

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

*Учебно-методическое пособие  
по выполнению расчетных и лабораторных  
работ по теоретической электротехнике*

Донецк – ДонНТУ – 2014

УДК 621.3.01 /07/

Рекомендовано Учёным Советом ДонНТУ как учебно-методическое пособие (Протокол №6 от 20.06.2014)

Учебно-методическое пособие по выполнению расчетных и лабораторных работ по теоретической электротехнике / Под общей редакцией проф. В.Ф. Денника. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – 100 с.

Настоящие методические указания предназначены для студентов факультетов КИТА, КНТ и частично для студентов других факультетов, выполняющих лабораторные работы по дисциплинам, которые могут быть объединены понятием «Теоретическая электротехника» (ТОЭ, теория электрических и магнитных цепей, электротехнические основы устройств вычислительной техники и др.), на стендах типа УИЛС (учебно-исследовательский лабораторный стенд). Методические указания содержат общие сведения и технические данные стендов типа УИЛС, правила безопасности и внутреннего распорядка в лабораториях секции ТОЭ кафедры «Электромеханика и ТОЭ», а также инструкции по выполнению семнадцати лабораторных работ по исследованию различных режимов в электрических цепях постоянного и переменного токов.

Составители:	М.М.Фёдоров, проф.
	В.Ф. Денник, проф.
	А.В. Корощенко, доц.
	В.Е. Михайлов, доц.
	Е.А. Журавель, доц.
	В.Х. Антамонов, доц.
	В.П. Черноус, доц.
	О.Г. Шелехова, доц.
	М.В. Апухтин, ст. пр.
	Е.В. Черноус, ст. пр.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие указания по выполнению расчётных и лабораторных работ .....	4
Общие сведения о стенде УИЛС-2 .....	6
Порядок составления отчета о лабораторной работе .....	8
Лабораторная работа № 1. Определение параметров элементов электрических цепей и исследование простых цепей постоянного тока .....	10
Лабораторная работа № 2. Исследование сложной электрической цепи постоянного тока .....	16
Лабораторная работа № 3. Исследование цепей синусоидального тока при последовательном соединении элементов и параллельном соединении ветвей .....	22
Лабораторная работа № 4. Исследование разветвленных цепей синусоидального тока .....	30
Лабораторная работа № 5. Исследование резонансных явлений .....	36
Лабораторная работа № 6. Исследование цепей с взаимной индуктивностью .....	42
Лабораторная работа № 7. Исследование трёхфазных цепей .....	46
Лабораторная работа № 8. Исследование электрических цепей несинусоидального тока .....	52
Лабораторная работа № 9. Исследование переходных процессов в электрических цепях постоянного тока с одним накопителем энергии .....	56
Лабораторная работа № 10. Исследование переходных процессов в последовательной цепи постоянного тока с $r$ , $L$ , $C$ – элементами .....	63
Лабораторная работа № 11. Исследование нелинейных цепей постоянного тока .....	69
Лабораторная работа № 12. Исследование разветвленных цепей с вентилями, содержащих источники постоянного и синусоидального напряжений .....	73
Лабораторная работа № 13. Исследование однофазных выпрямителей синусоидального тока .....	79
Лабораторная работа № 14. Исследование пассивных четырехполюсников .....	82
Лабораторная работа № 15. Исследование электрических фильтров .....	87
Лабораторная работа № 16. Исследование свойств электрических цепей со взаимной индуктивностью .....	91
Лабораторная работа № 17. Исследование свойств трехфазных цепей при несимметричной нагрузке .....	96
Литература .....	100

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### Правила внутреннего распорядка

1. Лабораторные работы выполняются в соответствии с графиком учебного процесса, который доводится до студентов в начале каждого семестра.

2. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по правилам техники безопасности.

3. Лабораторные работы выполняются бригадами по 2-3 человека.

4. Каждый студент должен заранее подготовиться к очередному занятию в лаборатории, а требуемые схемы, расчеты, таблицы и пояснения по выполнению лабораторной работы необходимо занести в черновую тетрадь. Неподготовленные студенты к выполнению лабораторных работ не допускаются.

