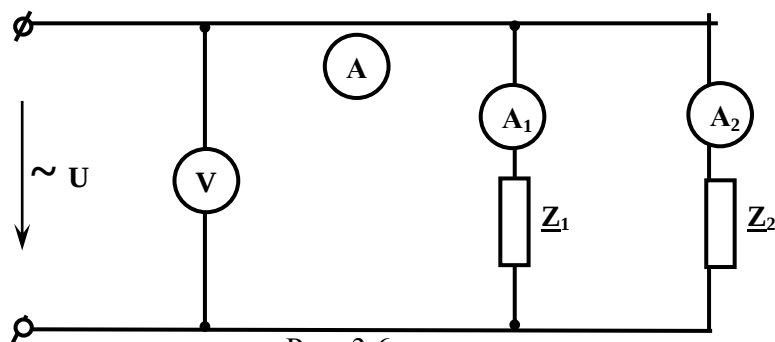


Рис. 3.6

Таблица 3.1

№ варианта	№ варианта	U, В	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом
1	11	127	30	j40
2	12	127	30	-j40
3	13	220	j40	30
4	14	220	-j40	30
5	15	127	$15 + j15$	20
6	16	127	20	$15 + j15$
7	17	220	$15 - j15$	20
8	18	127	20	$15 - j15$
9	19	220	$15 + j15$	j20
10	20	127	-j20	$15 - j15$

Задача № 2. К генератору синусоидального напряжения, действующее значение которого равно U , частота $f = 50$ Гц, подключена цепь, состоящая из двух параллельных ветвей, параметры которых R_k , L_k , C , см. табл. 3.2. Необходимо определить величину C_p , соответствующую резонансу токов; построить кривые токов $I = f(C)$; $I_c = f(C)$; $I_L = f(C)$; $\varphi = f(C)$ при неизменных значениях напряжения U и частоты f . Емкость C изменять в пределах от 0 до $2 C_p$. Определить, при каком значении C ток в цепи становится минимальным. Изобразить эквивалентную схему замещения электрической цепи.

Таблица 3.2

№ варианта	№ варианта	U, В	L_k , м Гн	R_k , Ом
1	11	30	525	21
2	12	35	300	11,8
3	13	40	278	12,2
4	14	30	345	14
5	15	35	210	21
6	16	40	383	17
7	17	45	525	17
8	18	50	300	21
9	19	55	278	14
10	20	60	345	12,2

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- решённые задачи, согласно варианту;
- ответы на контрольные вопросы.

3.4.2. Задание на выполнение работы.

Часть 1.

- Определить экспериментально параметры катушки индуктивности, рассчитать резонансную ёмкость параллельно включенного конденсатора, снять зависимость токов в цепи от ёмкости, построить векторные диаграммы для трёх случаев $C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$ и $C > C_{рез}$.

Часть 2.

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

3.4.3. Порядок выполнения эксперимента.

Часть 1.

- Соберите цепь (принципиальная схема рис. 3.3, монтажная – рис. 3.7), включив в каждую ветвь по мини блоку для подключения амперметра. Коннектор и виртуальные приборы легко заменяются на мультиметры и ваттметр. Конденсаторы в первом опыте не включайте.

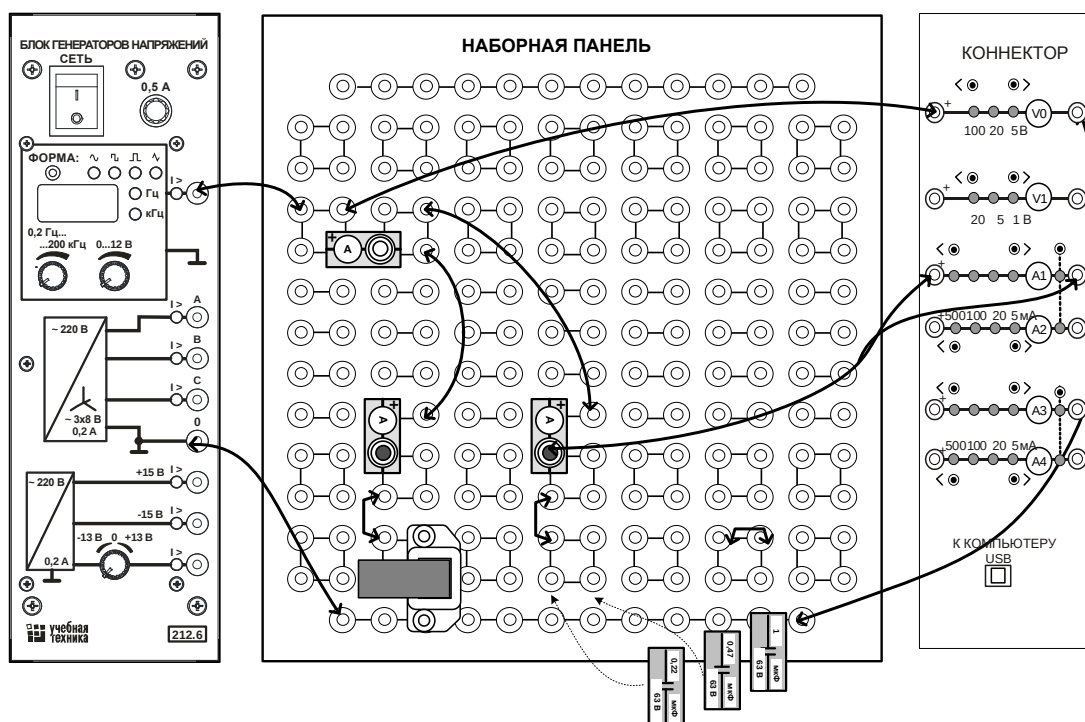


Рис. 3.7. Монтажная схема установки

- Установите частоту питающего напряжения 1000 Гц, максимальную амплитуду и измерьте напряжение, на входе цепи, ток и мощность, потребляемые цепью. Результаты измерений запишите в табл. 3.3.
- Вычислите параметры катушки (либо измерьте их с помощью виртуальных приборов) и ожидаемую резонансную ёмкость. Все формулы приведены в разделе «Общие сведения»
- Устанавливайте параллельно индуктивности поочерёдно различные конденсаторы как показано на рис. 3.5.1, измеряйте и записывайте в табл. 3.4 значения токов в трёх ветвях цепи.
- На рис. 3.5.2 постройте графики изменения токов от ёмкости параллельно включенного конденсатора и по минимуму тока определите фактическую резонансную ёмкость. Сравните её с расчётным значением.
- На рис. 3.5.3 постройте векторные диаграммы для трёх случаев: $C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$ и $C > C_{рез}$. Для резонансного режима значения токов возьмите из графика.

Часть 2.

- Соберите цепь согласно схеме (рис. 3.7), включив в неё измерительные приборы или соответствующие гнезда коннектора. В качестве катушки индуктивности с малым активным сопротивлением используйте обмотку трансформатора $W=300$ витков, вставив между подковами разъёмного сердечника полоски бумаги в один слой. **Монтажная схема такая же, как в части 1 (рис. 3.7).**
- Подайте на схему синусоидальное напряжение от генератора напряжений специальной формы $U = 5$ В, $f = 500$ Гц.

- Измерьте с помощью виртуальных приборов или рассчитайте по показаниям мультиметров реактивное сопротивление катушки индуктивности и рассчитайте индуктивность и резонансную частоту.
- По показанию фазометра или по минимуму тока I настройте резонансный режим, изменяя частоту приложенного напряжения. Сравните экспериментальную резонансную частоту с расчётной.
- Изменяя частоту от 0,2 до 1 кГц, запишите в табл. 3.4 (смотри бланк отчета к лаб. работе) показания виртуальных приборов и по этим результатам на рис. 3.8 и 3.9 (смотри бланк отчета к лаб. работе) постройте графики частотных характеристик.

Примечания:

1. При отсутствии виртуальных приборов запишите в таблицу измеренные мультиметрами токи, а сопротивления рассчитайте по формулам, приведённым в разделе «Общие сведения». При этом фазовый сдвиг можно определить из векторных диаграмм, построенных для каждого значения частоты либо по показаниям ваттметра.
2. В области резонансной частоты экспериментальные точки должны быть расположены гуще, чем по краям графиков.

3.5. Выводы.

В выводах рассмотреть следующие вопросы:

1. Как определяется результирующая проводимость цепи по известным проводимостям элементов.
2. Для каких значений токов и напряжений в цепях переменного тока выполняются первый и второй законы Кирхгофа.
3. При каких соотношениях между индуктивным и емкостным сопротивлениями имеет место резонанс токов.
4. Проанализировать графики частотных характеристик параллельного резонансного контура.

3.6. Контрольные вопросы.

1. Записать формулу комплексной проводимости цепи с параллельным соединением R , L и C .
2. Записать формулу реактивной проводимости цепи с параллельным соединением R , L и C .
3. В каких случаях параллельная цепь R , L и C носит емкостной характер, индуктивный характер, активный характер?
4. Дать определение резонанса токов.
5. Чему равен угол φ при резонансе?
6. Записать формулу резонансной циклической и линейной частот.
7. Какое значение принимает ток при резонансе?
8. Когда токи на реактивных элементах при резонансе будут больше тока в не разветвлённой части цепи?

3.7. Список литературы.

1. ТОЭ. Бессонов Л.А. - М. – Высшая школа, 1973. - С. 146 - 149.
2. ОТЦ. Зевеке Г.В. и др. - М. – Э, 1989. - С.114 - 123.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 4

СНЯТИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

4.1. Цель работы.

1. Исследовать режимы работы нелинейных элементов.
2. Снять характеристики лампы накаливания, стабилитрона и полупроводникового диода.

4.2. Схема лабораторной установки.

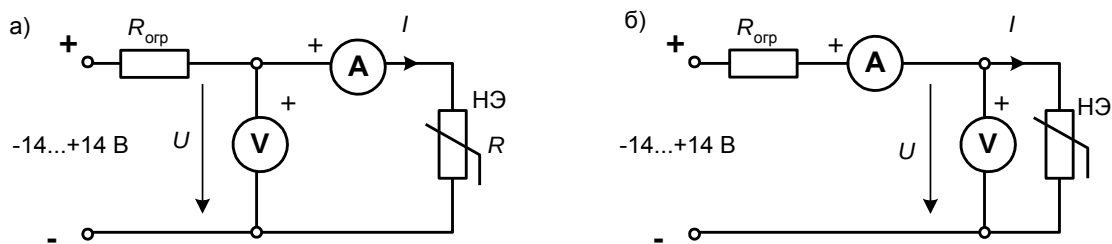


Рис. 4.1. Принципиальная схема установки

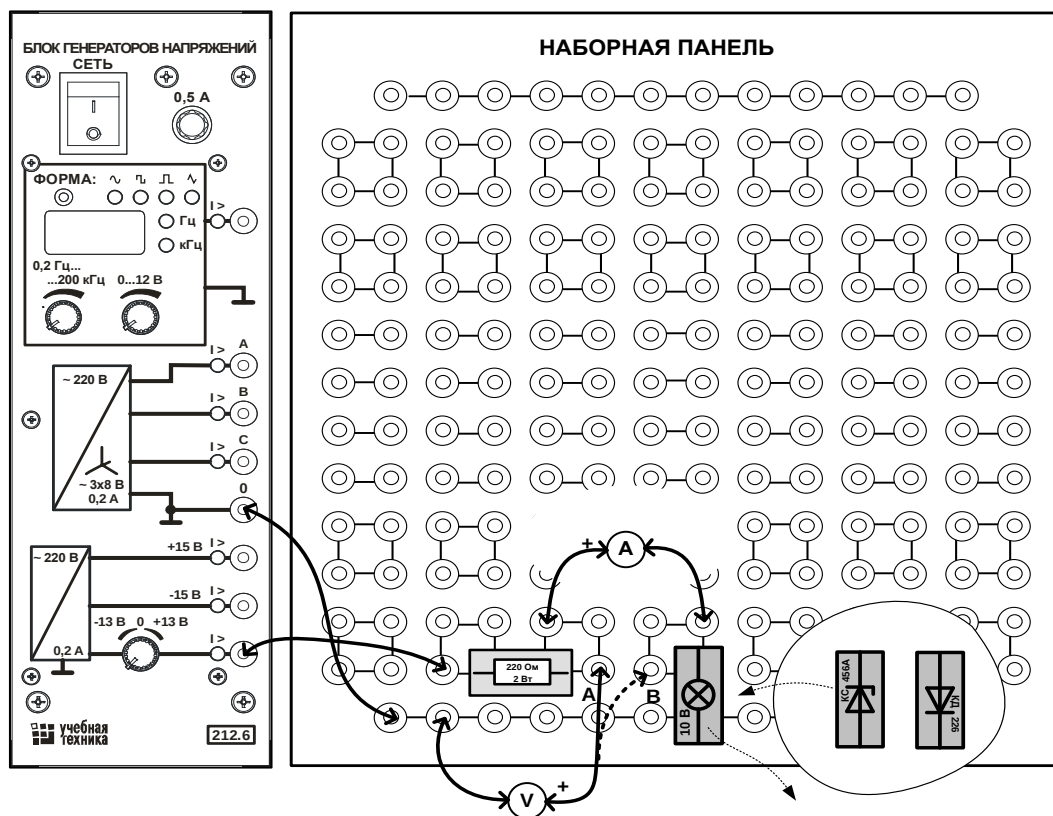


Рис. 4.2. Монтажная схема

4.3. Основные теоретические положения.

Вольтамперная характеристика представляет собой график зависимости напряжения от тока $U(I)$ (или наоборот $I(U)$) на данном элементе электрической цепи. У линейных резисторов вольтамперная характеристика представляет

собой прямую линию $U = RI$ (рис. 4.1). У нелинейных элементов (лампы накаливания, электрическая дуга, диоды, транзисторы и другие электронные приборы) эта зависимость более сложная и часто неоднозначная.



Рис. 4.3

4.4. Порядок проведения работы.

4.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача. Рассчитать токи, проверить баланс мощностей в схеме рис. 4.5, если $U = 80 \text{ В}$, $r_2 = 10 \text{ Ом}$, вольтамперные характеристики нелинейных резисторов заданы таблицей 4.2, номер варианта таблица 4.3:

Таблица 4.2

$U_1, \text{В}$	20	35	46	50	53	54
$I_1, \text{А}$	2	4	6	8	10	12

$U_3, \text{В}$	0	5	20	40	60	90
$I_3, \text{А}$	0	2	4	5,2	6	6,5

Таблица 4.3

Порядковый номер фамилии студента в списке класса	Коэффициент, на который умножаются исходные данные
1 – 10	1
11 – 20	1.2
21 – 30	1.4

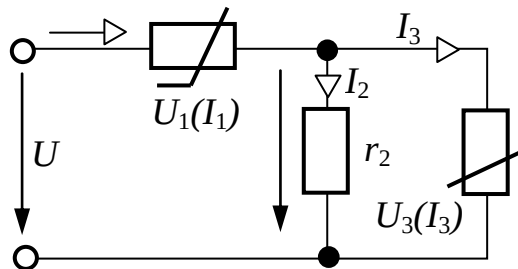


Рис. 4.4

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

4.4.2. Задание на выполнение работы.

Снять экспериментально и построить графики вольтамперных характеристик лампы накаливания, стабилитрона и полупроводникового диода.

4.4.3. Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь (рис. 4.1, а) для снятия вольтамперной характеристики лампы накаливания. Монтажная схема изображена на рис.4.3. Обратите внимание, что вольтметр и амперметр в этой схеме своими положительными клеммами подключены к точке «А».
- Изменяя ток в цепи, как показано в табл. 4.4, (смотри бланк отчета к лаб. работе) запишите в таблицу соответствующие значения напряжения на лампе и на рис. 4.1 постройте график вольтамперной характеристики лампы накаливания.
- Замените лампу накаливания стабилитроном, соблюдая полярность, показанную на рис. 2, (смотри бланк отчета к лаб. работе) и снимите его вольтамперную характеристику, устанавливая либо напряжения, либо токи, указанные в табл. 4.5. Для увеличения точности при отрицательных напряжениях и токах вольтметр должен быть подключён к точке «В», а при положительных – к точке «А». График вольтамперной характеристики стабилитрона постройте также на рис. 4.1.
- Замените стабилитрон диодом и устанавливая токи или напряжения, указанные в табл. 4.6, (смотри бланк отчета к лаб. работе) снимите его вольтамперную характеристику. В этом опыте, наоборот, при отрицательных напряжениях и токах вольтметр должен быть подключён к точке «А», а при положительных – к точке «В». График вольтамперной характеристики стабилитрона постройте на том же рис. 4.4.

4.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Совпадения экспериментальных данных и теоретических.
2. Проанализировать режимы работы нелинейных элементов.

4.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение вольт-амперной характеристике.
2. Дать определение нелинейного элемента. Привести примеры.
3. Дать определение нелинейной электрической цепи.
4. Перечислить методы расчета нелинейных цепей.
5. Привести алгоритм расчёта графическим методом цепь с последовательным соединением линейных и нелинейных элементов.
6. Привести алгоритм расчёта графическим методом цепь с параллельным соединением линейных и нелинейных элементов.
7. Привести алгоритм расчёта графическим методом цепь со смешанным соединением линейных и нелинейных элементов.
8. Охарактеризовать методику расчета графо-аналитическим методом.

4.7. Список литературы.

1. Л.А. Бессонов. ТОЭ. М. – Высшая школа, 1973. стр. 404-412.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат, 1989. стр.578-591.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 5

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЁТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

5.1. Цель работы:

1. Исследовать режимы работы магнитной цепи.
2. Снять экспериментально вебер-амперные характеристики магнитной цепи.

5.2. Схема лабораторной установки.