5. Перед выполнением работы старший в бригаде получает у лаборанта комплект наборных элементов и необходимую электроизмерительную аппаратуру, за которую несет полную ответственность, и после окончания работы сдает их лаборанту.

6. Во время занятий в лаборатории должны поддерживаться надлежащий порядок и деловая обстановка. Ответственность за поддержание порядка несет староста группы и дежурный студент.

7. При выполнении лабораторных работ требуется неукоснительное выполнение правил техники безопасности.

8. По окончании работы в черновой тетради каждого студента преподаватель делает отметку о правильном и полном выполнении работы. В случае неправильности полученных результатов работа повторяется.

9. По выполненным лабораторным работам каждый студент оформляет и защищает отчет. Эта работа планируется в конце текущего занятия. Однако если подготовка студента к занятию недостаточна и лабораторные исследования потребовали слишком много времени, то защита отчета о выполненной работе переносится на следующее лабораторное занятие или на консультацию.

10. Пропущенные лабораторные работы отрабатываются во внеурочное время согласно установленному графику.

11. Студенты, нарушающие правила внутреннего распорядка, удаляются из лаборатории и об их проступках сообщается заведующему кафедрой или декану факультета.

### Правила техники безопасности

Практически все напряжения, с которыми приходится иметь дело в лабораториях кафедры электромеханики и ТОЭ, являются опасными для жизни человека, поэтому при выполнении лабораторных работ необходимо строго выполнять следующие правила безопасности.

1. Электрические цепи должны собираться только при отключенном источнике питания.

2. Собранная схема должна быть проверена преподавателем или лаборантом. Включать схему можно только с их разрешения.

3. Перед включением электрической цепи все её элементы (реостаты, регулируемые источники, реактивные катушки и т.д.) должны находиться в таком положении, чтобы ток при включении схемы был минимальным.

4. Все студенты должны быть ознакомлены с системой аварийного отключения источников.

5. В лаборатории запрещается:

5.1. Включать схему без предупреждения. Перед включением необходимо громко сказать: «Подаю напряжение!».

5.2. Прикасаться к неизолированным частям установки, находящейся под напряжением.

5.3. Производить пересоединения в электрической цепи, находящейся под напряжением. Всякие пересоединения выполняются при отключенном питании и после каждого пересоединения схема вновь должна быть проверена преподавателем или лаборантом.

5.4. Загромождать лабораторные столы посторонними предметами: приборами и аппаратами, не предназначенными для выполнения данной работы, лишними соединительными проводами, сумками, книгами и т.д.

5.5. Оставлять без наблюдения установку, находящуюся под напряжением.

5.6. Разбирать электрическую цепь с конденсатором после её отключения от источника без предварительного разряда конденсатора.

5.7. Включать электрическую цепь в случае, когда один из концов монтажных проводов остается свободным.

5.8. Самому ремонтировать приборы, аппараты и другое электрооборудование.

5.9. Работать одному с электроустановками.

6. В случае аварии на рабочем месте (повреждение приборов, перегорание предохранителей и т.п.) студент обязан немедленно отключить питание на рабочем месте и сообщить преподавателю о случившемся.

7. В случае попадания кого-либо под напряжение необходимо отключить питание на рабочем столе (или нажать кнопку аварийного отключения всей лаборатории), оказать первую помощь пострадавшему и немедленно вызвать скорую помощь.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТЕНДЕ УИЛС-2

Универсальные учебно-исследовательские лабораторные стенды типа УИЛС предназначены для выполнения комплекса лабораторных работ по курсам, которые могут быть объединены понятием «Теоретическая электротехника» (ТОЭ, теория электрических и магнитных цепей, электротехнические основы устройств вычислительной техники и др.), а также учебно-исследовательских работ студентов.