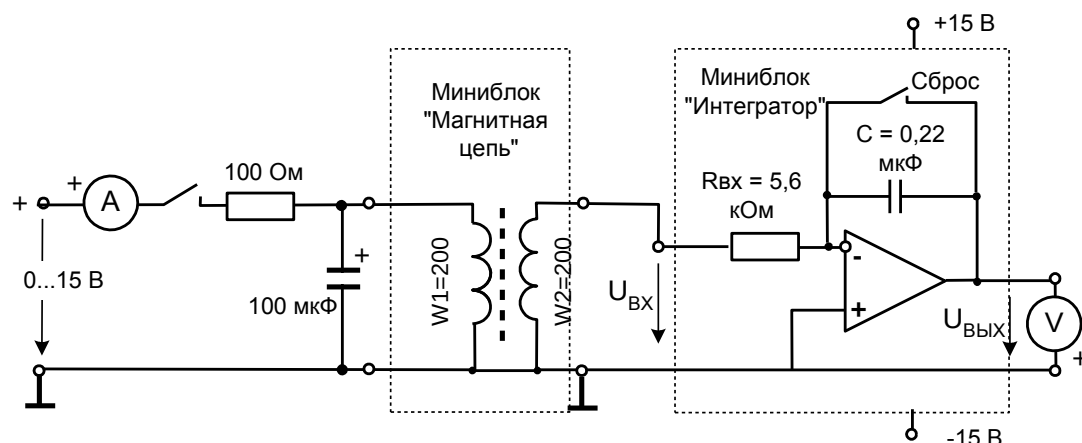


Рис. 5.1. Принципиальная схема установки

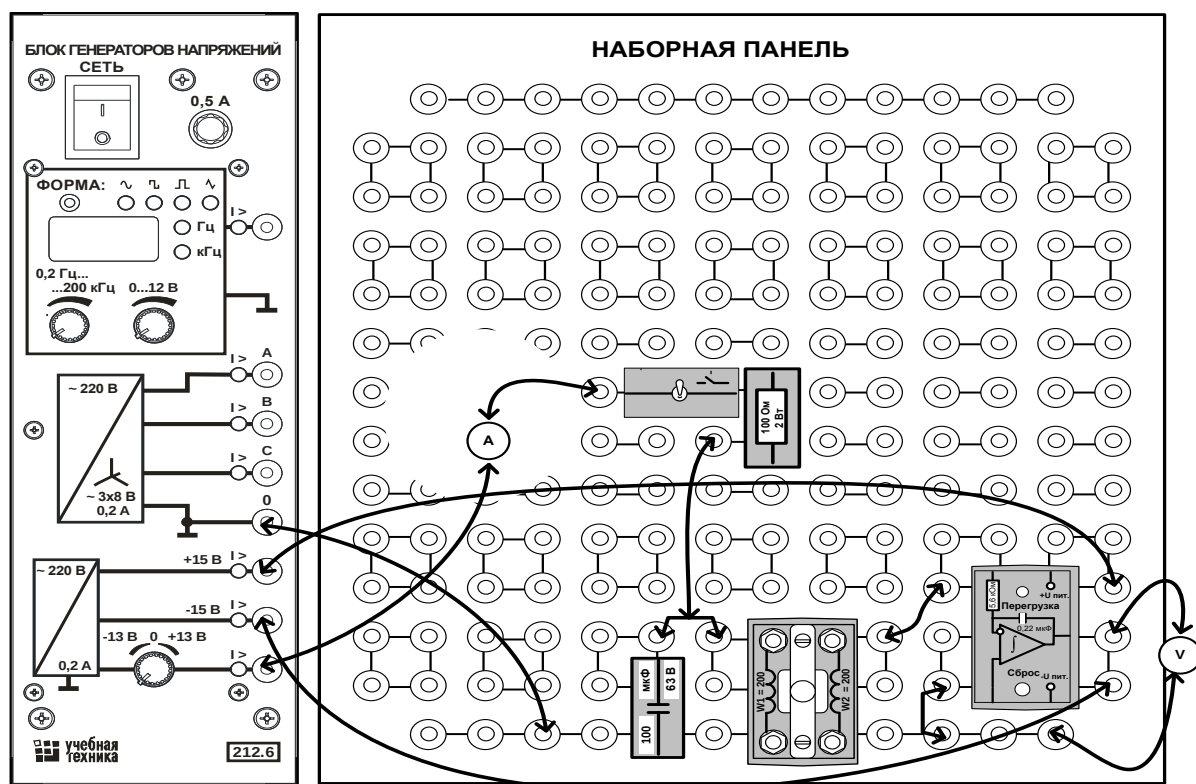


Рис. 5.2. Монтажная схема

5.3. Основные теоретические положения.

Участок магнитной цепи характеризуется вебер-амперной характеристикой, т.е. зависимостью магнитного потока Φ от магнитного напряжения на этом участке Hl , где H – напряжённость магнитного поля, а l – длина участка. В замкнутом контуре магнитной цепи алгебраическая сумма магнитных напряжений всех участков равна алгебраической сумме намагничивающих (магнитодвижущих) сил всех катушек iW ,

$$Hl = iW,$$

где i – ток в катушке, а W – число витков.

Вебер-амперная характеристика неразветвлённой магнитной цепи представляет собой зависимость $\Phi(iW)$. Её можно построить, если известны кривая намагничивания $B(H)$ ферромагнитного материала, из которого сделан магнитопровод, и его геометрические размеры: площадь поперечного сечения S и длина средней линии l каждого участка.

Задаваясь рядом произвольных значений магнитной индукции B_1 для одного из участков магнитной цепи, находим по кривой намагничивания напряжённость H_1 на этом участке, магнитный поток $\Phi = B_1 S_1$ и магнитное напряжение $H_1 l_1$ на этом участке. Считая магнитный поток вдоль всей неразветвлённой цепи одинаковым находим далее магнитную индукцию на втором участке B_2 и находим аналогично H_2 , и $H_2 l_2$. Повторяем этот расчёт для всех участков замкнутой магнитной цепи, находим $Hl = iW$ и строим график $\Phi(iW)$. Для воздушных зазоров магнитной цепи при определении H вместо кривой намагничивания используем зависимость $H = B/\mu_0$, где $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость пустоты.

Принципиальная схема лабораторной установки показана на рис. 1. Конденсатор 100 мкФ включён параллельно катушке $W1$ для предотвращения перенапряжений при отключении цепи и более плавного нарастания напряжения при включении. Кроме того, после отключения цепи в контуре L - C возникают затухающие колебания, и сердечник размагничивается. Для измерения магнитного потока на постоянном токе обычно используется так называемый баллистический метод, основанный на измерении заряда, протекающего по измерительной катушке, намотанной на магнитопровод. При включении цепи на постоянный ток или при её выключении магнитный поток изменяется. При этом, в измерительной катушке индуктируется ЭДС $e = W \frac{d\Phi}{dt}$ и в ней возникает ток $i = \frac{e}{R}$. За время t через измерительную катушку протекает заряд $q = \int i dt = \int \frac{W}{R} \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{W\Phi}{R}$, где R – сопротивление контура с измерительной катушкой.

Для измерения заряда раньше часто использовался баллистический гальванометр, отклонение подвижной части которого пропорционально заряду протекшего через него за короткое время. Отсюда этот метод получил название баллистического. В данной работе вместо баллистического гальванометра используется интегрирующий усилитель. Приращение напряжения на его выходе пропорционально интегралу от тока, протекающего через его входные

зажимы. Если начальное напряжение на выходе усилителя равно нулю, то после протекания заряда q на его выходе устанавливается напряжение $U_{\text{вых}} = q/C$, где C – ёмкость в обратной связи интегратора.

Подставляя в эту формулу выражение заряда через магнитный поток, получим:

$$\Phi = \frac{RC}{W} U_{\text{вых}},$$

где R и C – параметры интегрирующего усилителя, указанные на его этикетке.

При измерениях следует иметь в виду, что даже при отсутствии напряжения на входе интегратора, напряжение на его выходе медленно изменяется (дрейфует) вследствие несовершенства интегратора и внешних помех. Поэтому, непосредственно перед включением или выключением цепи нужно «обнулить» интегратор, замкнув на 2...3 с выключатель «Сброс», а отсчёт выходного напряжения произвести после включения или выключения цепи в течение нескольких секунд. Для увеличения достоверности результатов рекомендуется произвести несколько включений и выключений и записать среднее значение выходного напряжения. Исследуемая магнитная цепь схематично показана на рис. 5.3.

Магнитопровод выполнен из двух Ш-образных ферритовых сердечников марки М2000НМ. На среднем стержне магнитопровода расположены две одинаковые обмотки (намагничивающая и измерительная) по 200 витков каждая. Зазор может регулироваться винтом. Для устранения перекоса сердечника рекомендуется в левый и правый зазоры вставить немагнитные прокладки (например, полоски бумаги) и осторожно от руки затянуть винт. Так, например, толщина бумаги «Снегурочка» для офисной техники 0,1 мм, толщина газетной бумаги - 0.05...0,06 мм. Будьте осторожны: большое усилие при затягивании винта может привести к разлому печатной платы, на которой смонтирована вся конструкция! Необходимые для расчёта размеры сердечника приведены на рис. 5.4, а кривая намагничивания феррита М2000НМ – на рис. 5.5.

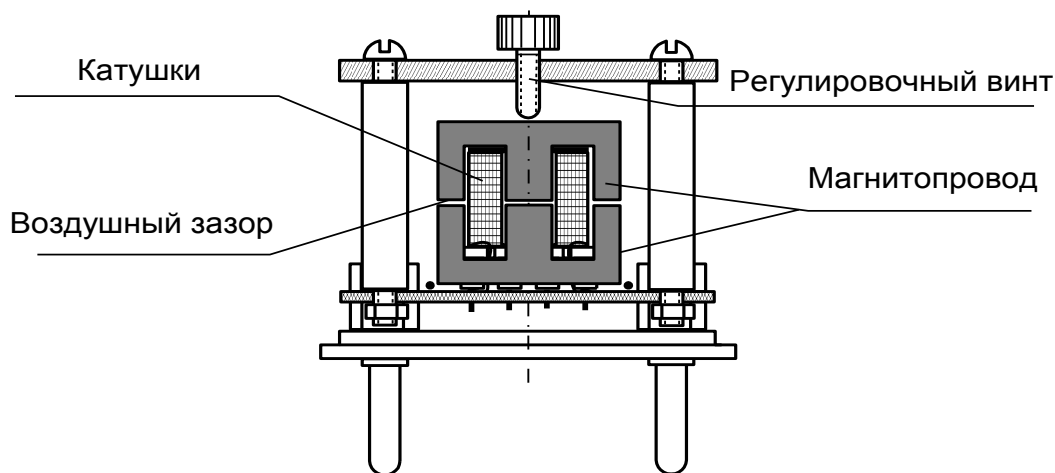


Рис. 5.3

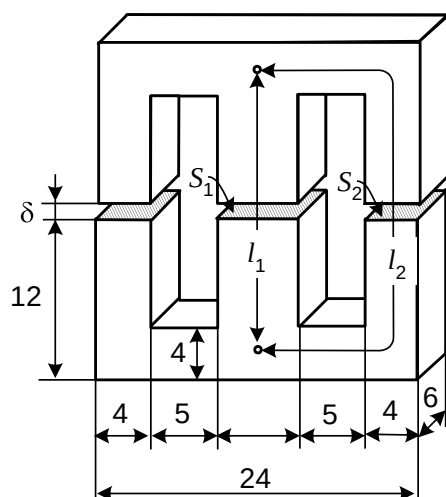


Рис. 5.4

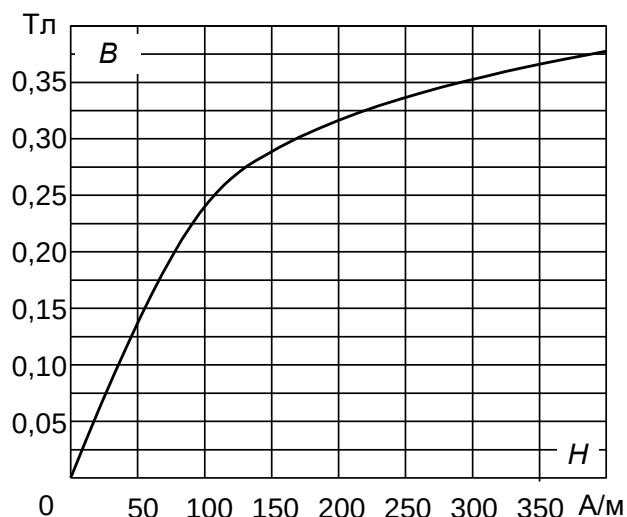


Рис. 5.5

5.4. Порядок проведения работы.

5.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача. На рис. 5.6 изображен магнитопровод, выполненный из электротехнической стали 1511 (кривая намагничивания таблица 5.1). Определить значение намагничивающего тока I , если даны сечения участков S_1 , S_2 , S_3 , длины участков l_1 , l_2 , l_3 и количество витков обмотки W и магнитный поток Φ (значения в таблице 2 по номеру варианта).

Таблица 5.1

$B, Tл$	0,14	0,35	0,55	0,62	0,76	0,88	0,98	1,03	1,09	1,17	1,23	1,3
$H, A/м$	20	40	60	80	100	140	180	240	500	600	800	1000

Таблица 5.2

№ варианта	$l_1, м$	$l_2, м$	$l_3, м$	$S_1, м^2$	$S_2, м^2$	$S_3, м^2$	W	$\Phi, Вб$
1	0,6	0,2	0,1	0,007	0,002	0,007	10	$1,0 \cdot 10^{-3}$
2	0,7	0,3	0,2	0,008	0,003	0,008	15	$1,2 \cdot 10^{-3}$
3	0,8	0,4	0,3	0,009	0,004	0,009	10	$1,3 \cdot 10^{-3}$
4	0,9	0,5	0,1	0,01	0,002	0,01	15	$1,4 \cdot 10^{-3}$
5	1,0	0,6	0,2	0,015	0,003	0,015	10	$1,5 \cdot 10^{-3}$
6	0,6	0,2	0,3	0,007	0,004	0,007	15	$1,0 \cdot 10^{-3}$
7	0,7	0,3	0,1	0,008	0,002	0,008	10	$1,2 \cdot 10^{-3}$
8	0,8	0,4	0,2	0,009	0,003	0,009	15	$1,3 \cdot 10^{-3}$
9	0,9	0,5	0,3	0,01	0,004	0,01	10	$1,4 \cdot 10^{-3}$
10	1,0	0,6	0,1	0,015	0,002	0,015	15	$1,5 \cdot 10^{-3}$

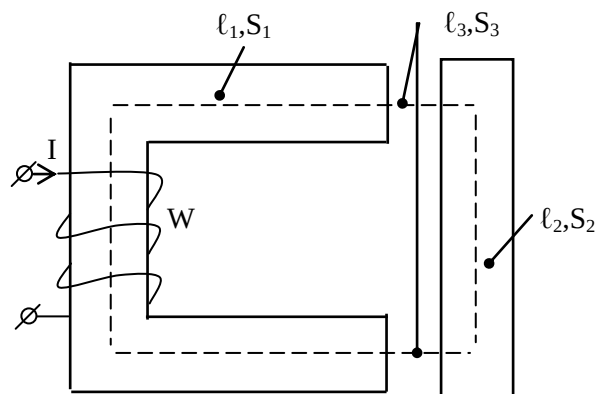


Рис. 5.6

Таблица 5.3

Порядковый номер фамилии студента в списке класса	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы 2
1 – 10	1
11 – 20	1.2
21 – 30	1.4

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

5.4.2. Задание на выполнение работы.

Снять экспериментально вебер-амперные характеристики магнитной цепи без зазора, а также с зазорами 0,06 и 0,1 мм. Сделать расчёт характеристики без зазора и с одним из зазоров. Сравнить результаты.

5.4.3. Порядок выполнения эксперимента.

- Соберите электрическую цепь согласно принципиальной схеме (рис. 5.1) и монтажной схеме (рис. 5.2). Конденсатор 100 мкФ в этой цепи установлен для того, чтобы после отключения цепи в контуре L-С возникали затухающие колебания, и сердечник размагничивался.
- Устраните зазор в магнитной цепи, завернув до отказа регулировочный винт усилием «от руки». Переключите интегратор в положение «Сброс» (верхнее положение переключателя), включите генератор напряжений и установите первое значение тока из табл. 3. Убедитесь, что напряжение на выходе равно нулю.
- Включите интегрирование, и тотчас отключите ток выключателем на входе цепи. В течение двух – трёх секунд после этого запомните значение напряжения на выходе интегратора.
- Снова произведите сброс, включите интегрирование и тотчас включите выключатель на входе цепи. Снова запомните показание вольтметра на

выходе. Оно должно быть примерно такое же, как и при выключении, только с другим знаком.

- Прodelайте операции включения и выключения несколько раз и запишите в таблицу (смотри бланк отчета к лаб. работе) среднее или наиболее часто повторяющееся значение.
- Установите следующее значение тока и повторите операции выключения и включения.
- Повторите опыт при всех значениях тока, указанных в табл. 3, рассчитайте магнитный поток $\Phi = U_{\text{вых}} \cdot RC/W$ и магнитодвижущую силу IW . Постройте экспериментальные графики $\Phi(IW)$ на рис. 5.7 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Установите второе значение зазора и повторите опыт при значениях тока, указанных для этого зазора. Постройте графики на том же рис. 5.7 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Прodelайте эти же опыты для третьего значения зазора и также постройте графики.
- На рис. 5.8 постройте две рассчитанные характеристики $\Phi(IW)$ и сравните их с опытными.

5.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Совпадения экспериментальных и теоретических данных.
2. Проанализировать вебер-амперные характеристики магнитной цепи.

5.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение магнитной цепи.
2. Изобразить типовую кривую намагничивания ферромагнитного материала.
3. Сформулировать основной закон магнитной цепи.
4. Сформулировать первый закон Кирхгофа для магнитной цепи.
5. Сформулировать второй закон Кирхгофа для магнитной цепи.
6. Что понимают под основной кривой намагничивания стали?
7. Какое вещество называют ферромагнитом?
8. В чем отличие ферромагнита от ферримагнита?

5.7. Список литературы.

1. Л.А.Бессонов. ТОЭ. М. – Высшая школа, 1973. - С. 423 - 438.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат, 1989. - С.600 - 610.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ КАТУШЕК

6.1. Цель работы:

1. Исследовать режимы работы индуктивно связанных катушек.
2. Определить экспериментально одноимённые зажимы и параметры катушек R_1 , R_2 , L_1 , L_2 , M .

6.2. Схема лабораторной установки.

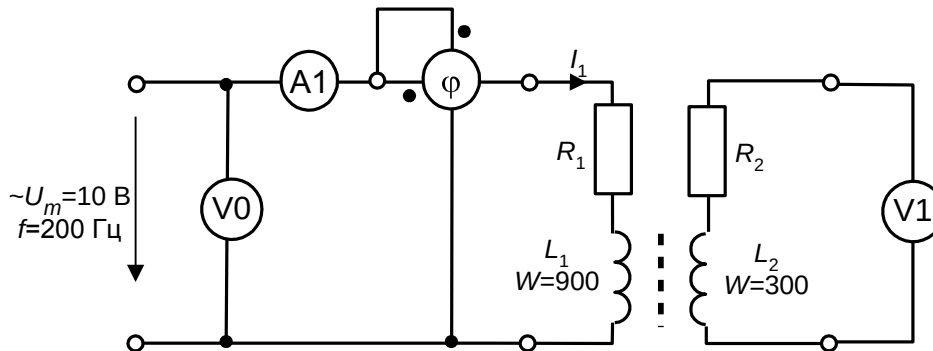


Рис. 6.1. Принципиальная схема установки

6.3. Основные теоретические положения.

Когда по одной из индуктивно связанных катушек протекает ток, часть создаваемого им магнитного потока сцепляется с витками другой катушки. Взаимная индуктивность M – это коэффициент пропорциональности между потокоцеплением одной катушки, создаваемым током в другой катушке и величиной этого тока. При изменении тока в первой катушке в ней возникает ЭДС самоиндукции, а во второй – ЭДС взаимной индукции. Также и наоборот, при изменении тока во второй катушке в ней возникает ЭДС самоиндукции, а в первой – ЭДС взаимной индукции.

Параметрами индуктивно связанных катушек являются индуктивности катушек L_1 и L_2 , взаимная индуктивность $M_{12} = M_{21} = M$ и активные сопротивления катушек R_1 и R_2 . Иногда используют также коэффициент связи $k_{св} = M/\sqrt{L_1 L_2}$, который никогда не превышает единицы. На рис.6.2 изображена цепь, из двух индуктивно связанных катушек. На схеме обозначены точками одноимённые зажимы. При одинаковых направлениях токов относительно одноимённых зажимов, их магнитные потоки складываются, а при разных – вычитаются. Для экспериментального определения одноимённых зажимов можно на одну из катушек подать постоянное напряжение, а к другой подключить миллиамперметр (или вольтметр) магнитоэлектрической системы. В момент включения возникает кратковременный ток во второй катушке. Если этот ток положительный (отброс стрелки вправо), то одноимёнными являются зажимы, подключенные к «+» источника и к «+» измерительного прибора. Этот опыт можно проделать и с использованием цифровых приборов, только из-за дискретности отсчётов прибора не каждый раз удаётся зафиксировать кратковременный отброс показаний прибора.