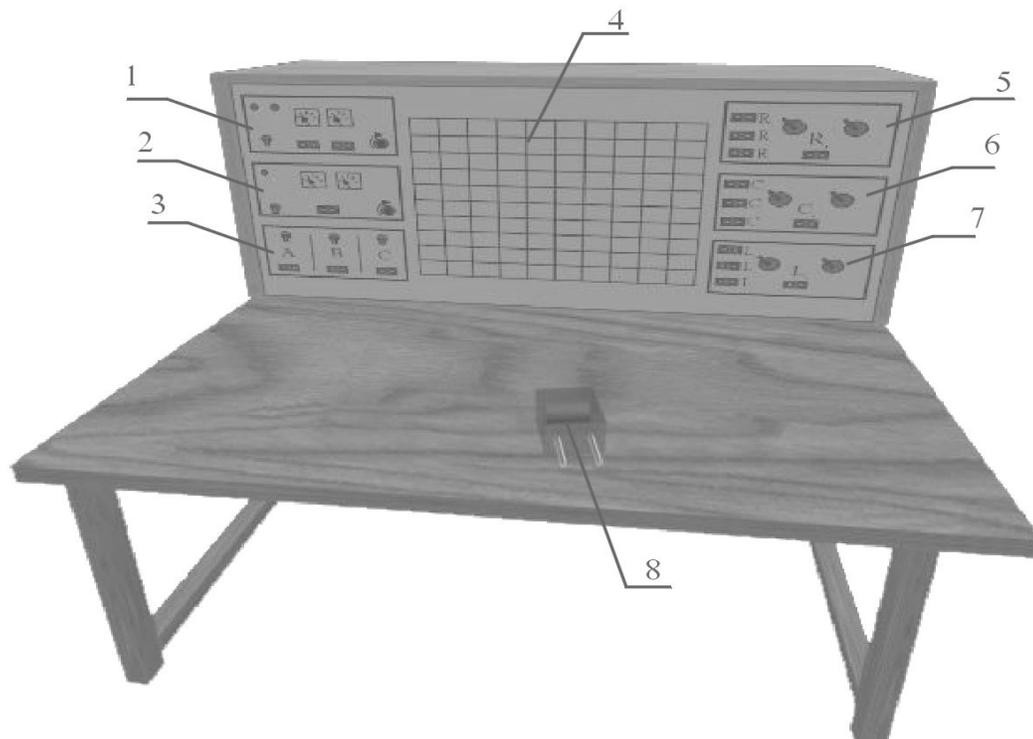


Рис. 0.1. Общий вид лабораторного стенда типа УИЛС

Общий вид стенда УИЛС-2 приведен на рис. 0.1. Здесь:

- 1 – блок источников постоянного напряжения;
- 2 – блок однофазного переменного напряжения синусоидальной, треугольной и прямоугольной форм;
- 3 – блок трёхфазного напряжения;
- 4 – наборное поле;
- 5 – блок стационарных резисторов;
- 6 – блок стационарных ёмкостей;
- 7 – блок стационарных индуктивностей;
- 8 – съёмный элемент стенда.

Питание стенда осуществляется от трёхфазной сети с напряжением 380, 220 или 127 В. Потребляемая мощность не более 500 ВА. Стенд имеет блоки питания постоянного, однофазного и трёхфазного переменного токов, блоки стационарных  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – элементов и наборное поле. Все блоки питания стенда снабжены электронной защитой, срабатывающей при токе 1 А. На задней стенке стенда имеются розетки с напряжением 220 В для питания изме-

рительных приборов. Каждому стенду придается комплект-набор съёмных  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – элементов, соединительных проводов и перемычек в виде штепсельных вилок.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СТЕНДА УИЛС-2

Таблица 1. Блоки источников энергии

№ пп	Источник	$U, B$	$I, A$	$f$	$R_6, Ом$
1	нерегулируемого постоянного напряжения	20	1	-	5-6.5
2	регулируемого постоянного напряжения	0-24	1	-	1.4-2.2
3	однофазного переменного напряжения синусоидальной, треугольной и прямоугольной форм	0-24	1	1-8 кГц	-
4	трёхфазного напряжения	0-39	1	50 Гц	-