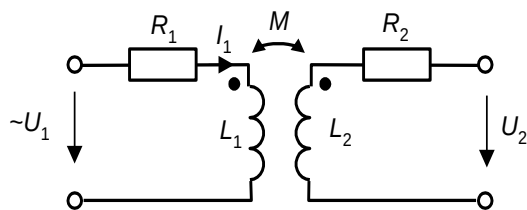


Рис. 6. 2

Если синусоидальное напряжение источника приложено только к первой катушке, а вторая катушка разомкнута, то согласно законам Кирхгофа эта цепь описывается следующими двумя уравнениями в комплексной форме:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1; \\ \dot{U}_2 &= j\omega M\dot{I}_1.\end{aligned}\quad (1)$$

Аналогично, если ко второй катушке приложено напряжение, а первая разомкнута то:

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= (R_2 + j\omega L_2)\dot{I}_2; \\ \dot{U}_1 &= j\omega M\dot{I}_2.\end{aligned}\quad (2)$$

Если две катушки имеют одинаковые размеры и форму то их индуктивности пропорциональны квадрату числа витков, т.е. $L_2 = L_1 W_2^2 / W_1^2$. С учётом выражений (1) для таких катушек получим:

$$k_{св} = \frac{W_1 M}{W_2 L_1} = \frac{W_1 U_2}{W_2 U_1 \sin \varphi},$$

где U_1 и U_2 – напряжения на первой и второй катушках, когда первая катушка подключена к источнику питания, а вторая разомкнута; φ – угол сдвига тока и напряжения в первой катушке.

Для экспериментального определения параметров катушек необходимо проделать два опыта. В первом опыте подать синусоидальное напряжение на первую катушку и измерить напряжения U_1 и U_2 , ток I_1 и мощность P_1 . Мощность измеряется для расчёта угла сдвига фаз, поэтому, если есть такая возможность, измеряют непосредственно этот угол. Во втором опыте аналогичные измерения делают при подаче питания на вторую катушку. Затем по результатам первого опыта вычисляют параметры по формулам, вытекающим из уравнений (1):

$$z_1 = \frac{U_1}{I_1}; L_1 = \frac{z_1}{\omega} \sin \varphi_1; R_1 = z_1 \cos \varphi_1; M_{21} = \frac{U_2}{\omega I_1}, \quad \text{где } \varphi_1 = \arctg \frac{P_1}{U_1 I_1}.$$

Аналогично, по результатам второго опыта и из уравнений (2):

$$z_2 = \frac{U_2}{I_2}; L_2 = \frac{z_2}{\omega} \sin \varphi_2; R_2 = z_2 \cos \varphi_2; M_{12} = \frac{U_1}{\omega I_2}; \quad \text{где } \varphi_2 = \arctg \frac{P_2}{U_2 I_2}.$$

Причём, должно выполняться равенство $M_{21} = M_{12}$.

Взаимная индуктивность между элементами сложной цепи может, как увеличивать, так и уменьшать эквивалентную индуктивность. Рассмотрим две возможные схемы последовательного соединения двух индуктивно связанных

катушек (рис. 6.3, а и 6.3, б). Первый случай называется согласным включением катушек, второй – встречным.

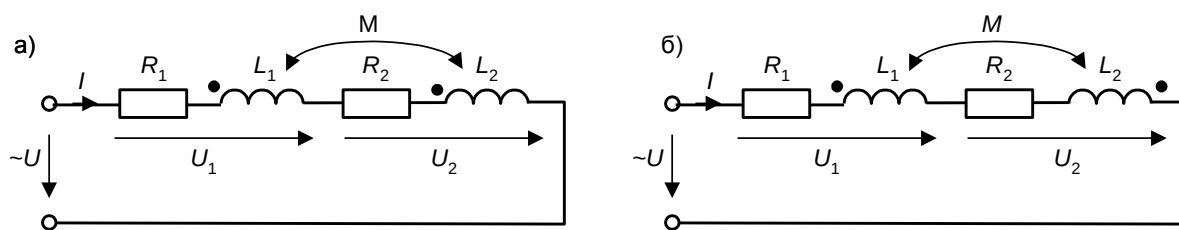


Рис. 6.3

В первом случае:

$$\vec{U} = \vec{U}_1 + \vec{U}_2 = [(R_1 + j\omega L_1)\vec{I}_1 + j\omega M\vec{I}_2] + [(R_2 + j\omega L_2)\vec{I}_2 + j\omega M\vec{I}_1] .$$

Поскольку при последовательном соединении $\vec{I}_1 = \vec{I}_2 = \vec{I}$, получим:

$$\vec{U} = (R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)\vec{I} ,$$

т.е. эквивалентная индуктивность при последовательном согласном включении двух катушек:

$$L'' = L_1 + L_2 + 2M .$$

Аналогично при последовательном встречном включении получим:

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M .$$

Отсюда вытекает ещё один способ определения взаимной индуктивности. Вычитая последнее уравнение из предыдущего, получим:

$$L'_3 - L''_3 = 4M , \text{ откуда } M = \frac{L'_3 - L''_3}{4} .$$

Измерив индуктивности цепи при согласном и встречном включениях катушек, по этой формуле можно определить взаимную индуктивность.

6.4.Порядок проведения работы.

6.4.1 Задание на подготовку к работе

Задача Электрическая цепь состоит из последовательно соединенных источника синусоидального напряжения с ЭДС E и двух индуктивно-связанных катушек. Параметры первой катушки R_1, L_1 ; параметры второй катушки R_2, L_2 . Взаимная индуктивность между катушками M . На частоте ω при согласном включении катушек вольтметр, подключенный к первой катушке, показывает напряжение U_1 . Определить показания вольтметра при встречном включении катушек. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на всех активных и реактивных элементах цепи, при согласном и встречном соединении катушек.

Исходные данные берутся из таблицы 6.1 в соответствии с вариантом и с учетом табл. 6.2.

Таблица 6.1

	№1	№2	№3	№4	№5	№6
$R_1, \text{ Ом}$	3	4	5	6	7	8
$L_1, \text{ Гн}$	10	9	15	10	20	30
$R_2, \text{ Ом}$	7	6	5	8	9	10
$L_2, \text{ Гн}$	20	15	30	35	40	45
$M, \text{ Гн}$	10	12	14	16	18	20

ω , рад/с	200	100	50	200	100	50
U_1 , В	10	20	30	15	25	35

Таблица 6.2

Порядковый номер фамилии студента в списке класса	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы 6.1
1 – 6	1
7 – 12	2
13 – 18	3
18 – 24	4
25 – 30	5

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

6.4.2. Задание на выполнение работы.

Определить экспериментально одноимённые зажимы и параметры катушек R_1 , R_2 , L_1 , L_2 , M . Исследовать влияние ферромагнитного сердечника на коэффициент связи. Измерить эквивалентную индуктивность цепи при последовательном согласном и встречном включениях катушек.

6.4.3. Порядок выполнения эксперимента

- С помощью мультиметра определите сначала одноимённые зажимы катушек трансформатора с $W_1 = 900$ и $W_2 = 300$ и разборным сердечником из набора миниблоков как описано в общих сведениях. В этом опыте используйте нерегулируемый источник постоянного напряжения +15 В, а для ограничения тока в катушке включите последовательно с ней сопротивление 10...50 Ом.
- Соберите цепь по принципиальной схеме, изображённой на рис.6.1. Все приборы в этой схеме виртуальные.
- Включите компьютер, активизируйте виртуальные приборы V0, V1, и A1.
- Активизируйте из группы приборов II измеритель фаз и частотомер.
- Запрограммируйте третий виртуальный прибор из группы II для вычисления коэффициента связи. Если в Вашем опыте $W_1 = 900$, $W_2 = 300$, V0 соответствует окну виртуальных приборов x1, V1 – x2, A1 – x3 и φ – x7, то формула, которую необходимо ввести в окно третьего виртуального прибора будет выглядеть так:

$$y = 3 * x2 / (x1 * \sin(x7 * 3,14 / 180)).$$

Не забудьте при этом аргументы x1, x2, x7 ввести в окна, расположенные над формулой и нажать клавишу «Начать счёт».

- Подайте на цепь питание, установите оптимальные пределы измерения на коннекторе и запишите показания приборов в табл. 6.3 (смотри бланк отчета к лаб. работе).

- Разберите трансформатор, вставьте между половинками сердечника полоски бумаги в 3...4 слоя, вновь соберите и сделайте аналогичные измерения при наличии воздушного зазора. При необходимости скорректируйте при этом пределы измерения. Запишите показания приборов в табл. 6.3 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Выдвиньте верхнюю половину сердечника на 0,5...1 см, удерживая его рукой, скорректируйте пределы измерения и запомните, как изменился коэффициент связи. Прodelайте этот опыт, выдвинув половинку сердечника на ещё большее расстояние, и затем полностью удалите её. Последний результат запишите в табл. 6.3 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Удалите теперь нижнюю половинку сердечника и вводя в катушки и удаляя верхнюю половинку наблюдайте за изменением коэффициента связи. При необходимости корректируйте пределы измерения. Результаты измерений без сердечника также запишите в табл. 6.2 (смотри бланк отчета к лаб. работе) и сделайте выводы.
- Определите теперь параметры z_1 , L_1 , M_{21} , R_1 по формулам, приведённым в разделе «Общие сведения» и экспериментальным данным табл. 6.4. Результаты расчёта сведите в табл. 6.3. (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Для одного из рассмотренных четырёх случаев проделайте опыт при подаче питания на вторую катушку, повернув трансформатор на 180° в наборной панели. Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 6.5, указав в верхней строке наличие сердечника, его половины или зазора (смотри бланк отчета к лаб. работе)
- Включите две катушки сначала последовательно согласно, затем последовательно встречно, сделайте измерения и рассчитайте эквивалентные параметры. Результаты запишите в табл. 6. Рассчитайте также эквивалентные параметры по результатам предыдущих опытов. и сравните результаты.

$$L'' = L_1 + L_2 + 2M = \dots$$

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M = \dots$$

$$M = \frac{L'_2 - L''_2}{4}$$

6.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Совпадения экспериментальных и теоретических данных.
2. Проанализировать влияние ферромагнитного сердечника на коэффициент связи.

6.6. Контрольные вопросы.

1. Какими методами можно определить взаимную индуктивность двух индуктивно -связанных катушек?
2. Как определить коэффициент индуктивной связи?
3. Дать определение понятию взаимная индуктивность.
4. Какие зажимы называют одноименные у индуктивно-связанных элементов?

5. Как выполняется обозначение одноименных зажимов индуктивно-связанных элементов.
6. Записать формулы определяющие параметры и коэффициент мощности цепи при согласном и встречном включении катушек.
7. Каковы условия возникновения емкостного эффекта при последовательном соединении индуктивно-связанных элементов?
8. Дать характеристику емкостному эффекту в цепи с индуктивно-связанными элементами.

6.7. Список литературы.

1. Л.А. Бессонов ТОЭ. М. – Высшая школа, 1973. - С. 119 - 122.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат, 1989. - С.184 - 192.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

7.1. Цель работы:

1. Исследовать режимы работы трансформатора.
2. Прodelать опыты холостого хода и короткого замыкания и определить основные параметры трансформатора, снять нагрузочную характеристику и зависимость КПД от нагрузки.

7.2.1. Схема лабораторной установки.

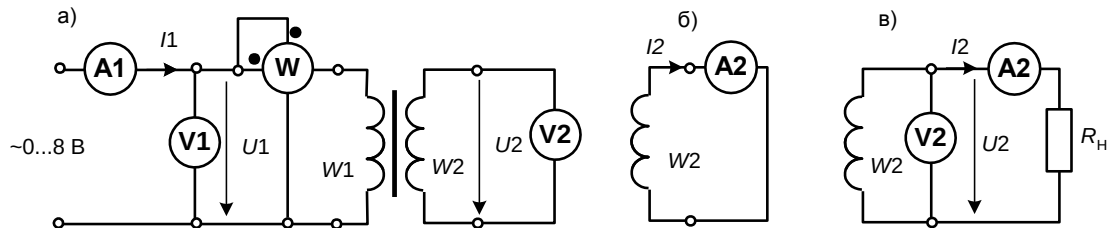


Рис. 7. 1. Принципиальная схема установки

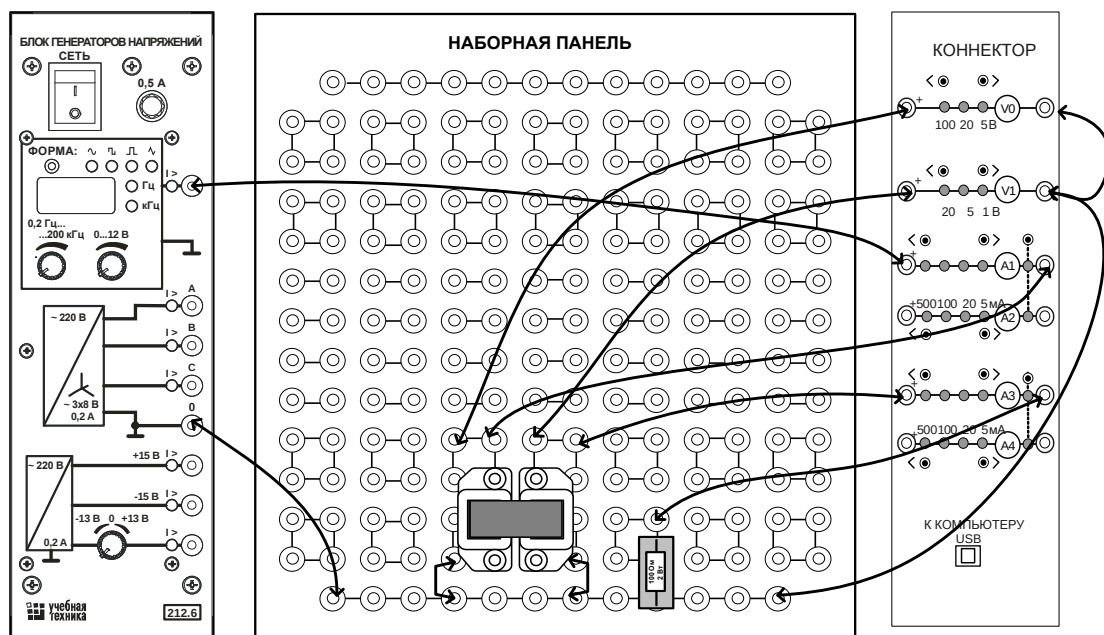


Рис 7. 2. Монтажная схема

7.3. Основные теоретические положения.

Трансформатор представляет собой статическое (т.е. без подвижных частей) устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в ток другого напряжения той же частоты. Он состоит из замкнутого магнитопровода, на котором расположены две или более катушки (обмотки). В двухобмоточном трансформаторе к одной из обмоток (первичной) подводится напряжение от источника питания, к другой (вторичной) подключается нагрузка. Если числа витков этих катушек соответственно W_1 и W_2 , то их отношение называется коэффициентом трансформации (K_T). На

холостом ходу (при разомкнутой вторичной обмотке) это отношение равно также отношению напряжений на первичной и вторичной обмотках. При коротком замыкании вторичной обмотки оно равно обратному отношению токов в обмотках. Таким образом:

$$K_T = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_{1X}}{U_{2X}} = \frac{I_{2K}}{I_{1K}},$$

где U_{1X} и U_{2X} – первичное и вторичное напряжения холостого хода, а I_{1K} и I_{2K} – первичный и вторичный токи короткого замыкания.

Если $W_1 > W_2$, то трансформатор называется понижающим, так как он понижает напряжение ($U_2 < U_1$), если же $W_1 < W_2$, то повышающим.

Испытания трансформатора обычно включают три опыта: опыт холостого хода (ХХ), опыт короткого замыкания (КЗ) и снятие нагрузочной (внешней) характеристики $U_2(I_2)$. Схемы этих опытов показаны на рис. 7.1, а, б и в. Схема первичной цепи в этих опытах не меняется, а к вторичной обмотке в опыте ХХ подключается вольтметр, в опыте КЗ – амперметр, а в нагрузочном режиме – вольтметр, амперметр и нагрузочный резистор.

Опыт холостого хода проводится при номинальных напряжениях. Индуктивности катушек трансформатора с замкнутым магнитопроводом очень велики, поэтому трансформатор потребляет от источника питания лишь небольшой ток, называемый током намагничивания. Однако он сдвинут относительно напряжения не точно на 90° , как следовало бы ожидать для индуктивности, а на несколько меньший угол. Это означает, что при холостом ходе трансформатор потребляет, хотя и небольшую активную мощность. Эта мощность расходуется на перемагничивание магнитопровода и на потери от вихревых токов, возникающих в сердечнике. В обмотках трансформатора мощность практически не потребляется так как в первичной ток очень мал, а во вторичной вообще равен нулю. Из опыта холостого хода определяют ток холостого хода (обычно в % от номинального тока), потери мощности в магнитопроводе и коэффициент трансформации.

Опыт короткого замыкания проводят при пониженном напряжении питания. Оно должно быть таким, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи. При коротком замыкании напряжения на первичной обмотке трансформатора мало, а на вторичной вообще равно нулю. Напряжение на первичной обмотке обусловлено лишь активными сопротивлениями провода обмоток и реактивными сопротивлениями рассеяния. Потерь в сердечнике при таком низком напряжении практически нет.

Из опыта короткого замыкания определяют напряжение короткого замыкания (падение напряжения на обмотках, обычно в % от номинального напряжения), потери мощности в обмотках и также коэффициент трансформации.

В нагрузочном режиме с увеличением тока нагрузки (I_2) напряжение изменяется вследствие увеличения падений напряжения в обмотках трансформатора. Вид этой характеристики зависит от характера нагрузки (активная, индуктивная, ёмкостная или смешанная). При активной, индуктивной и активно-индуктивной нагрузке с увеличением тока нагрузки I_2

напряжение U_2 уменьшается, при ёмкостной, и активно-ёмкостной – может и возрасти. При возрастании тока нагрузки изменяется также коэффициент полезного действия трансформатора: $\text{КПД} = P_2/P_1$, где P_2 – мощность, потребляемая нагрузкой, а P_1 – мощность, отдаваемая источником. При холостом ходе $I_2 = 0$ и $P_2 = 0$, поэтому и $\text{КПД} = 0$. При коротком замыкании $U_2 = 0$ $I_2 = I_{2\text{ ном}}$, но $P_2 = 0$, поэтому также $\text{КПД} = 0$. Значит, при увеличении тока нагрузки КПД сначала возрастает, затем проходит через максимум и затем снова падает. Трансформаторы конструируют обычно таким образом, чтобы максимальный КПД имел место при нагрузке несколько меньше номинальной, так как чаще всего он работает с нагрузкой ниже номинальной.

При построении нагрузочной характеристики и графика изменения КПД по оси абсцисс откладывают ток нагрузки в % от номинального тока, а по оси ординат – вторичное напряжение в % от номинального напряжения и КПД также в %. В данной работе снимаются характеристики трансформатора с разъемным сердечником и сменными катушками. Номинальные параметры этого трансформатора приведены в таб.7.1.

Таблица 7.1

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. Порядок проведения работы.

7.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача. Трансформатор, содержащий в первичной обмотке W_1 витков, включён в сеть напряжением U_1 . Во вторичную цепь трансформатора, имеющую W_2 витков, включён резистор сопротивлением R. Найти силу тока во вторичной цепи, если падение напряжения на ней U_2 .

Исходные данные берутся из таблицы 7.1, в соответствии с вариантом и с учетом таблицы 7.2.

Таблица 7. 2

	№1	№2	№3	№4	№5	№6
W_1	500	400	530	450	550	520
U_1 , В	150	140	130	120	135	125
W_2	165	160	155	150	145	140
R, Ом	80	77	75	73	70	67
U_2 , В	50	47	43	40	37	35

Таблица 7.3

Порядковый номер фамилии студента в списке класса	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы 7.1
1 – 6	1
7 – 12	2
13 – 18	3
18 – 24	4
25 – 30	5

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

7.4.2. Задание на выполнение работы.

Проделать опыты холостого хода и короткого замыкания и определить основные параметры трансформатора, снять нагрузочную характеристику и зависимость КПД от нагрузки.

7.4.3. Порядок выполнения эксперимента.

- Соберите трансформатор с числом витков $W_1 = 300$, $W_2 = 100, 300$ или 900 по указанию преподавателя.
- Соберите цепь по монтажной схеме (рис.7.2). Нагрузочный резистор пока не включайте. Ваттметр и мультиметры заменяются виртуальными приборами.
- Включите и активизируйте виртуальные приборы. Включите генератор, установите на его выходе частоту 50 Гц и напряжение 7 В, сделайте измерения при холостом ходе ($R_H = \infty$) и запишите результаты в табл. 7.4. (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Вычислите или измерьте угол сдвига тока и напряжения φ вычислите коэффициент трансформации U_1/U_2 , ток холостого хода $I_{xx}\%$ и тоже запишите их значения в табл.7.4 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Прделайте опыт короткого замыкания. Для этого вставьте перемычку вместо R_H . Отрегулируйте напряжение источника так, чтобы первичный ток стал равен номинальному току (200 мА) обмотки 300 витков. Запишите результаты измерений в табл. 7.5 (смотри бланк отчета к лаб. работе). Вычислите φ , коэффициент трансформации I_2/I_1 , напряжение короткого замыкания $U_{кз}\%$ и тоже запишите в таблицу.
- Снимите нагрузочную характеристику трансформатора. Для этого включайте поочерёдно сопротивления нагрузки, указанные в табл.7.6 (с учётом примечания к табл.) и делайте измерения с первичной и с вторичной стороны трансформатора.
- Рассчитайте $P_2 = U_2 \cdot I_2$, $I_2 / I_{2ном}$, $U_2 / U_{2ном}$, КПД (Номинальные параметры обмоток указаны в табл. 1).

Примечание: В табл. 2 указаны значения сопротивлений R_H 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.

7.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Совпадения экспериментальных и теоретических данных.
2. Проанализировать нагрузочную характеристику и зависимость КПД трансформатора от нагрузки.

7.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение трансформатора.
2. Сформулировать порядок проведения опыта холостого хода.
3. Охарактеризовать работу трансформатора в режиме холостого хода, записать формулы, определяющие его параметры.
4. Какое напряжение подводится к первичной обмотке при опыте короткого замыкания?
5. Как расходуется мощность, трансформатором в режиме короткого замыкания?
6. Записать формулу коэффициента трансформации.
7. Дать определение понятия коэффициент полезного действия трансформатора.
8. Какие трансформаторы называют повышающие, а какие понижающие?

7.7. Список литературы.

1. Л.А. Бессонов. ТОЭ. М. – Высшая школа, 1973. - С. 117 - 119.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат, 1989. - С.199 - 202.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ В ЗВЕЗДУ, АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

8.1. Цель работы.

1. Исследовать симметричные и несимметричные режимы работы цепи при соединении нагрузки в звезду.
2. Исследовать аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

Часть 1. Исследование трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

8.2.1. Схема лабораторной установки.

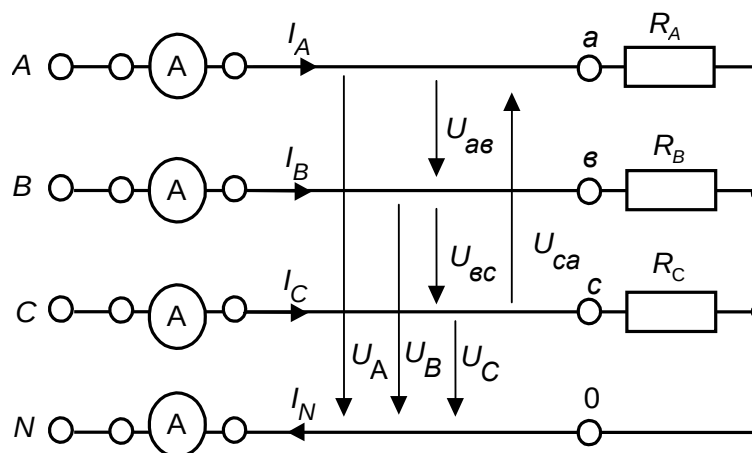


Рис. 8.1. Принципиальная схема установки

8.3.1. Основные теоретические положения.

Если нагрузки (приемники) соединены в трехфазную цепь по схеме «звезда» (рис. 8.1), то к сопротивлениям нагрузки приложены фазные напряжения. Линейные напряжения (U_L) в $\sqrt{3}$ раз больше фазных (U_Φ), а линейные токи (I_L) равны фазным (I_Φ) и определяются по закону Ома:

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

Ток нейтрали (I_N) равен векторной сумме этих токов: $\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$.

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

Если же сопротивления фаз нагрузки неодинаковы, то через нулевой провод протекает некоторый ток $I_N \neq 0$, а в схеме без нейтрали происходит смещение точки 0 на векторной диаграмме напряжений. Это поясняется на векторных диаграммах (рис.8.2).

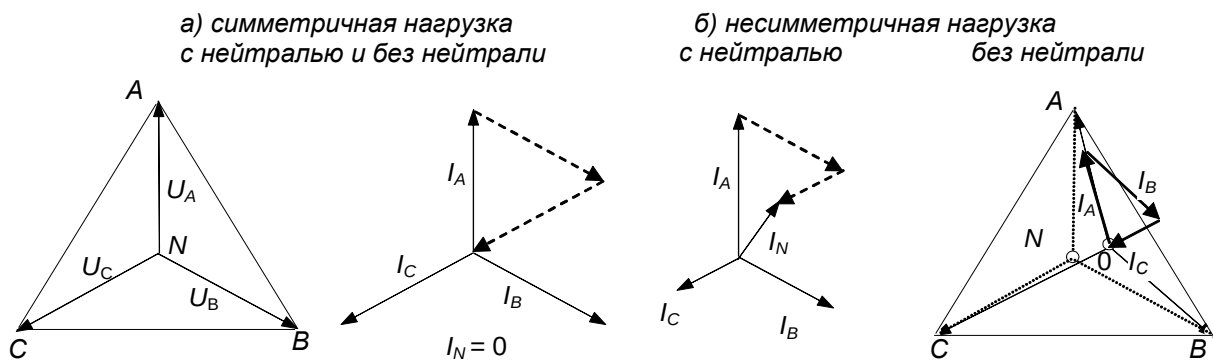


Рис. 8.2. Векторные диаграммы напряжений

Мощность складывается из мощностей трёх фаз: $\Sigma P = P_A + P_B + P_C$. При симметричной и чисто активной нагрузке, имеем:

$$\Sigma P = 3 P_\phi = 3 U_\phi I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L.$$

При смешанной (активно-индуктивной или активно-емкостной) нагрузке в симметричной трёхфазной цепи:

$$\text{Активная мощность } \Sigma P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi.$$

$$\text{Реактивная мощность } \Sigma Q = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi.$$

$$\text{Полная мощность } \Sigma S = 3 \cdot U_\phi I_\phi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L.$$

Активная мощность в четырёхпроводной трёхфазной цепи измеряется с помощью трёх ваттметров (рис. 8.3, а), а в трёхпроводной - с помощью двух ваттметров (рис. 8.3, б).

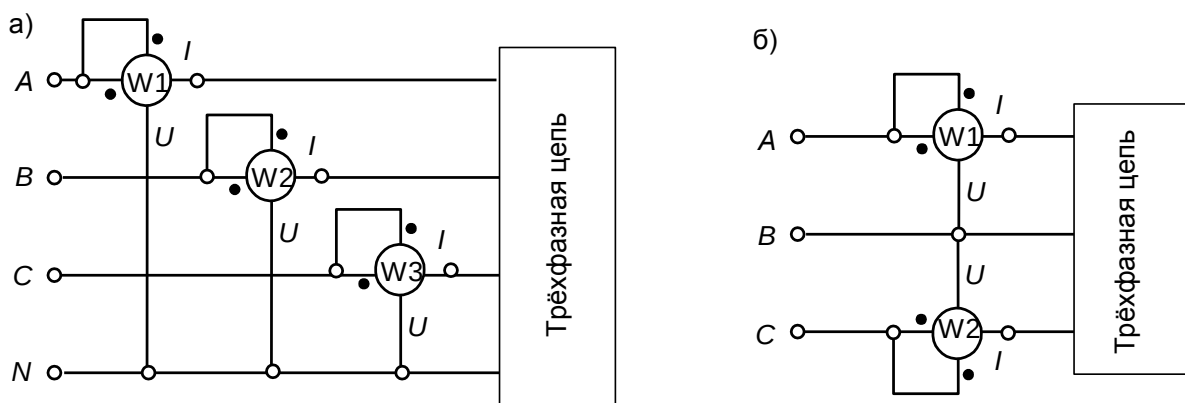


Рис. 8.3

Часть 2. Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

8.2.2. Схема лабораторной установки.

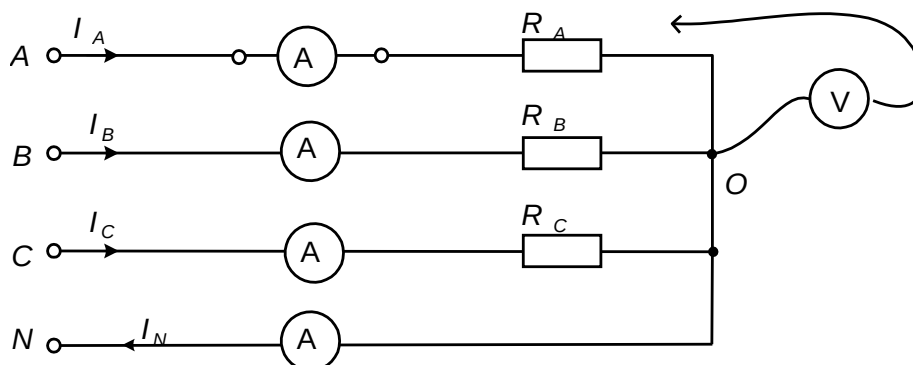


Рис. 8.4. Принципиальная схема установки

8.3.2. Основные теоретические положения.

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 не равен 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. 8.5). Напряжения на отдельных фазах могут существенно превысить номинальное напряжение.

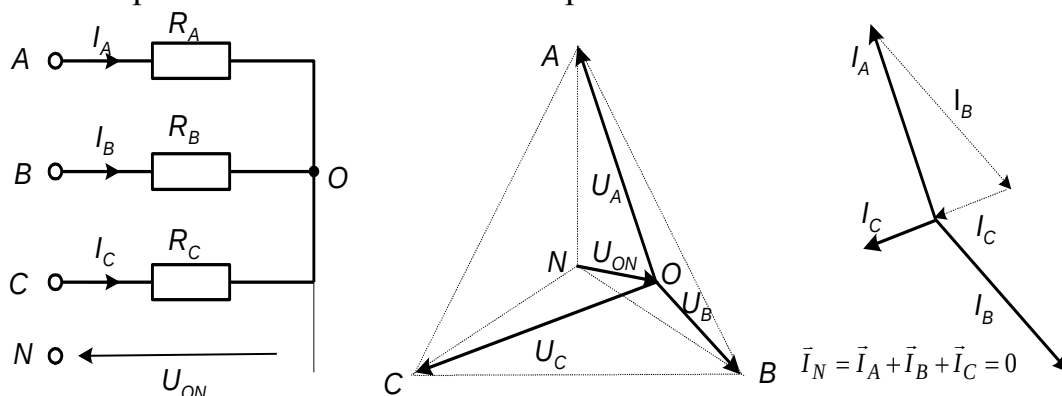


Рис. 8.5. Векторная диаграмма напряжений

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. 8.6).

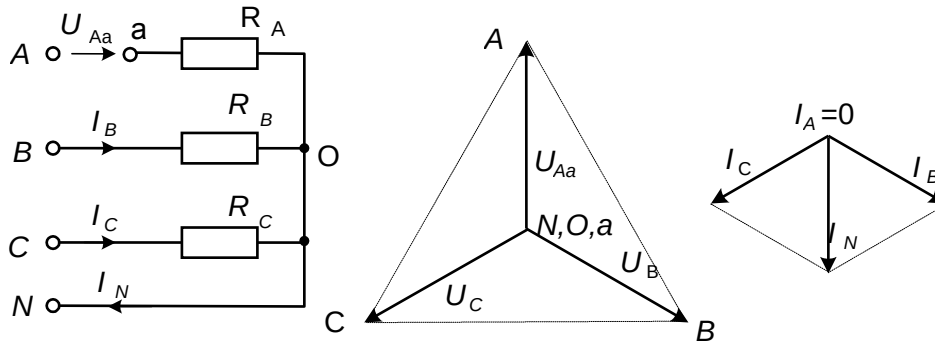


Рис. 8.6 Обрыве провода в фазе A

Обрыв фазы при симметричной нагрузке в схеме без нулевого провода.

При обрыве, например, фазы A (рис. 8.7) 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 .

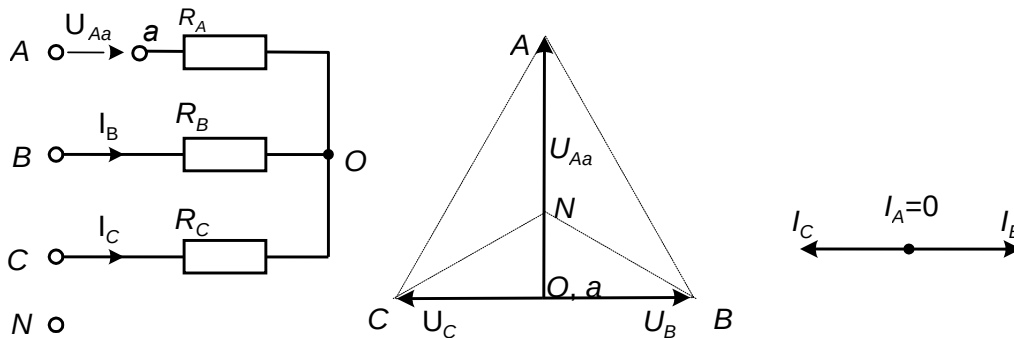


Рис. 8.7. Обрыв фазы A

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 A , нулевая точка нагрузки смещается в точку « A » генератора. Тогда к сопротивлениям фаз B и C прикладываются линейные напряжения. Токи в этих фазах возрастают в $\sqrt{3}$ раз, а ток в фазе A – в 3 раза (рис. 8.8).

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

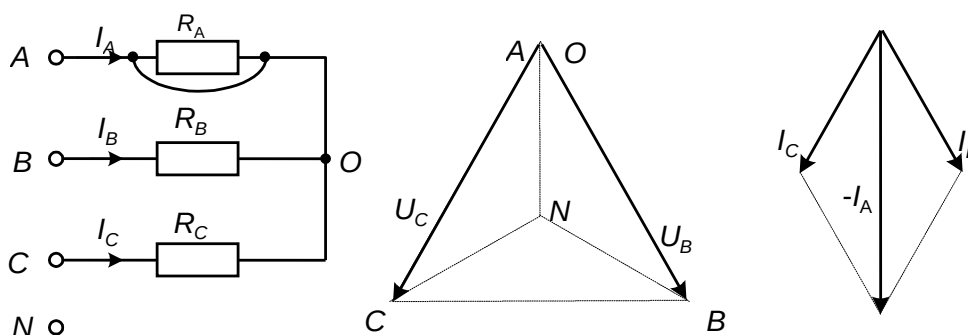


Рис. 8.8. Короткое замыкание в фазе А

8.4. Порядок проведения работы.

8.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача. Определить токи в фазах потребителя и фазные напряжения, для сопротивлений фаз по варианту из табл. 8.1 и с учетом табл. 8.2 Значения $\underline{Z}_{A'}, \underline{Z}_{B'}, \underline{Z}_{C'}$ равное ∞ , соответствует разомкнутому состоянию ключа K_2 в фазе нагрузки; значения $\underline{Z}_{A'}, \underline{Z}_{B'}, \underline{Z}_{C'}$ равное нулю, соответствует замкнутому состоянию ключа K_3 (рис. 8.9).

Примечание:

Линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$.

Таблица 8.1

№ варианта	Режимы работы приемника														
	симметричная нагрузка			несимметричная нагрузка с нулевым проводом			несимметричная нагрузка без нулевого провода			обрыв в фазе или линейном проводе			короткое замыкание в фазе		
	$\underline{Z}_{A'}$, Ом	$\underline{Z}_{B'}$, Ом	$\underline{Z}_{C'}$, Ом	$\underline{Z}_{A'}$, Ом	$\underline{Z}_{B'}$, Ом	$\underline{Z}_{C'}$, Ом	$\underline{Z}_{A'}$, Ом	$\underline{Z}_{B'}$, Ом	$\underline{Z}_{C'}$, Ом	$\underline{Z}_{A'}$, Ом	$\underline{Z}_{B'}$, Ом	$\underline{Z}_{C'}$, Ом	$\underline{Z}_{A'}$, Ом	$\underline{Z}_{B'}$, Ом	$\underline{Z}_{C'}$, Ом
1	500	500	500	500	600	700	500	600	700	∞	600	700	0	600	700
2	600	600	600	550	600	650	550	600	650	550	∞	650	550	0	650
3	700	700	700	600	700	800	600	700	800	600	700	∞	600	700	0
4	800	800	800	750	800	900	750	800	900	750	∞	900	750	0	900
5	900	900	900	800	900	950	800	900	950	∞	900	950	0	900	950

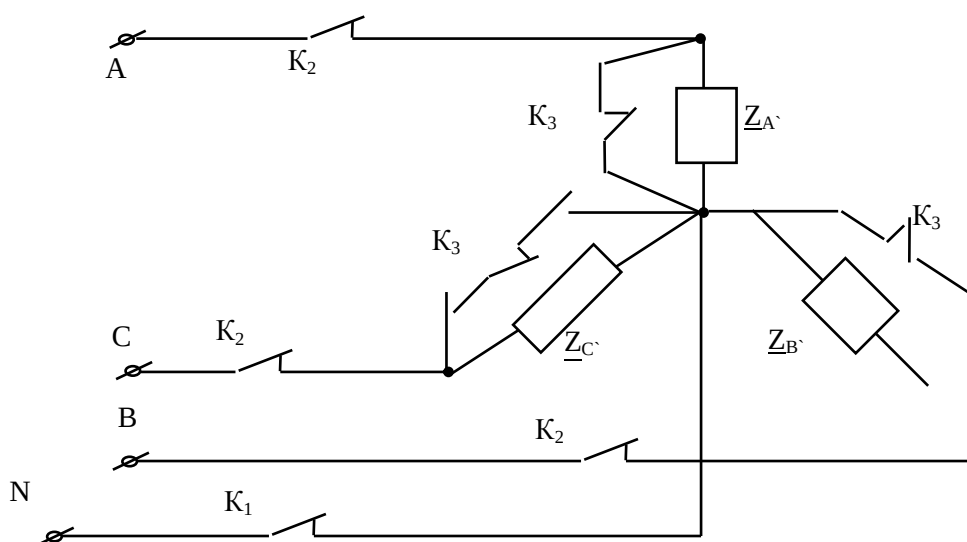


Рис. 8.9

Таблица 8.2

Порядковый номер фамилии обучающегося в списке	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы 8.1.
1 – 5	1
6 – 10	2
11 – 15	3
16 – 20	4

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название лабораторной работы;
- цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- решённые задачи, согласно варианту;
- ответы на контрольные вопросы.

8.4.2. Задание на выполнение работы.

Часть 1.

В трехфазной цепи при соединении нагрузки в звезду измерить действующие значения токов и напряжений, мощность, построить векторные диаграммы и проверить баланс мощностей для следующих случаев:

- Симметричная активная нагрузка с нейтральным проводом и без него.
- Несимметричная активная нагрузка с нейтральным проводом и без него.
- Несимметричная смешанная нагрузка с нейтральным проводом и без него.

Часть 2.

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

8.4.3. Порядок выполнения эксперимента.

Часть 1.