Таблица 2. Блоки стационарных элементов

$R$	$R_1=100 Ом,$ $P_{дон}=10 Вт$	$R_2=200 Ом,$ $P_{дон}=10 Вт$	$R_3=400 Ом,$ $P_{дон}=7.5-15 Вт$	$R_4=0-1000 Ом,$ $P_{дон}=2 Вт$
$C$	$C_1=5 мкФ$	$C_2=10 мкФ$	$C_3=20 мкФ$	$C_4=0-10 мкФ$
$L$	$L_1=175 мГн$ $r_1=3.75 Ом$	$L_2=690 мГн$ $r_2=21 Ом$	$L_3=5.5 Гн$ $r_3=6.5 Ом$	$L_4=0-100 мГн$ $r_4=0-52 Ом$
Элементы $L_1$ и $L_2$ размещены на общем сердечнике, $M_{12} = 250 мГн$				

Таблица 3. Комплект-набор съёмных элементов

Резисторы		Конденсаторы		Индуктивности			
№ элемента	$P_{дон}=2 Вт;$ $R, Ом$	№ элемента	$U_{дон}=160 В;$ $C, мкФ$	№ элемента	$L, мГн$	$r_L, Ом$	$I_{дон}, мА$
01	51	11	0.1	21	3	0.64	190
02	75	12	0.25	22	5	0.78	150
03	100	13	0.5	23	7	0.9	125
04	150	14	0.75	24	10	0.9	100
05	200	15	1.0	25	15	1.18	85
06	300	16	1.25	26	20	1.38	75
07	510	17	1.5	27	30	1.63	60
08	700	18	1.75	28	50	2.05	50
09	800	19	2.0	29	70	2.5	40
10	1000	20	5.0	30	2	0.35	220
Разброс параметров указанных элементов составляет $\pm 5-10\%$							
НЭ1 – нелинейное сопротивление							
НЭ2 – лампа накаливания							
НЭ3 – полупроводниковый диод							
В комплекте-наборе имеются также: длинные провода – 14 шт; короткие провода – 15 шт; перемычки (вилки) – 25 шт.							

## ПОРЯДОК СОСТАВЛЕНИЯ ОТЧЕТА О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Составление отчета о лабораторной работе имеет своей целью выработать у студентов навыки четкого и грамотного изложения результатов любого инженерного исследования.

Отчет о выполненной лабораторной работе составляется студентом на основе записей, сделанных в личной черновой тетради в процессе подготовки и выполнения работы. Отчет оформляется на скрепленных листах стандартного формата А4. Допускается оформление отчета на развернутых листах учебных тетрадей в клетку.

Отчет должен содержать:

- Титульный лист (см. образец). Допускается титульный лист не делать, однако в обязательном порядке должны быть указаны: группа, Ф. И. О. студента и по какой лабораторной работе представлен отчет.
- Изложение цели данной лабораторной работы, результаты домашней подготовки, включая исследуемые схемы, таблицы результатов расчетов и экспериментов, требуемые графики, диаграммы и пр.
- Заключение или краткие выводы по итогам работы.

Цель работы и её реализация должны быть изложены кратко, последовательно, с разбивкой на завершённые в смысловом отношении части, соответствующие выполненным в работе экспериментам. Пояснения к работе, имеющиеся в методуказаниях, в отчете приводить не следует. Отчет должен быть составлен именно по выполнению работы.

На расчетных схемах необходимо указать принимаемые положительные направления искомых токов и напряжений.

Решение заданий домашней подготовки следует сопровождать краткими пояснениями. Искомая величина вначале определяется в буквенном выражении, затем подставляются числовые значения величин, приводятся основные этапы преобразований и конечный результат, который должен ясно

выделяться из общего текста с обязательным указанием его размерности. При

### ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

<p>МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ</p> <p>Донецкий национальный технический университет</p> <p>Кафедра электромеханики и ТОЭ</p> <p>ОТЧЕТ о лабораторной работе № 2 «Исследование сложной цепи постоянного тока»</p> <p>Выполнил ст. гр СУА-13-3 Аникев С.</p> <p>Принял _____</p> <p>Донецк - 2014</p>
--

округлении чисел рекомендуется указывать три значащие цифры, например, 314, 0.197,  $22.6 \cdot 10^{-6}$  и т.д.