- Соберите цепь с симметричной активной нагрузкой ($R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$) согласно принципиальной схеме (рис. 8.1) и монтажной схеме (рис. 8.10). Включите компьютер и виртуальные приборы.

- Измерьте напряжения, токи и мощности на нагрузке в схеме с нейтральным проводом. Результаты измерений занесите в табл. 8.1 (смотри бланк отчёта к лабораторной работе).
- Рассчитайте мощности фаз и суммарную мощность. Результаты запишите также в табл. 8.1.1 (смотри бланк отчёта к лабораторной работе). Сравните результаты.
- Уберите из схемы нейтральный провод (перемычку между точками N и 0) и снова измерьте токи и напряжения.
- Подключая токовую цепь виртуального ваттметра сначала в фазу A, а цепь напряжения – на напряжение U_{AB} , затем токовую цепь в фазу C, а цепь напряжения – на напряжение U_{CB} , измерьте две мощности и вычислите суммарную мощность. Проверить баланс мощностей.

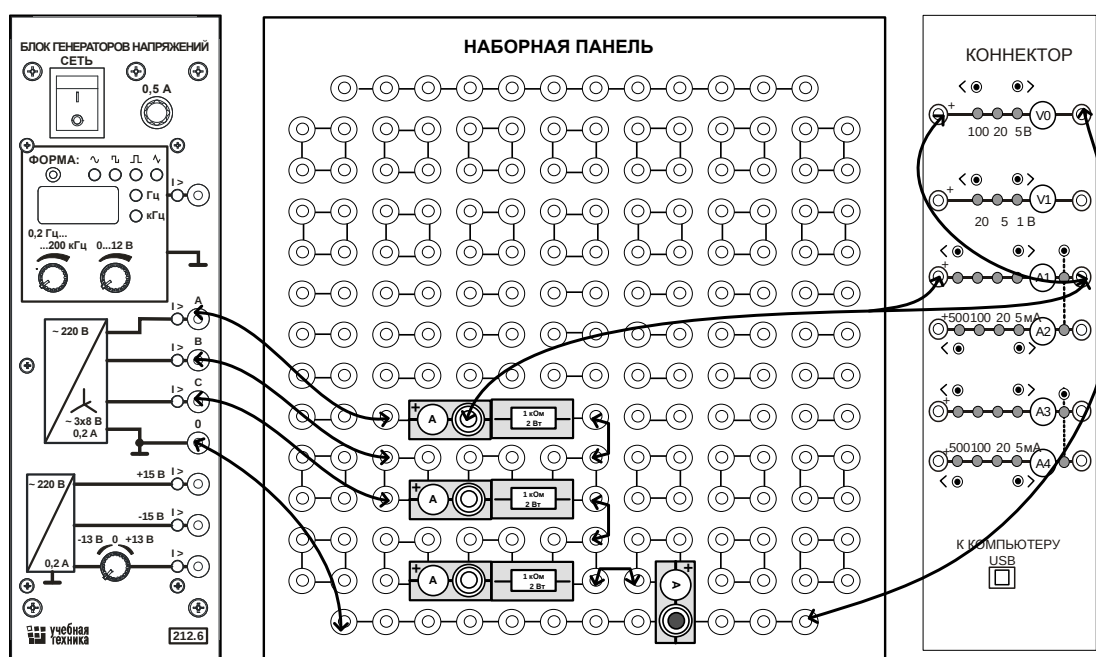


Рис. 8.10 Монтажная схема

(Фаза C должна присоединяться к третьему амперметру).

- Повторите измерения и вычисления для несимметричной нагрузки с нейтральным и без нейтрального провода ($R_A = 1 \text{ кОм}$, $R_B = 330 \text{ Ом}$, $R_C = 470 \text{ Ом}$).
- Повторите измерения и вычисления, заменив резистор фазы B конденсатором $4,4 \text{ мкФ}$, а резистор фазы C – катушкой индуктивности 900 витков с собранным ферромагнитным сердечником. Выберите масштабы токов и напряжений и постройте векторные диаграммы для всех случаев.

Часть 2.

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 8.4) с сопротивлениями фаз $R_A = R_B = R_C = 1 \text{ кОм}$. Монтажная схема изображена на рис. 8.10, но ваттметр в этой работе не понадобится.

- Убедитесь, что обрыв (отключение) нейтрали не приводит к изменению фазных токов.
- Убедитесь, что в схеме с нулевым проводом происходит отключение источника защиты при коротких замыканиях, как в фазах нагрузки, так и между линейными проводами.
- Убедитесь, что в схеме без нулевого провода короткое замыкание в фазе нагрузки не приводит к отключению, а при коротком замыкании между линейными проводами установка отключается.
- Проведите измерения токов и напряжений всех величин, указанных в табл. 4.2 в различных режимах и по экспериментальным данным постройте векторные диаграммы для каждого случая в выбранном масштабе.

8.5. Выводы.

В выводах рассмотреть следующие вопросы:

1. Какие закономерности были обнаружены при исследовании разных режимов работы трёхфазной электрической цепи при соединении нагрузки в звезду?
2. Как изменяется мощность трёхфазной нагрузки при обрыве фазы в схеме с нулевым проводом и без него?
3. Как изменяется мощность при коротком замыкании одной фазы?

8.6. Контрольные вопросы.

1. Какие существуют способы соединения трехфазных цепей?
2. Каково назначение нулевого провода в трехфазной системе при соединении приемника звездой?
3. Дайте определение линейным и фазным величинам.
4. Какие соотношения имеют место между линейными и фазными величинами в трехфазных системах при соединении приемника звездой при симметричной нагрузке?
5. Какие достоинства имеют четырехпроводные трехфазные цепи по сравнению с трехпроводными?
6. Какая нагрузка называется симметричной, однородной, равномерной?
7. Чему равен угол сдвига по фазе между напряжением и током в фазе потребителя при активной нагрузке?
8. Чему равно напряжение между нулевыми точками генератора и потребителя:
 - при симметричной нагрузке;
 - при несимметричной нагрузке с нулевым проводом;
 - при несимметричной нагрузке без нулевого провода.

8.7. Список литературы.

1. Л.А. Бессонов, ТОЭ. М. - С. 184 - 192.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. - Энергоатомиздат. - С. 256 - 277.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ В ТРЕУГОЛЬНИК, АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

9.1. Цель работы.

1. Исследовать симметричные и несимметричные режимы работы цепи при соединении нагрузки в треугольник.
2. Исследовать аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник.

Часть 1. Исследование трёхфазной электрической цепи при соединении нагрузки в треугольник.

9.2.1. Схема лабораторной установки (см. рис. 9.7.)

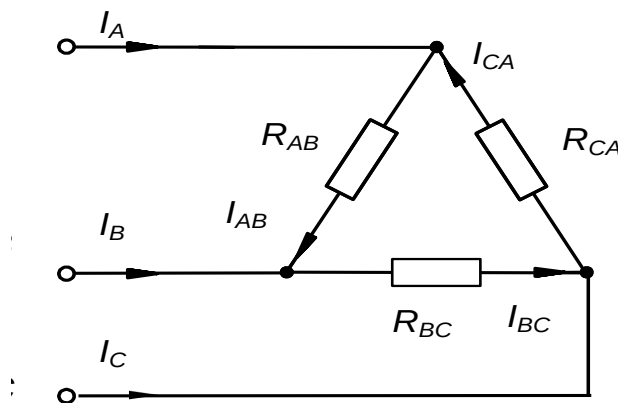


Рис. 9.1. Схема потребителя треугольник

9.3.1. Основные теоретические положения.

В схеме «треугольник» (рис. 9.1), нагрузка R_{AB} , R_{BC} и R_{CA} каждой фазы включается на **линейное напряжение**, которое в данном случае равно **фазному** ($U_L = U_\Phi$).

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 как векторные разности соответствующих фазных токов:

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \quad \vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \quad \vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}.$$

Построение этих векторов показано на векторной диаграмме (рис. 9.2).

При симметричных напряжениях U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} и одинаковых нагрузках фаз $R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = R$ токи также симметричны, причём, линейный ток по величине в $\sqrt{3}$ раз больше фазного. Это поясняется на векторных диаграммах (рис. 9.2).

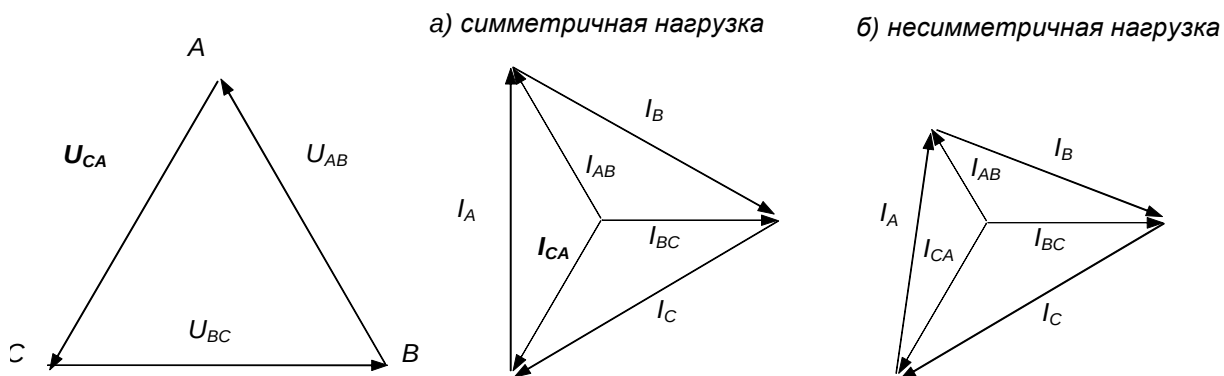


Рис. 9.2. Векторные диаграммы напряжений

Суммарная мощность ΣP , потребляемая трехфазной нагрузкой при ее соединении в «треугольник», складывается из мощностей фаз $\Sigma P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$. Так же, как и при соединении в звезду в случае симметричной нагрузки:

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

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

Полная мощность $\Sigma S = 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\text{Л}}$.

Активная мощность трёхфазной цепи при соединении в треугольник измеряется двумя ваттметрами так же, как и при соединении в звезду без нейтрального провода.

Часть 2. Аварийные режимы трёхфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник.

9.2.2. Схема лабораторной установки (см. рис. 9.9).

9.3.2. Основные теоретические положения.

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. 9.3.) 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.

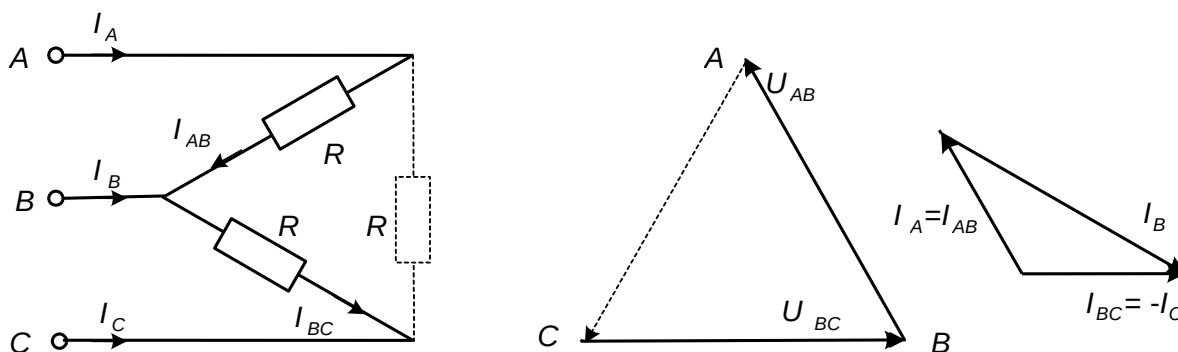


Рис. 9.3. Обрыв одной из фаз нагрузки

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. 9.4). Цепь фактически становится однофазной.

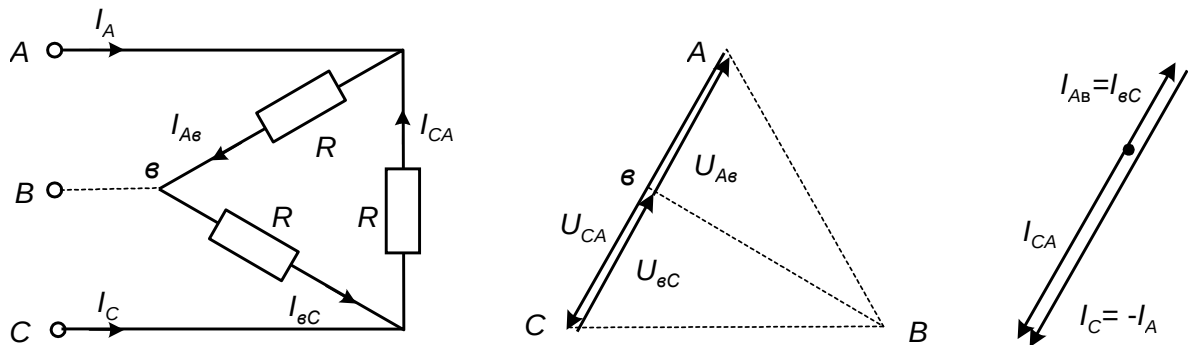


Рис. 9.4 Обрыв линейного провода

При одновременном обрыве линейного провода и одной фазы нагрузки цепь также становится однофазной (рис. 9.5).

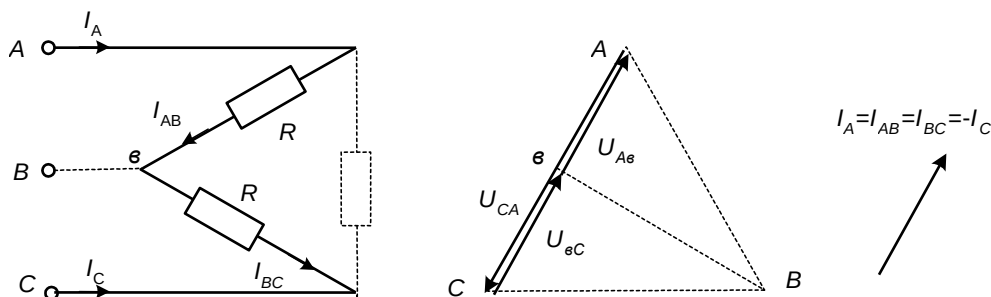


Рис. 9.5. Одновременный обрыв линейного провода и одной фазы

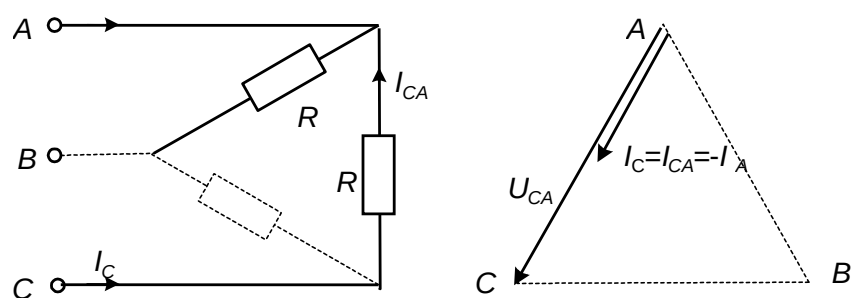


Рис.9.6. Одновременный обрыв линейного провода и одной фазы

9.4. Порядок проведения работы.

9.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача. Рассчитать токи в фазах приемника и в линейных проводах для сопротивлений фаз приемника, указанных в табл. 9.1 для заданного варианта и с учетом табл. 9.2 в каждом из четырех режимов работы приемника (см. рис. 9.7).

Таблица 9.1

№ варианта	Режимы работы приемника											
	симметричная нагрузка			несимметричная нагрузка			обрыв в одной фазе			обрыв в линейном проводе		
	$\underline{Z}_{A'B'}$, Ом	$\underline{Z}_{B'C'}$, Ом	$\underline{Z}_{C'A'}$, Ом	$\underline{Z}_{A'B'}$, Ом	$\underline{Z}_{B'C'}$, Ом	$\underline{Z}_{C'A'}$, Ом	$\underline{Z}_{A'B'}$, Ом	$\underline{Z}_{B'C'}$, Ом	$\underline{Z}_{C'A'}$, Ом	А	В	С
1	300	300	300	300	400	500	∞	400	500	x		
2	400	400	400	350	400	450	350	∞	450		x	
3	500	500	500	400	500	600	400	500	∞			x
4	600	600	600	500	600	700	500	∞	700		x	
5	700	700	700	600	700	750	∞	700	750	x		

Таблица 9.2

Порядковый номер фамилии обучающегося в списке	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы 9.1
1 – 5	1
6 – 10	2
11 – 15	3
16 – 20	4

Примечание:

1. Линейное напряжение 220 В, $\underline{Z} = \infty$ соответствует обрыву в фазе нагрузки.
2. Знаком “х” обозначен линейный провод, в котором имеет место обрыв;

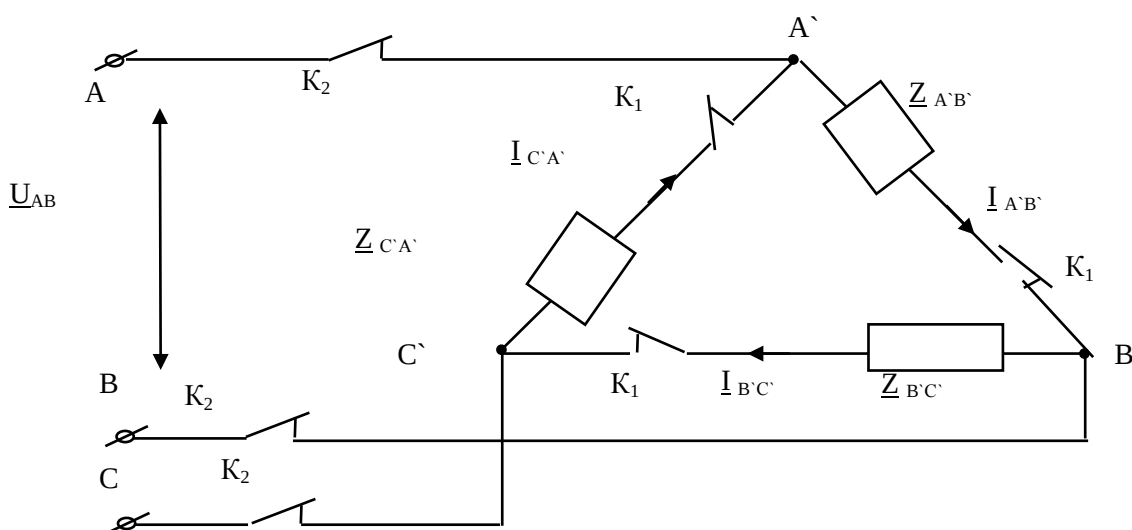


Рис. 9.7

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название лабораторной работы;

- цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- решённые задачи, согласно варианту;
- ответы на контрольные вопросы.

9.4.2. Задание на выполнение работы.

Часть 1.

В трехфазной цепи при соединении нагрузки в треугольник измерить действующие значения токов и напряжений, мощность, построить векторные диаграммы и проверить баланс мощностей для следующих случаев:

- Симметричная активная нагрузка.
- Несимметричная активная нагрузка.
- Несимметричная смешанная нагрузка.

Часть 2.

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

9.4.3. Порядок выполнения эксперимента.

Часть 1.

- Соберите цепь с симметричной нагрузкой ($R_{AB} = R_{BC} = R_{CA} = 1 \text{ кОм}$) согласно принципиальной схеме (рис. 9.8) и монтажной схеме (рис. 9.9).

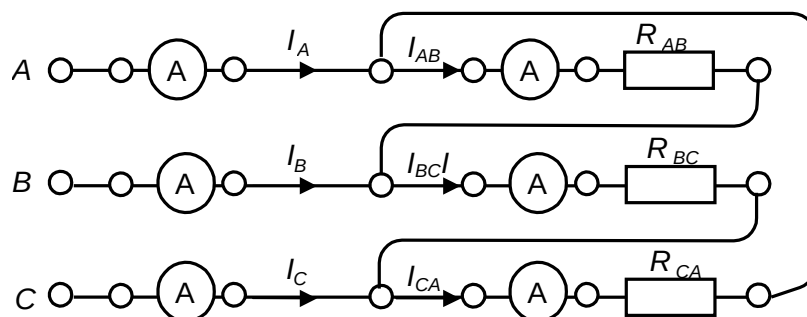


Рис. 9.8. Принципиальная схема

- Измерьте мультиметрами (или виртуальными приборами) напряжения и токи, указанные в табл. 9.2 (смотри бланк отчёта) и вычислите мощности.
- Подключая токовую цепь ваттметра (виртуального или реального) сначала в фазу A , а цепь напряжения — на напряжение U_{AB} , затем токовую цепь в фазу C , а цепь напряжения — на напряжение U_{CB} , измерьте две мощности и вычислите суммарную мощность. Проверьте баланс мощностей. *(Для переключения ваттметра из одной цеп в другую, так же, как и амперметра, используйте специальный коммутационный мини блок «амперметр» и пару проводников с коаксиальным разъёмом!).*
- Повторите измерения и вычисления для несимметричной нагрузки с ($R_{AB} = 1 \text{ кОм}$, $R_{BC} = 330 \text{ Ом}$, $R_{CA} = 470 \text{ Ом}$). Повторите измерения и вычисления,

заменяв резистор фазы В конденсатором 4,4 мкФ, а резистор фазы С – катушкой индуктивности 900 витков с собранным ферро магнитным сердечником.

- Выберите масштабы токов и напряжений и постройте векторные диаграммы для всех случаев.

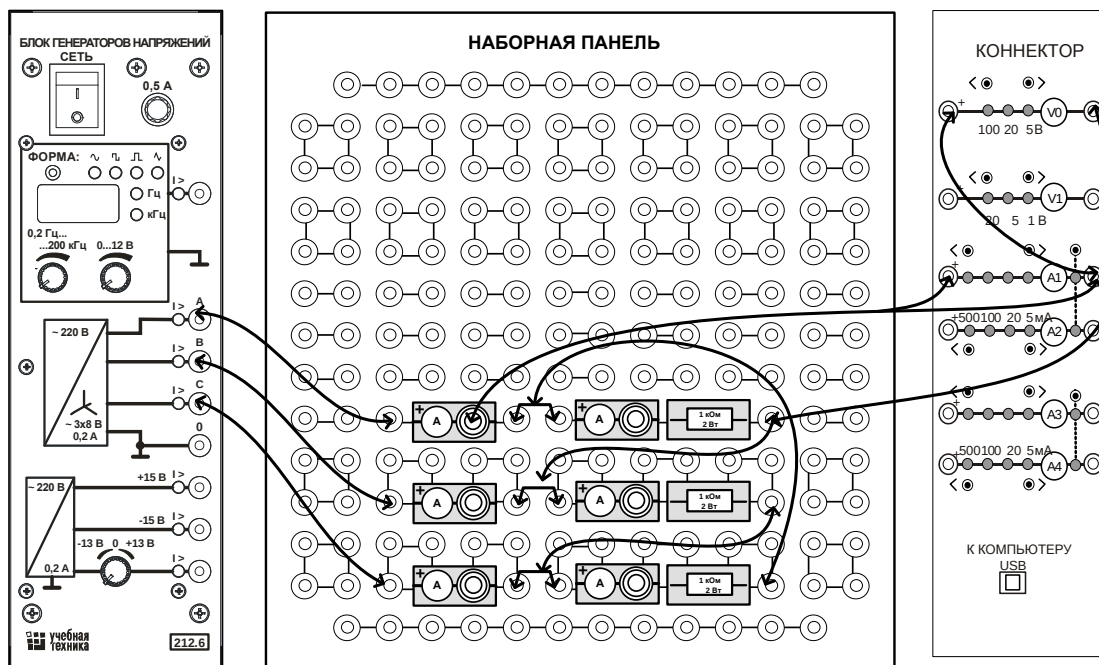


Рис. 9.9. Монтажная схема

Часть 2.

- Соберите цепь, согласно принципиальной схеме (рис. 9.10.) с сопротивлениями фаз $R_{AB}=R_{BC}=R_{CA}=1\text{ кОм}$. Монтажная схема такая же, как на (рис. 9.9), но ваттметр в этой работе не понадобится.

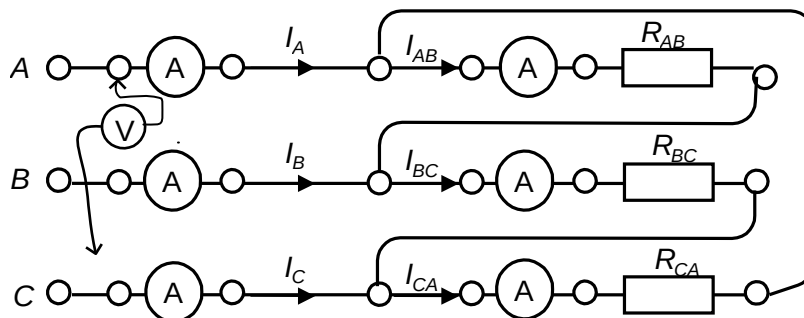


Рис. 9.10. Принципиальная схема

- Прodelайте измерения фазных и линейных токов (отличных от нуля) во всех режимах, указанных в табл. 9.3 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- По экспериментальным данным постройте векторные диаграммы для каждого аварийного случая, в выбранном масштабе.

9.5. Выводы.

В выводах рассмотреть следующие вопросы:

1. В чем заключаются основные закономерности в трехфазной электрической цепи при соединении потребителя в треугольник?

2. Как (во сколько раз) увеличиваются или уменьшаются фазные и линейные токи в каждом из рассмотренных аварийных режимов?

9.6. Контрольные вопросы.

1. Каким образом соединяются фазы потребителя в треугольник?
2. Каковы преимущества соединения фаз потребителя по схеме «треугольник»?
3. Какие соотношения имеют место между линейными и фазными величинами в трехфазных симметричных системах при соединении потребителя треугольником?
4. Какая нагрузка называется симметричной, однородной, равномерной?
5. Чему равняется угол сдвига по фазе между напряжением и током в фазе потребителя при активной нагрузке?
6. Как изменится режим работы фаз при обрыве линейного провода?
7. Как изменится режим работы оставшихся фаз при обрыве одной фазы?
8. Как рассчитывается мощность потребителя, соединенного в треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке?

9.7. Список литературы.

1. Л.А. Бессонов, ТОЭ. М. - С. 184 – 192.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат. - С. 256 – 277.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 10

РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ ПРИЛОЖЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

10.1. Цель работы:

1. Исследовать цепи при несинусоидальном приложенном напряжении.
2. Рассчитать мгновенное и действующее значение тока и напряжения на конденсаторе, а также потребляемую цепью активную мощность при прямоугольном периодическом приложенном напряжении.

10.2. Схема лабораторной установки.

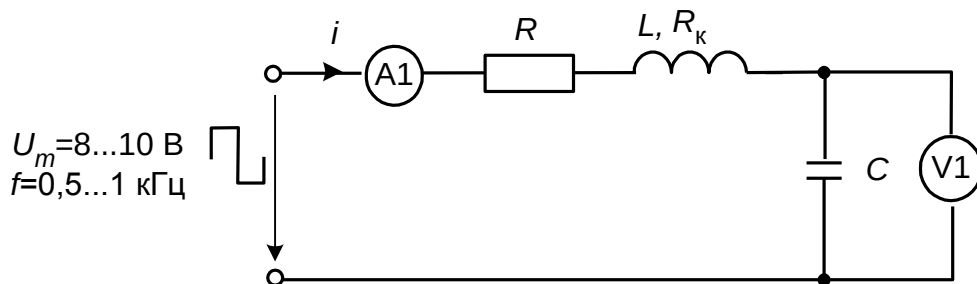


Рис. 10.1. Принципиальная схема установки

10.3. Основные теоретические положения.

Несинусоидальное периодическое напряжение, приложенное к электрической цепи, можно разложить в ряд Фурье: $u(t) = U_0 + \sum U_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$,

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d\omega t;$$

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

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

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

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 ($k=1$);
- 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:

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum U_{km}^2}; I = \sqrt{I_0^2 + \sum I_{km}^2};$$

$$P = U_0 I_0 + \sum U_k I_k \cos \varphi_k; Q = \sum U_k I_k \sin \varphi_k; S = UI,$$

где U_k, I_k – действующие значения синусоидальных составляющих.

Чем больше гармоник взято для расчёта, тем выше точность полученных результатов. На рис. 10.2 приведен в качестве примера экспериментальный график тока в цепи с последовательным соединением R, L , и C при двуполярном прямоугольном приложенном напряжении. На этот график наложены в том же масштабе два расчётных графика: один сделан с учётом только первой и третьей гармоник, а в другом учтены 5 гармоник - с первой по одиннадцатую. В приложении приведена MathCAD-программа расчёта этих графиков с комментариями.

10.4. Порядок проведения работы.

10.4.1. Задание на подготовку к работе.

Задача. К электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных источника с напряжением и активного сопротивления, подключаются поочередно индуктивное и емкостное сопротивление. Напряжение сети $u(t)=40+120\sin\omega t+60\sin(2\omega t-\pi/6)$. Найти мгновенное и действующее значение тока в цепи, а также активную мощность цепи для обоих вариантов подключения нагрузки, если частота первой гармоники 50 Гц. Исходные данные в табл. 10.1, а в соответствии с вариантом задания и с учетом таблицы 10.2.

Таблица 10.1

Номер варианта	R	X_L	X_C
1	20	10	10
2	19	11	11
3	18	12	12
4	17	13	13
5	16	14	14
6	15	15	15
7	14	16	16
8	13	17	17
9	12	18	18
10	11	19	19
11	10	20	20

Таблица 10.2

Порядковый номер фамилии студента в списке класса	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы 10.1
1 – 11	1
12 – 22	2

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

10.4.2. Задание на выполнение работы.

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

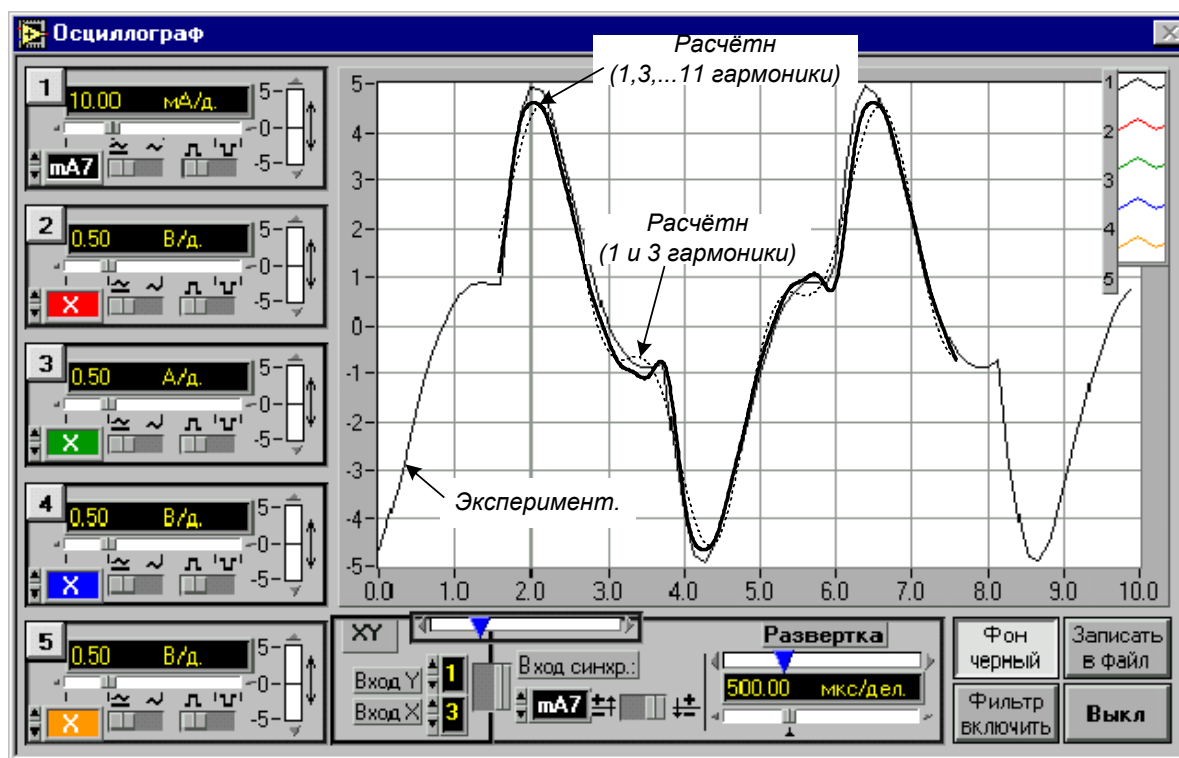


Рис. 10.2

10.4.3. Порядок выполнения эксперимента.

- Выберите один из приведенных ниже вариантов, параметров цепи (рис. 10.1) и выполните расчёт согласно заданию, учитывая основную гармонику и одну – две высших. По результатам расчёта мгновенных значений на рисунке 10.3 постройте графики, а действующие значения и мощность занесите в таблицу 10.3 (смотри бланк отчета к лаб. работе).

Варианты параметров элементов цепи и приложенного напряжения:

$L = 33 \text{ мГн}$ ($R_K=65 \text{ Ом}$), $L = 100 \text{ мГн}$, ($R_K=190 \text{ Ом}$);

$C = 0,22, \dots, 0,47$ или 1 мкФ ;

$R = 47, \dots, 100, 150$, или 220 Ом ;

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

- Соберите цепь (рис. 10.1) с принятыми в расчёте параметрами элементов, включите виртуальные приборы для измерения действующих значений тока и напряжения на конденсаторе и осциллограф.
- Установите на источнике, принятые значение частоты и амплитуды прямоугольных импульсов и перенесите осциллограммы на рисунок 10.4. Запишите в таблицу 10.3 действующие значения тока и напряжения на конденсаторе (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Переключите вольтметр на вход цепи, включите виртуальный измеритель активной мощности и занесите его показание также в таблицу 10.3
- Сравните результаты расчёта и эксперимента и сделайте выводы.

10.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Совпадения экспериментальных и теоретических данных.
2. Проанализировать полученные результаты расчёта.
3. Дать оценку, полученной активной мощности при прямоугольном периодическом приложенном напряжении.

10.6. Контрольные вопросы

1. Как определить коэффициент несинусоидальности?
2. Как определить полную мощность, потребляемую цепью при действии несинусоидального напряжения?
3. Будет ли ток нулевой гармоники в цепи содержащей ёмкость?
4. Для чего в схему выпрямителя включают фильтрующий конденсатор?
5. Записать формулу действующего значения несинусоидального напряжения.
6. Как найти активную мощность, потребляемую цепью при несинусоидальном напряжении питания?
7. Каков порядок расчёта электрической цепи при последовательном соединении R, L, C элементов и несинусоидальном напряжении питания?
8. Какова зависимость индуктивного и ёмкостного сопротивления от порядка гармоники?

10.7 Список литературы.

1. Л.А.Бессонов. ТОЭ. М. - С. 204 – 212.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат.- С. 297 – 319.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

11.1. Цель работы.

1. Исследовать режимы работы магнитных элементов.
2. Снять экспериментально и проверить расчётом зависимость амплитуды магнитного потока от действующего значения приложенного напряжения и от частоты.

11.2. Схема лабораторной установки.

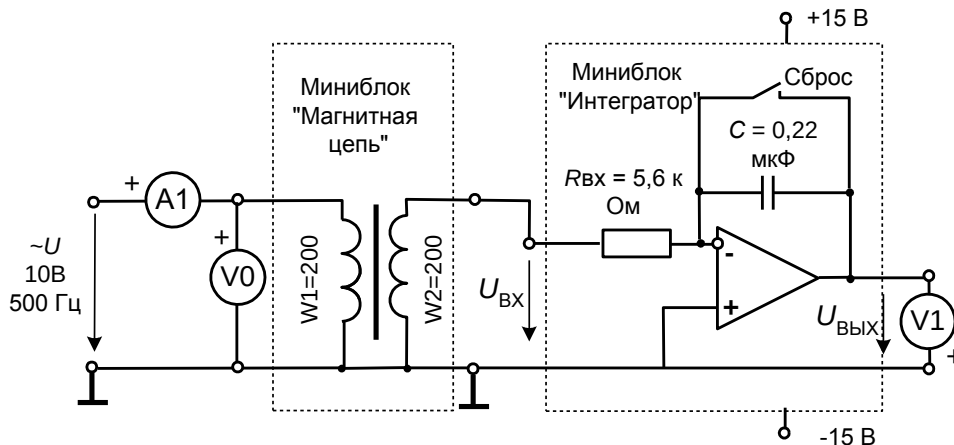


Рис. 11.1. Принципиальная схема установки

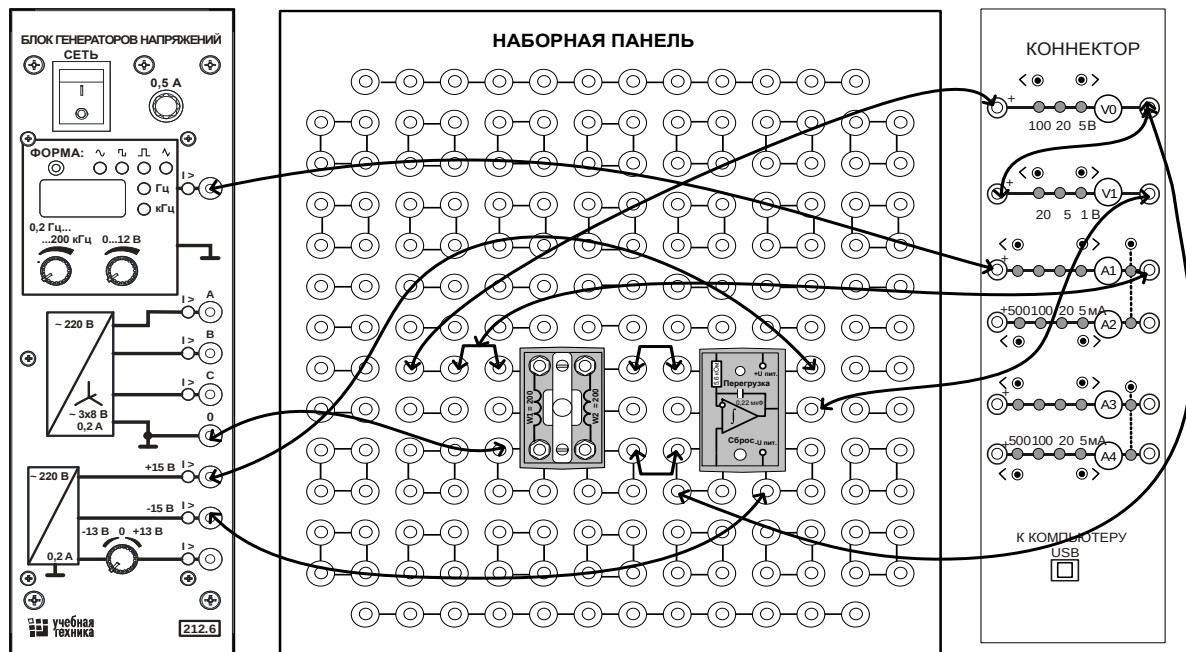


Рис.11. 2. Монтажная схема

11.3. Основные теоретические положения.