Рабочие схемы, таблицы результатов, графики и диаграммы должны иметь наименования и краткие пояснения типа: “по данным табл. 2 построена зависимость  $U_{\text{вых}}(I_{\text{н}})$  – см. рис. 2” и т.д.

Особое внимание следует уделить графической части отчета. Схемы, графики, диаграммы рекомендуется выполнять карандашом, применяя чертежные принадлежности и соблюдая требования ГОСТ и ЕСКД. Изображение элементов на схемах, как правило, должно быть вертикальным или горизонтальным. Размеры схем и графиков не следует чрезмерно растягивать или, напротив, выполнять их слишком мелкими. Вполне удобны и достаточны для наглядности рисунки размером  $8 \times 10 \text{ см}^2$ , т.е. в четверть тетрадного листа. В некоторых случаях графики можно выполнять на отдельных листах миллиметровой бумаги стандартных форматов. Рекомендуемые по ГОСТ масштабы: 1:1, 1:2, 1:5, 1:10.

Итоги проделанной работы могут быть изложены в форме заключения по работе или в виде кратких выводов, которые бы конкретно, со ссылками на таблицы или графики, отвечали пунктам цели работы.

Отчет должен быть подписан студентом.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

**Определение параметров элементов электрических цепей и исследование простых цепей постоянного тока**

Цель работы: экспериментальное получение вольтамперных характеристик и определение параметров активных и пассивных элементов электрических цепей, а также проверка соотношений, используемых для расчета простых электрических цепей постоянного тока.

## Пояснения к работе

Все элементы электрических цепей, как активные (источники), так и пассивные (приемники), характеризуются номинальными параметрами и зависимостью между током и напряжением, которая называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ) элемента. В цепи постоянного тока параметрами пассивного элемента (резистора) являются сопротивление  $R$ , в котором происходит преобразование электрической энергии в тепловую, и потребляемая мощность, которая определяется выражениями:

$$P = I^2 R, \quad P = \frac{U^2}{R}.$$

Активные элементы цепи, к которым относятся реальные источники энергии постоянного тока, представляют эквивалентными схемами с источником ЭДС (рис. 1.1а), либо с источником тока (рис. 1.1б). В схеме с источником ЭДС параметрами являются величина ЭДС  $E$  и внутреннее сопротивление  $r_{вн}$ , которое включено последовательно с источником. В схеме с источником тока параметрами являются величина тока источника  $J$  и внутренняя проводимость  $g_{вн}$ , которая подключена параллельно источнику.

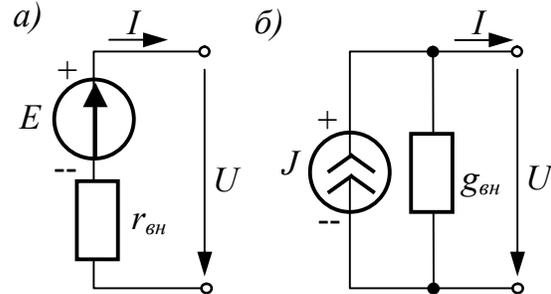


Рис. 1.1 Схемы замещения источника энергии

Параметры пассивных и активных элементов могут рассчитываться на основе закона Ома и законов Кирхгофа по экспериментально снятым ВАХ.

Так, ВАХ источника энергии постоянного тока (она называется еще внешней или нагрузочной характеристикой источника) может быть получена экспериментально с помощью схемы рис. 1.2, в которой ток  $I$  изменяется с помощью переменного резистора  $R_n$ , который используется как нагрузка. ВАХ схемы замещения источников и их параметры описываются выражениями:

$$U = E - I \cdot r_{вн}, \quad E = U_{xx}, \quad r_{вн} = \frac{E - U}{I},$$

$$I = J - U \cdot g_{вн}, \quad J = I_{кз}, \quad g_{вн} = \frac{J - I}{U},$$

где  $U_{хх}$  – напряжение холостого хода источника;  
 $I_{кз}$  – ток короткого замыкания источника.