Если на намагничивающую катушку магнитопровода подать переменное напряжение $u(t)$, то в ней возникает переменный ток $i(t)$, а в магнитопроводе – переменный магнитный поток $\Phi(t)$. При синусоидальном приложенном

напряжении: $u(t) = U_{\text{макс}} \sin \omega t$, где $U_{\text{макс}}$ и ω – соответственно амплитуда и круговая частота, магнитный поток также будет синусоидальным. (Здесь пренебрегается влиянием активного сопротивления катушки). Амплитуда магнитного потока связана с действующим значением приложенного напряжения следующим выражением: $\Phi_{\text{макс}} = U/4,44fW$.

Следовательно, максимальное значение магнитного потока определяется лишь действующим значением приложенного напряжения U , его частотой f и числом витков катушки W . При увеличении приложенного напряжения и магнитного потока сначала пропорционально увеличивается и амплитуда тока. Однако при переходе в область насыщения амплитуда тока резко возрастает, и его форма искажается. При наличии воздушного зазора в магнитопроводе или при его увеличении магнитный поток практически остаётся неизменным, но увеличивается магнитное сопротивление магнитопровода, и уменьшаются индуктивность и индуктивное сопротивление катушки. При неизменном приложенном напряжении это приводит к увеличению тока. Форма тока становится ближе к синусоидальной, так как магнитное сопротивление теперь, в основном, определяется воздушным зазором. Вебер-амперная характеристика магнитопровода $\Phi(iW)$ при переменном токе имеет вид петли (петля гистерезиса), ширина которой зависит от потерь энергии в магнитопроводе на перемагничивание и вихревые токи. При увеличении зазора в магнитопроводе петля вырождается в прямую линию. В данной лабораторной работе петля гистерезиса выводится на экран виртуального осциллографа в режиме XY. Принципиальная схема установки показана на рис. 11.1. На магнитопроводе кроме намагничивающей обмотки W_1 имеется измерительная обмотка W_2 , в которой индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного потока. Эта ЭДС подаётся на вход интегрирующего усилителя, на выходе которого напряжение пропорционально магнитному потоку:

$$u_{\text{вых}} = W_2 \Phi / RC,$$

где R и C – параметры интегратора, указанные на его этикетке.

Это напряжение подаётся на вертикальный вход осциллографа (Y). На горизонтальный вход (X) подаётся напряжение, пропорциональное току в намагничивающей катушке.

11.4. Порядок проведения работы.

11.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача. Определить длину средней магнитной линии сердечника ℓ . Все размеры на рисунке указаны в мм (рис. 11.3). Определить магнитную индукцию в сердечнике, указанном в задаче если известен его поток.

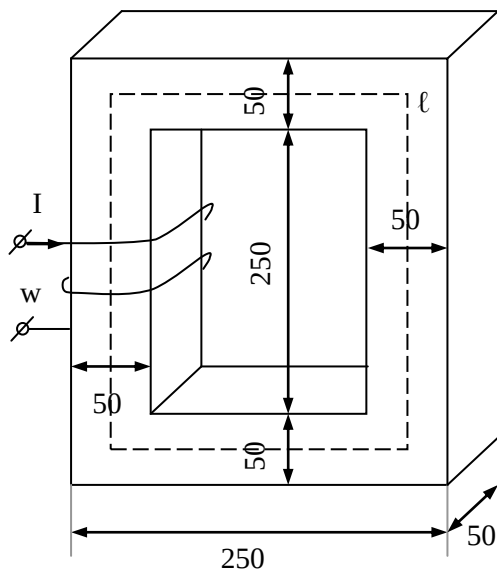


Рис. 11.3

Таблица 11.1

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Phi \cdot 10^{-4}$, Вб	30	37,5	22,5	20	18	17	16	15	14	13

Таблица 11.2

Порядковый номер фамилии студента в списке класса	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы
1 – 10	1
11 – 20	2
21 – 30	3

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

11.4.2. Задание на выполнение работы.

С помощью виртуального осциллографа убедиться, что при синусоидальном приложенном напряжении магнитный поток в катушке также синусоидальный, а форма тока может отличаться от синусоиды. Снять экспериментально и проверить расчётом зависимость амплитуды магнитного потока от действующего значения приложенного напряжения и от частоты. Пронаблюдать на осциллографе за изменением формы и величины магнитного потока и тока при изменении воздушного зазора. Получить на экране осциллографа петлю гистерезиса, пронаблюдать за изменением петли при изменении зазора в магнитопроводе.

11.4.3. Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рис. 11.1) и монтажной схеме (рис. 11.2). На коннекторе установите пределы измерения вольтметров V1 - 5 В, V0 – 20 В и амперметра A1 – 100 мА. Переключатель интегратора установите в положение «Сброс».
- Включите компьютер и откройте блок виртуальных приборов «Приборы I». Активизируйте в верхнем окне этого блока прибор V1, во втором - V0, а в третьем сверху – A3.
- Включите виртуальный осциллограф, «подключите» к его первому каналу сигнал V1, а к третьему – сигнал A1. Установите длительность развёртки 200 мкс/дел.
- Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 400...500 Гц амплитудой примерно 5 В.
- Убедитесь, что на виртуальном осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов: кривая белого цвета соответствует изменению магнитного потока, кривая зелёного цвета – изменению тока. При необходимости сместите изображение по горизонтали, в центр экрана.
- Зафиксируйте масштабы осциллографа нажатием кнопок 1 и 3 на блоках входов. При этом кнопки приобретают красный цвет, и в дальнейшем масштабы автоматически изменяться не будут.
- Увеличивая и уменьшая амплитуду приложенного напряжения, наблюдайте за изменениями амплитуды и формы кривых тока и магнитного потока. Сделайте выводы.
- Увеличивая напряжение согласно табл. 11.3 (смотри бланк отчета к лаб. работе) снимите зависимость напряжения на выходе интегратора $U_{\text{ВЫХ}}$ (по вольтметру V1) от напряжения на входе цепи U (по вольтметру V0).
- Рассчитайте и постройте на рис. 3 экспериментальный график изменения амплитуды магнитного потока

$$\Phi_m(U) = \frac{RC}{W_2} \sqrt{2} U_{\text{ВЫХ}}$$

- Рассчитайте этот же график по формуле:
$$\Phi_m(U) = \frac{U}{4,44 f W_1} .$$
- Постройте расчётный график также на рис. 4 и сравните его с экспериментальным.
- Установите напряжение на входе цепи 5 В и изменяя частоту приложенного напряжения согласно табл. 11.4 (смотри бланк отчета к лаб. работе) снимите зависимость напряжения на выходе интегратора от частоты.
- Рассчитайте экспериментальную и расчётную зависимости амплитуды магнитного потока от частоты по тем же формулам и постройте графики на рис. 11. 4 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Включите режим X-Y осциллографа и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. (*Вход Y должен быть подключён к каналу 1, т.е к V1, а вход X к каналу 3, т.е к A1*). Отрегулируйте намагничивающий

ток таким образом, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области насыщения.

- Пронаблюдайте за изменением петли гистерезиса при изменении приложенного напряжения и при изменении зазора в магнитопроводе. Для изменения зазора необходимо выключить питание, вывернуть слегка регулировочный винт, вставить в образовавшиеся зазоры полоски бумаги и снова затянуть винт и включить питание. Сделайте выводы.

11.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Совпадения экспериментальных и теоретических данных.
2. Проанализировать зависимость амплитуды магнитного потока от действующего значения приложенного напряжения и от частоты.

11.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение магнитной цепи.
2. Как определяют магнитное напряжение?
3. Какую величину называют магнитным сопротивлением?
4. Указать единицы измерения МДС.
5. Сформулировать основной закон для магнитной цепи.
6. Сформулировать первый закон Кирхгофа для магнитной цепи.
7. Сформулировать второй закон Кирхгофа для магнитной цепи.

11.7 Список литературы.

1. Л.А. Бессонов, ТОЭ. М. - С. 517 – 521.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М., Энергоатомиздат. - С. 669 – 681.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРА

12.1. Цель работы:

1. Исследовать режимы работы нелинейных элементов.
2. Снять вольтамперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником и последовательной резонансной цепи с этой катушкой.

12.2. Схема лабораторной установки.

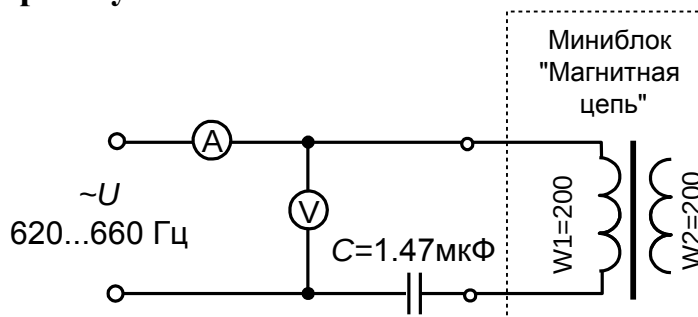


Рис. 12.1 Принципиальная схема установки

12.3. Основные теоретические положения.

Ток в цепях с нелинейными элементами даже при синусоидальном приложенном напряжении имеет несинусоидальный характер. Для приближённого анализа таких цепей часто используют метод эквивалентных синусоид, в котором несинусоидальные токи и напряжения заменяют эквивалентными синусоидами. В качестве критерия эквивалентности выбирают обычно равенство действующих значений и потребляемой мощности. В резонансных цепях иногда несинусоидальную кривую заменяют первой гармоникой. Замена реальных кривых синусоидами позволяет использовать при анализе вольтамперные характеристики для действующих значений, векторные диаграммы и комплексный метод расчёта.

При последовательном соединении катушки и конденсатора (рис.12.2, а) векторная диаграмма имеет вид (рис. 12.2, б). Вольтамперная характеристика нелинейной катушки (с ферромагнитным сердечником) имеет вид $U_L(I)$, изображённый на рис. 12.2, в. Здесь же изображена прямолинейная вольтамперная характеристика $U_C(I)$ конденсатора. Они пересекаются при некотором значении тока $I_{\text{рез}}$. Эта точка является точкой резонанса напряжений. В ней $U_L = U_C$ и всё напряжение питания оказывается приложенным к активному сопротивлению.

Резонанс в цепи с нелинейной катушкой, в отличие от линейной цепи, достигается при изменении приложенного напряжения или тока. Вольтамперную характеристику всей цепи $U(I)$ можно построить, используя векторную диаграмму (рис.12.2, б). Сначала при различных значениях тока

находим разность напряжений $U_L - U_C$, затем определяем приложенное к цепи напряжение по формуле, вытекающей из векторной диаграммы:

$$U = \sqrt{(U_L - U_C)^2 + U_R^2}, \text{ где } U_R = RI.$$

Эта характеристика изображена на рис. 12.2, в. Реальная вольтамперная характеристика лежит несколько выше расчётной, так как при $I = I_{\text{рез}}$ компенсируются только первые гармоники напряжений U_L и U_C , поэтому разность действующих значений этих напряжений при резонансе не равна нулю.

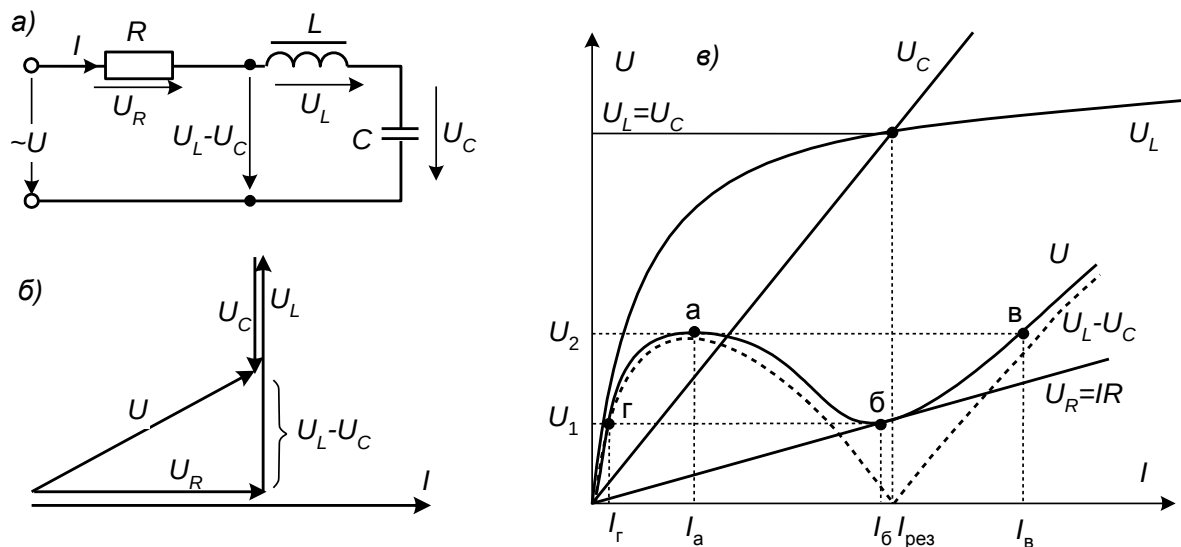


Рис. 12.2

Вольтамперная характеристика имеет падающий участок **аб**. При увеличении приложенного к цепи напряжения от 0 до U_2 ток в цепи возрастает в соответствии с вольтамперной характеристикой, но при дальнейшем увеличении напряжения, ток скачком возрастает от значения $I_{\text{а}}$ до значения $I_{\text{в}}$. Далее он продолжает плавно увеличиваться в соответствии с вольтамперной характеристикой. При уменьшении напряжения до значения U_1 ток уменьшается плавно, но в точке **б** он скачком уменьшается от значения $I_{\text{б}}$ до значения $I_{\text{г}}$. Таким образом, при питании от источника напряжения ток никогда не принимает устойчивых значений, соответствующих участку **аб** вольтамперной характеристики. Этот участок характеристики может быть экспериментально снят только при питании от источника тока.

Форма токов и напряжений в нелинейной цепи существенно отличается от синусоидальной. Поэтому, при экспериментальном снятии вольтамперных характеристик необходимо использовать вольтметр и амперметр, измеряющие среднеквадратичные значения. Таковыми являются виртуальные приборы стенда. При использовании приборов, предназначенных для измерения синусоидальных величин (мультиметров) качественная картина не меняется, однако, количественно существенно отличается от реальной.

12.4. Порядок проведения работы.

12.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача. Катушка с ферромагнитным сердечником и конденсатор соединены последовательно. Вольт-амперная характеристика катушки задана в табл. 12.1. Определить емкость, при которой наступит феррорезонанс напряжений при токе 0,31 А. При каком напряжении в этом случае наступит феррорезонанс токов? Активными сопротивлениями катушки и конденсатора пренебречь. Построить вольт-амперные характеристики катушки, конденсатора и всей цепи при последовательном соединении. По этим характеристикам определить, при каком напряжении произойдет первый бросок тока, и указать величины токов до броска и после него.

Таблица 12.1

U, В	54	70	90	110	130	150	170	200
I, А	0,05	0,067	0,092	0,12	0,177	0,183	0,224	0,32

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

12.4.2. Задание на выполнение работы.

Снять вольтамперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником и последовательной резонансной цепи с этой катушкой. Рассчитать вольтамперную характеристику цепи и сравнить её с экспериментальной.

12.4.3. Порядок выполнения эксперимента

- Соберите цепь (рис. 12.1) используя для измерений тока и напряжения коннектор и виртуальные приборы. В качестве нелинейной катушки используйте одну катушку 200 витков миниблока «Магнитная цепь».
- Включите виртуальные амперметр, вольтметр и осциллограф для наблюдения кривых тока и напряжения. Период измерения лучше выбрать 0,02 с.
- Установите частоту генератора, максимальную амплитуду, включите генератор, отрегулируйте пределы измерения и развёртку осциллографа, зафиксируйте масштабы осциллографа.
- Плавно уменьшая и увеличивая напряжение генератора, убедитесь, что в цепи происходят скачки тока. При необходимости подрегулируйте частоту генератора, так чтобы ток после скачка составлял 60...80 мА.
- Плавно увеличивая напряжение от 0, снимите участок **0а** вольтамперной характеристики, Результаты измерений записывайте в табл. 12.2 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Увеличьте напряжение несколько выше точки **в** и уменьшая его снимите участок характеристики **вб**.

- На рис. 12.3 (смотри бланк отчета к лаб. работе) постройте график снятых участков характеристики и соедините их между собой пунктирной линией.
- Для снятия вольтамперной характеристики катушки индуктивности удалите из схемы конденсатор и, увеличивая напряжение на катушке от нуля до максимального напряжения источника, записывайте в табл. 3 значения напряжения U_{RL} и тока I .
- Измерьте омметром активное сопротивление катушки и вычислите ёмкостное сопротивление конденсатора:

$$R_k = \dots\dots\dots \text{Ом}, \quad X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \dots\dots\dots \text{Ом}.$$

- Рассчитайте и запишите в табл. 3 значения:

$$U_R = R_k I, \quad U_L = \sqrt{U_{RL}^2 - U_R^2}, \quad U_C = X_C I, \quad U_L - U_C, \quad U = \sqrt{(U_L - U_C)^2 + U_R^2}.$$

- На рис. 12. 3 постройте график $U(I)$ и сравните его с экспериментальным графиком. Сделайте выводы и объясните расхождение результатов.

12.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Совпадения экспериментальных и теоретических данных.
2. Проанализировать вольтамперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником и последовательной резонансной цепи с этой катушкой.

12.6. Контрольные вопросы.

1. Изобразить вольт-амперную характеристику катушки с сердечником.
2. При каких условиях наблюдаются триггерные эффекты в феррорезонансных цепях?
3. Каковы условия возникновения резонанса тока и напряжения?
4. Как можно достичь феррорезонансных состояний?
5. Дать определение феррорезонанса.
6. В цепь феррорезонанса напряжений включено нелинейное активное сопротивление с большим положительным температурным коэффициентом, какие явления можно ожидать в такой цепи?
7. Назвать примеры использования феррорезонансных явлений.
8. Будет ли феррорезонанс с катушкой без сердечника?

12.7. Список литературы.

1. Л.А. Бессонов, ТОЭ. М. - С. 505 - 506.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат. - С. 658 - 662.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНОГО ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКА

13.1. Цель работы.

1. Исследовать режимы работы четырёхполюсника.
2. Экспериментально определить постоянные четырёхполюсника.

13.2.1 Схема лабораторной установки.

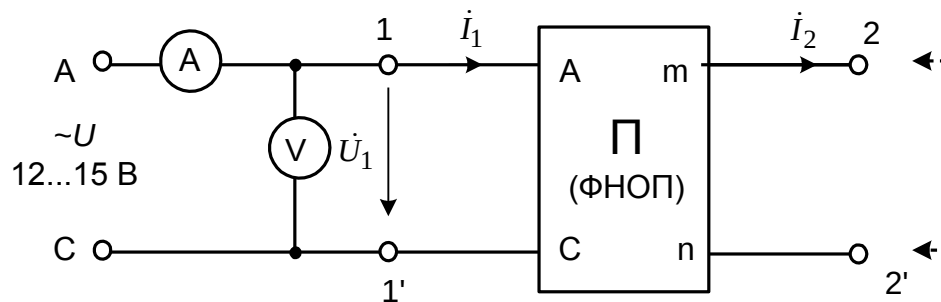


Рис.13.1. Принципиальная схема четырёхполюсника

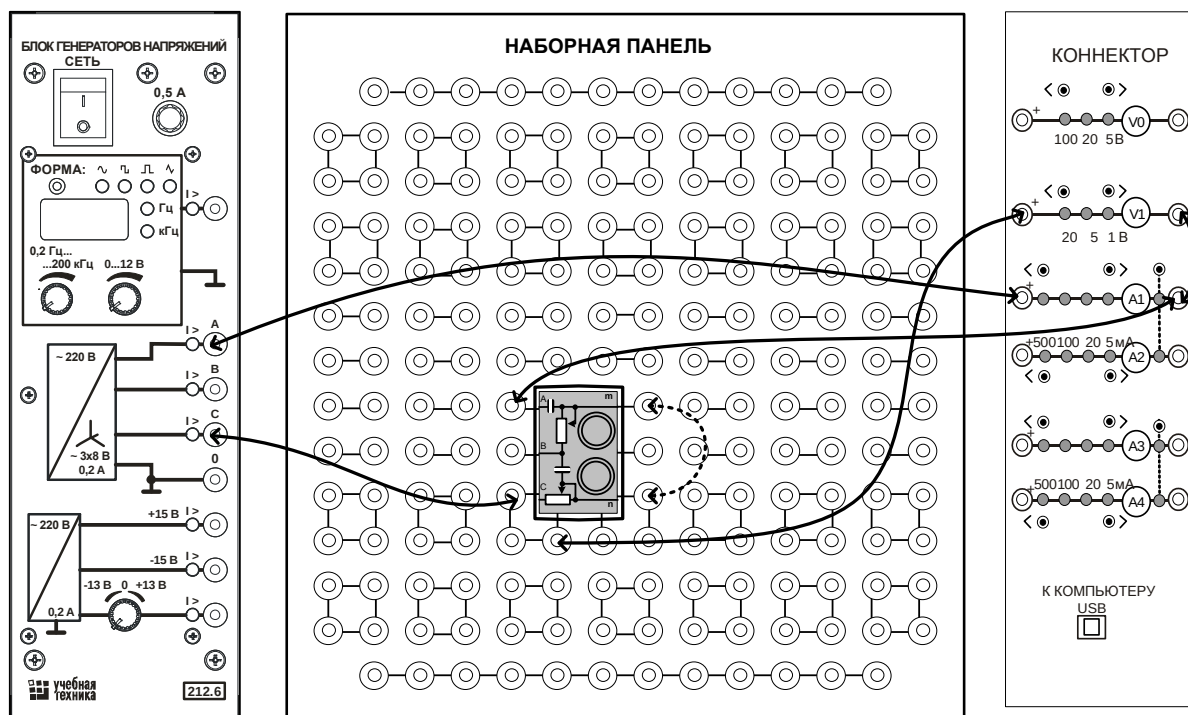


Рис. 13.2. Монтажная схема

13.3. Основные теоретические положения.

Четырёхполюсником называется любая электрическая цепь, имеющая два входных и два выходных зажима (рис.13.2). Буква П внутри обозначения четырёхполюсника обозначает, что он пассивный (без источников энергии). Четырёхполюсник описывается двумя уравнениями, связывающими входные и выходные токи и напряжения. Одна из форм записи уравнений пассивного

четырёхполосника называется формой А. При прямом питании (рис. 13.2, а) она имеет вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2.\end{aligned}$$

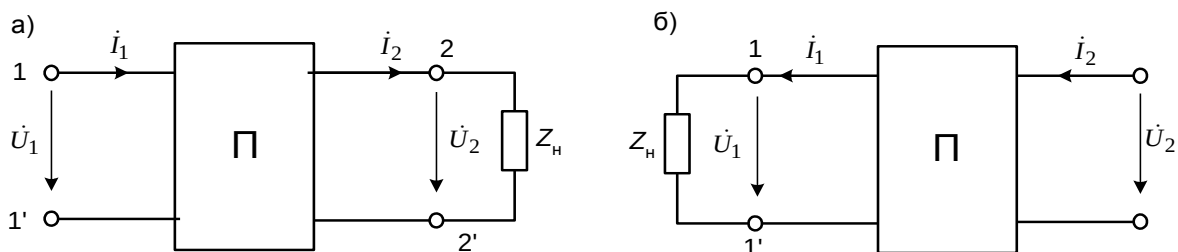


Рис. 13.2 Четырёхполосник

Коэффициенты A , B , C , D или параметры четырёхполосника в цепи синусоидального тока являются комплексными числами. В линейной цепи, подчиняющейся принципу взаимности, эти коэффициенты связаны соотношением: $AD - BC = 1$.

Значит, независимыми являются только три параметра из этих четырёх.

При обратном питании (рис. 13.2, б) уравнения четырёхполосника приобретают вид:

$$\begin{aligned}\dot{U}_2 &= D\dot{U}_1 + B\dot{I}_1; \\ \dot{I}_2 &= C\dot{U}_1 + A\dot{I}_1.\end{aligned}$$

В них коэффициенты A и D поменялись местами. Следовательно, в симметричном четырёхполоснике $A = D$.

Для того чтобы определить параметры четырёхполосника опытным путём, проделывают четыре опыта: холостой ход (хх.) и короткое замыкание (кз.) при прямом питании, а также холостой ход (охх.) и короткое замыкание (окз.) при обратном питании. В каждом из этих опытов измеряют напряжение, ток и мощность. Измерение мощности нужно для определения угла сдвига фаз из формулы: $P = UI \cos \varphi$. Поэтому, вместо мощности можно измерять непосредственно угол φ , если есть фазометр.

По опытным данным рассчитывают входные комплексные сопротивления четырёхполосника в каждом из этих режимов: Z_{1X} и Z_{1K} – при прямом питании, Z_{2X} и Z_{2K} – при обратном питании..

Из уравнений четырёхполосника при прямом и обратном питании следует, что: $Z_{1X} = \frac{\dot{U}_{1X}}{\dot{I}_{1X}} = \frac{A}{C}$; $Z_{1K} = \frac{\dot{U}_{1K}}{\dot{I}_{1K}} = \frac{B}{D}$; $Z_{2X} = \frac{\dot{U}_{2X}}{\dot{I}_{2X}} = \frac{D}{C}$; $Z_{2K} = \frac{\dot{U}_{2K}}{\dot{I}_{2K}} = \frac{B}{A}$.

Любые три уравнения из этих четырёх совместно с уравнением $AD - BC = 1$ позволяют определить параметры A , B , C , D по известным из опыта Z_{1X} , Z_{1K} , Z_{2X} и Z_{2K} . В частности, из них можно получить выражения, приведённые в табл. 2.1.

При выполнении данной работы на компьютеризованном лабораторном стенде, виртуальные приборы позволяют непосредственно «измерять»

комплексные входные сопротивления схемы (фактически компьютер их вычисляет по измеренным токам, напряжениям и мощностям).

В качестве четырёхполюсника можно использовать мини блок «Фильтр напряжения обратной последовательности», трансформатор, магнитную цепь или любую другую цепь, собранную из имеющихся сопротивлений, катушек индуктивности и конденсаторов, входные токи, напряжения и мощности в которой доступны для измерения имеющимися в стенде приборами.

13.4. Порядок проведения работы.

13.4.1 Задание на подготовку к работе.

Задача. Вычислить постоянные четырёхполюсника и параметры элементов Т-образной схем пассивного четырёхполюсника, по опытам холостого хода и короткого замыкания, если известны входные сопротивления холостого хода Z_{1x} , Z_{2x} и короткого замыкания $Z_{1к}$, $Z_{2к}$. Изобразить схемы Т-образного четырёхполюсника.

Исходные данные в табл. 13.1 в соответствии с вариантом задания и с учетом табл. 13.2

Таблица 13.1

Номер варианта	Z_{1x} , Ом	Z_{2x} , Ом	$Z_{1к}$, Ом	$Z_{2к}$, Ом
1	15j	-5j	-	-6,67j
2	-20j	-	-25j	6,25j
3	15j	30j	-	23,33j
4	-34,8j	-	-12,4j	-3,58j
5	14j	18j	-	15,45j
6	15j	-	11,67j	23,33j
7	-20j	5j	-	6,25j
8	-15j	-	20j	6,67j
9	-34,8j	-10j	-	-3,58j
10	14j	-	12j	15,45j

Таблица 13.2

Порядковый номер фамилии студента в списке класса	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы, 13.1
1 – 10	1
11 – 20	2
21 – 30	3

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

13.4.2. Задание на выполнение работы.

По опытам холостого хода и короткого замыкания определить параметры A , B , C , D четырёхполюсника, в качестве которого взять фильтр напряжения

обратного следования фаз. Входными зажимами считать выводы «А» и «С», выходными «m» и «n».

13.4.3. Порядок выполнения эксперимента.

- Соберите цепь согласно принципиальной схеме (рисунок 13.1) и монтажной схеме (рисунок 13.2). Цепь питается от линейного напряжения трёхфазного источника. Все измерительные приборы виртуальные.
- Включите компьютер, откройте блок виртуальных приборов II и активизируйте один из приборов для измерения полного сопротивления Z , а другой - для измерения угла сдвига фаз.
- Включите блок генераторов напряжений, подайте на схему напряжение 12...15 В и измерьте полное входное сопротивление и угол сдвига фаз при холостом ходе и при коротком замыкании на зажимах m-n. Значения комплексных сопротивлений в показательной форме ($Z = ze^{j\varphi}$) запишите в табл. 13.3. (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Переключите виртуальные приборы для измерения активного и реактивного сопротивлений. Запишите значения комплексных сопротивлений холостого хода и короткого замыкания теперь в алгебраической форме ($Z = R + jX$) также в таблицу 13.3. (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Поменяйте местами входные и выходные зажимы, т. е. подайте питание на зажимы mn и проделайте опыты холостого хода и короткого замыкания на зажимах АС. Измеренные значения сопротивлений в комплексной форме также занесите в таблицу 13.3. (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- При корректных измерениях должно выполняться соотношение, вытекающее из принципа взаимности: $Z_{1X} / Z_{1K} = Z_{2X} / Z_{2K}$. Убедитесь в этом, прежде чем двигаться дальше.
- Вычислите параметры A , B , C , D по приведённым выше формулам и для контроля правильности вычислений проверьте соотношение $AD - BC = 1$.

13.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Возможности экспериментального определения постоянных четырехполюсника;
2. Совпадения постоянных четырехполюсника, вычисленных по параметрам элементов цепи с постоянными четырехполюсника, определенными по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания; указать причины возможного неполного совпадения полученных результатов.

13.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение четырехполюснику.
2. Как называют определение симметричного четырехполюсника?
3. Дать определение активного четырехполюсника.
4. Дать определение пассивного четырехполюсника.
5. Записать уравнение связи для пассивного четырехполюсника.
6. Записать уравнение связи для симметричного четырехполюсника.

7. Изобразить Т- и П-образные схемы замещения четырехполюсника.
8. Дать определение коэффициенту передачи K .

13.7. Список литературы.

1. Л.А. Бессонов, ТОЭ. М. - С. 135 – 142.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат. - С. 213 – 224.
3. Конспект лекций.

Лабораторная работа № 14

СНЯТИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКА (ФИЛЬТРА НИЗКИХ ЧАСТОТ)

14.1. Цель работы.

1. Исследовать режимы работы четырёхполосника.
2. Снять и построить графики $K_U(\omega)$, $\alpha(\omega)$ и годограф $K_U(j\omega)$ Т-образного фильтра низких частот.

14.2.1 Схема лабораторной установки.

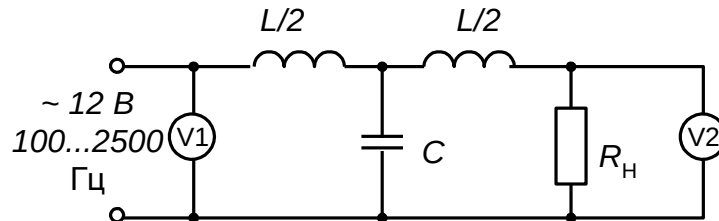


Рис. 14.1. Принципиальная схема фильтра

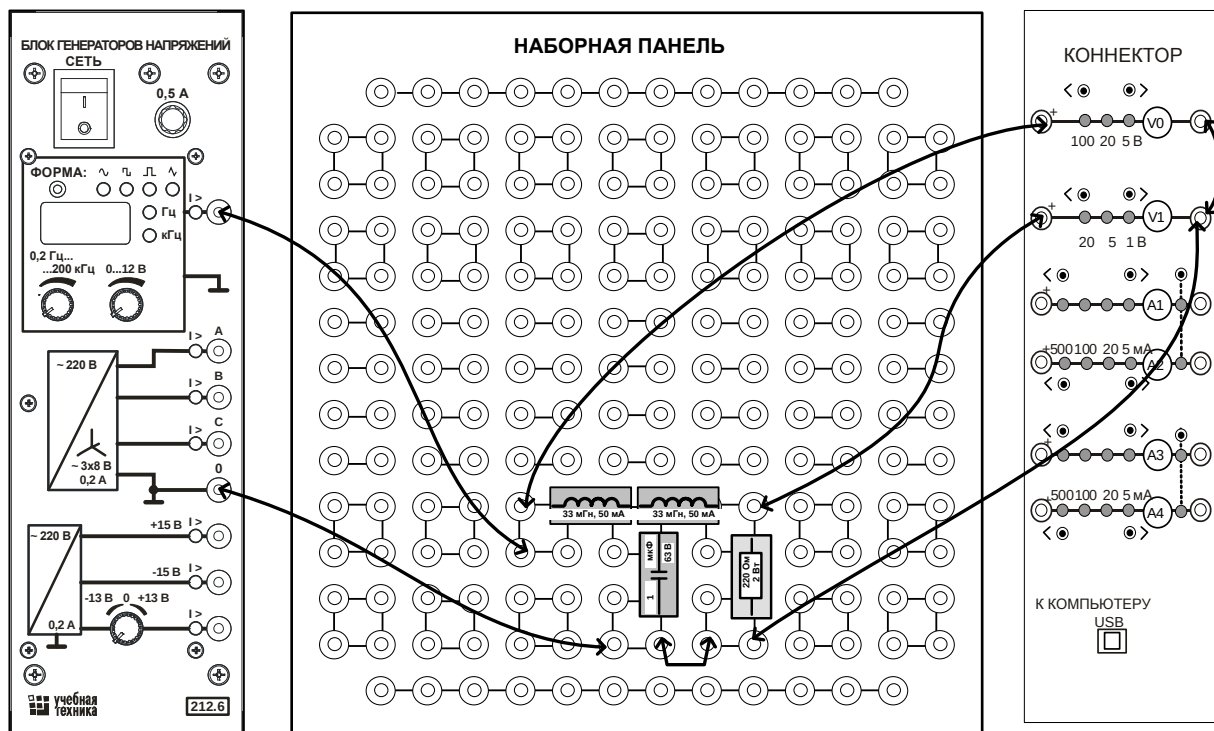


Рис. 14.2. Монтажная схема

14.3. Основные теоретические положения.

Частотной характеристикой четырёхполосника называется отношение комплексного изображения выходного сигнала четырёхполосника к изображению входного сигнала. Так, если входным и выходным сигналом являются напряжения U_1 и U_2 то получим следующие выражения частотной характеристики в показательной и алгебраической формах:

$$K_U(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = K_U(\omega)e^{j\alpha(\omega)} = K_{\text{вещ.}}(\omega) + jK_{\text{мн.}}(\omega).$$

где $K_U(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи по напряжению или амплитудно-фазовая характеристика; $K_U(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика; $\alpha(\omega)$ – фазо-частотная характеристика; $K_{\text{вещ.}}(\omega)$ и $K_{\text{мн.}}(\omega)$ – вещественная и мнимая частотные характеристики.

Геометрическое место конца вектора $K_U(j\omega)$ в комплексной плоскости при изменении частоты называют годографом амплитудно-фазовой характеристики.

14.4. Порядок проведения работы.

14.4.1. Задание на подготовку к работе.

Задача. Вычислить постоянные четырехполюсника и параметры элементов П-образной схем пассивного четырехполюсника, по опытам холостого хода и короткого замыкания, если известны входные сопротивления холостого хода Z_{1x} , Z_{2x} и короткого замыкания $Z_{1к}$, $Z_{2к}$. Изобразить схемы П-образного четырехполюсника. Исходные данные в табл. 14.1 в соответствии с вариантом задания и с учетом табл. 14.2

Таблица 14.1

Номер варианта	Z_{1x} , Ом	Z_{2x} , Ом	$Z_{1к}$, Ом	$Z_{2к}$, Ом
1	15j	-5j	-	-6,67j
2	-20j	-	-25j	6,25j
3	15j	30j	-	23,33j
4	-34,8j	-	-12,4j	-3,58j
5	14j	18j	-	15,45j
6	15j	-	11,67j	23,33j
7	-20j	5j	-	6,25j
8	-15j	-	20j	6,67j
9	-34,8j	-10j	-	-3,58j
10	14j	-	12j	15,45j

Таблица 14.2

Порядковый номер фамилии студента в списке класса	Коэффициент, на который умножаются исходные данные таблицы, 14.1
1 – 10	1
11 – 20	2
21 – 30	3

Подготовить бланк отчёта по лабораторной работе, который должен содержать:

- название и цель лабораторной работы;
- схему лабораторной установки (по ГОСТу и с учётом ЕСКД);
- задачу, согласно номеру варианта, ответы на контрольные вопросы;
- расчёты и выводы.

14.4.2. Задание на выполнение работы.

Снять и построить графики $K_U(\omega)$, $\alpha(\omega)$ и годограф $K_U(j\omega)$ Т-образного фильтра низких частот (рис. 14.1).

14.4.3. Порядок выполнения эксперимента.

- Соберите цепь Т-образного фильтра низких частот (рис. 14.1, 14.2), активизируйте виртуальные приборы для измерения входного и выходного напряжения и сдвига фаз между ними. Активизируйте также осциллограф для контроля формы сигналов.
- Установите на входе минимальную частоту, которую может дать генератор. Подберите максимальную амплитуду входного синусоидального сигнала, при которой искажения выходного напряжения ещё незначительны. (Искажения могут возникнуть при большом токе из-за нелинейности катушек индуктивности, которые выполнены на ферритовом сердечнике).
- Увеличивая частоту до значения, при котором выходной сигнал снижается не менее чем в 10 раз при неизменном входном сигнале, снимите зависимости $U_2(\omega)$ и $\alpha(\omega)$. Результаты занесите в табл. 14.3 (смотри бланк отчета к лаб. работе).
- Рассчитайте $K_U(\omega)$ и на рис. 14.3 постройте графики $K_U(\omega)$ и $\alpha(\omega)$, а на рис. 14.4 – годограф $K_U(j\omega)$ (смотри бланк отчета к лаб. работе).

14.5. Выводы.

В выводах сделать заключение относительно:

1. Возможности экспериментального определения частотных характеристик четырёхполюсника.
2. Проанализировать режимы работы четырёхполюсника.

14.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение четырёхполюсника.
2. Дайте определение несимметричного четырёхполюсника.
3. Дать определение активному четырёхполюснику.
4. Дать определение пассивному четырёхполюснику.
5. Записать уравнение связи для пассивного четырёхполюсника.
6. Записать уравнение связи для симметричного четырёхполюсника.
7. Изобразить Т- и П-образные схемы замещения четырёхполюсника.
8. Дать определение коэффициенту передачи K ?

14.7. Список литературы.

1. Л.А. Бессонов, ТОЭ. М. - С. 167 – 175.
2. Г.В. Зевеке и др. ОТЦ. М. – Энергоатомиздат. - С. 443 – 456.
3. Конспект лекций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973. – 724 с.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Теоретические основы электротехники. Т.1, 2. Учебник для вузов / К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровин, В.Л. Чечурин. – СПб: Питер, 2004.
4. Абейдулин С.А., Бугаева П.В. Сборник практических и лабораторных работ по электротехнике/ С.А. Абейдулин. – Севастополь: 2016. – 68 с.
5. Абейдулин С.А. Сборник задач по электротехнике [Текст]: сборник задач / С.А. Абейдулин. - Севастополь: СНУЯЭиП, 2007. - 72 с.: рис.
6. Абейдулин С.А., Гусева Е.В. Сборник лабораторных работ по электротехнике / Абейдулин С.А., Гусева Е.В. - Севастополь: СевГУ, 2018. – 73 с.

В авторской редакции