Переход от параметров одной схемы к параметрам другой производится по формулам :

$$g_{вн} = \frac{1}{r_{вн}}, \quad E = \frac{J}{g_{вн}}, \quad J = \frac{E}{r_{вн}}.$$

ВАХ пассивных элементов могут быть получены с помощью схемы рис. 1.3, в которой используется источник регулируемого напряжения.

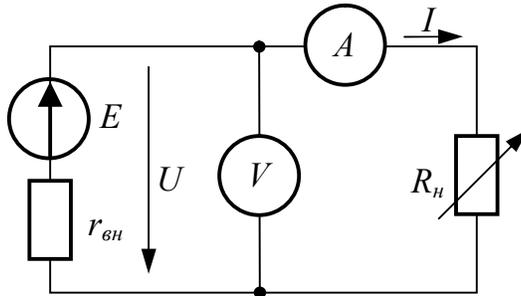


Рис. 1.2. Схема для снятия ВАХ источника энергии

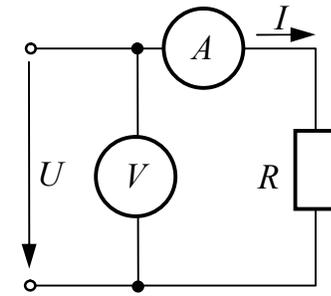


Рис. 1.3. Схема для снятия ВАХ резистора

Величина сопротивления резистора определяется по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Приведенный способ определения сопротивлений элементов называется методом амперметра-вольтметра. Кроме этого, сопротивление линейного резистивного элемента может быть измерено омметром. На корпусе резистора в качестве его параметров маркируется (указывается) номинальное сопротивление  $R_{ном}$  и допустимая мощность рассеивания  $P_{доп}$ , при которой резистор может работать продолжительное время. Это позволяет определить допустимый ток и допустимое напряжение на резисторе

$$I_{доп} \leq \sqrt{\frac{P_{доп}}{R_{ном}}}, \quad U_{доп} \leq I_{доп} \cdot R_{ном}.$$

Электрические цепи подразделяются на простые и сложные. К простым относятся цепи с одним источником энергии, расчет токов в них выполняется по законам Ома и Кирхгофа.

В качестве примера на рис. 1.4 приведена схема простой электрической цепи, в которой по заданным параметрам (напряжение источника  $U$  и сопротивления резистивных элементов  $r_1, r_2, r_3, r_4$  и  $r_5$ ) требуется определить токи всех ветвей, положительные направления которых указываются в соответствии с направлением действия источника.

Расчет начинается с тока источника  $I_1$  и выполняется по закону Ома. Для этого относительно зажимов источника определяется входное сопротивление

$r_{ex}$ , которое рассчитывается путем поэтапного преобразования последовательных и параллельных соединений участков цепи

$$r_{45} = \frac{r_4 r_5}{r_4 + r_5}, \quad r_{345} = r_3 + r_{45}, \quad r_{26} = r_2 + r_6,$$

$$r_{ex} = r_1 + \frac{r_{26} r_{345}}{r_{26} + r_{345}}, \quad I_1 = \frac{E}{r_{ex}}.$$

Для определения токов в параллельных ветвях  $I_2$  и  $I_3$  предварительно определяется напряжение на параллельном соединении

$$U_{13} = I_1 \cdot \frac{r_{26} r_{345}}{r_{26} + r_{345}}$$

Далее 
$$I_2 = \frac{U_{13}}{r_{26}} \quad \text{и} \quad I_3 = \frac{U_{13}}{r_{345}}$$

или после подстановки 
$$I_2 = I_1 \cdot \frac{r_{345}}{r_{26} + r_{345}}, \quad I_3 = I_1 \cdot \frac{r_{26}}{r_{26} + r_{345}}.$$

Токи в параллельных ветвях  $I_4$  и  $I_5$  определяются через напряжение  $U_{23}$ :

$$U_{23} = I_3 \cdot r_{45}, \quad I_4 = \frac{U_{23}}{r_4}, \quad I_5 = \frac{U_{23}}{r_5},$$

или распределением тока  $I_3$  в эти ветви

$$I_4 = I_3 \cdot \frac{r_5}{r_4 + r_5}, \quad I_5 = I_3 \cdot \frac{r_4}{r_4 + r_5}.$$

Последние выражения получили название формулы распределения тока в две параллельные ветви.

Проверка правильности вычислений может быть выполнена с помощью законов Кирхгофа.

Для узлов «1» и «2» по первому закону Кирхгофа, соответственно

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0, \quad I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

По второму закону Кирхгофа

для контура «E-r<sub>1</sub>-1- r<sub>2</sub>- r<sub>6</sub>-3» : 
$$I_1 r_1 + I_2 (r_2 + r_6) = E,$$

для контура «1-r<sub>3</sub>-2- r<sub>4</sub>-3 r<sub>6</sub>- r<sub>2</sub>» : 
$$I_2 (r_2 + r_6) - I_4 r_4 - I_3 r_3 = 0,$$

для контура «2-r<sub>5</sub>-3- r<sub>4</sub>» : 
$$I_5 r_5 - I_4 r_4 = 0.$$

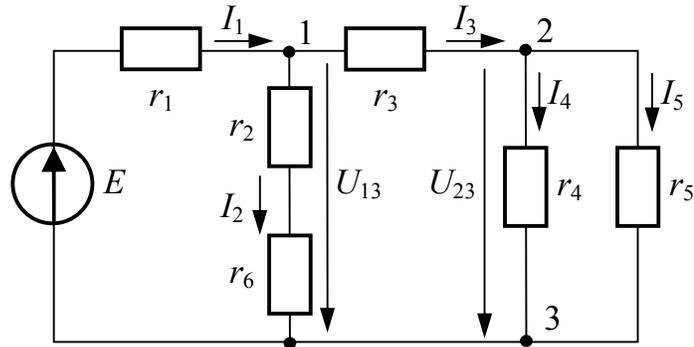


Рис. 1.4. Расчетная схема электрической цепи

### Домашняя подготовка к работе

1. Изучить схемы замещения реальных источников энергии, вычертить

схемы рис. 1.2 и рис. 1.3 для проведения измерений при снятии нагрузочных характеристик источников и ВАХ резистивного элемента.

2. Из табл. 3 (технические данные стенда УИЛС-2) выбрать съемный резистивный элемент (номер элемента соответствует номеру варианта, который, в свою очередь, определяется номером бригады). Рассчитать максимально допустимое напряжение на резистивном элементе  $U_{доп}$  (из условия допустимой мощности рассеивания  $P_{доп} = 2 \text{ Вт}$ ). Подготовить табл. 1.1 для занесения результатов измерений и расчетов.

Таблица 1.1. Вольт-амперные характеристики и параметры элементов

Нерегулируемый источник постоянного напряжения				Регулируемый источник постоянного напряжения ( $U=15 \text{ В}$ )				Резистор ____ $R_{ном} = \text{____}$ $U_{доп} = \text{____}$			
$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$r_{вн1}, \text{ Ом}$	Параметры источника	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$r_{вн2}, \text{ Ом}$	Параметры источника	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$R, \text{ Ом}$	
	0		$E_1 =$ $r_{вн1} =$ $J_1 =$ $g_{вн1} =$	15	0		$E_2 =$ $r_{вн2} =$ $J_2 =$ $g_{вн2} =$				
	0.1				0.1						
	0.2				0.2						
	0.3				0.3						
	0.4				0.4						
	0.5				0.5						

3. Изучить основные законы и соотношения для расчета простых электрических цепей: закон Ома, первый и второй законы Кирхгофа, формулы расчета сопротивления участка цепи при последовательном и параллельном соединении элементов, формулы расчета мощности и формулу распределения тока в две параллельные ветви.

4. В соответствии с номером варианта выбрать и вычертить исследуемую схему (рис. 1.5). В качестве сопротивления  $r_1$  принять элемент 01, в качестве  $r_2$  – элемент 02 и т.д. (см. табл. 3 в общих сведениях о стенде УИЛС-2).

Обозначить на схеме и указать положительные направления токов в ветвях и напряжений на отдельных участках. Выполнить расчет токов при напряжении источника  $U = 18 \text{ В}$ . Результаты расчета занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Результаты расчетов и измерений в исследуемой электрической цепи

Исследуемые токи, $\text{мА}$						
Расчет						
Эксперимент						

5. Записать и изучить порядок выполнения работы в лаборатории, ознакомиться с контрольными вопросами к лабораторной работе.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 1.2 сначала с источником нерегулируемого, а затем с источником регулируемого постоянного напряжения (при напряжении  $U = 15 \text{ В}$ ) и снять их нагрузочные характеристики. В качестве нагрузки  $R_n$  использовать переменное сопротивление (резистор  $R_4$  в блоке стационарных пассивных элементов стенда). При снятии характеристик ток следует изменять в пределах  $0\text{--}500 \text{ мА}$  с шагом  $100 \text{ мА}$ . Холостой ход источника ( $I = 0$ ,  $U = U_{xx}$ ) обеспечить отключением резистора  $R_n$ .

Рассчитать параметры источников  $E_1, r_{вн1}, E_2, r_{вн2}$  для последовательной и  $J_1, g_{вн1}, J_2, g_{вн2}$  для параллельной схем замещения. Внутреннее сопротивление (проводимость) источников определить как среднее значение величин, полученных из экспериментальных данных.

Результаты измерений и расчетов занести в табл. 1.1, по данным которой построить графики нагрузочных характеристик источников.

2. Собрать схему рис. 1.3 с источником регулируемого напряжения и выбранным резистивным элементом. Изменяя напряжение источника от нуля до  $20 \text{ В}$  (не превышая при этом максимально допустимое значение  $U_{дон}$ ), произвести измерение токов и напряжений (диапазон изменения напряжения разбить на равные интервалы и снять 5 – 6 точек). Рассчитать сопротивление в этих точках и построить ВАХ элемента.

3. Собрать схему рис. 1.5, предусмотрев в ней возможность измерения токов во всех ветвях (использовать короткозамкнутые перемычки в каждой ветви). Установить напряжение источника регулируемого напряжения  $U = 18 \text{ В}$  и произвести измерение токов ветвей, поочередно подключая амперметр (вместо перемычек) в каждую ветвь. Результаты измерений занести в табл. 1.2.

4. Для схемы рис. 1.5 составить уравнения по первому и второму законам Кирхгофа и убедиться в их выполнении, используя при этом экспериментальные значения напряжений и токов. Сделать выводы по результатам лабораторной работы.

### Вопросы для самоконтроля

1. Запишите уравнения, описывающие нагрузочные характеристики реальных источников энергии и представьте их графики.

2. Каким образом экспериментально определяются параметры источника энергии  $E$  и  $r_{вн}$ ?

3. Известны параметры реального источника энергии  $E$  и  $r_{вн}$ . Составьте его эквивалентную схему замещения с источником тока и укажите, как определяются ее параметры.

4. Сформулируйте закон Ома и законы Кирхгофа для электрических цепей постоянного тока.

5. Общий ток в цепи, состоящей из двух параллельно включенных резисторов  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ , равен  $10 \text{ А}$ . Пользуясь правилом распределения токов в параллельные ветви, определите токи в каждом из сопротивлений.

6. Представлена цепь, в которой параллельно включены 4 резистора с сопротивлениями 2, 2, 8 и 8 Ом. Определите входное сопротивление такой

цепи.

7. Последовательно соединены 4 резистора с сопротивлениями 2, 8, 6 и 4 Ом. Определите напряжение на входе цепи, если напряжение на последнем резисторе равно 16 В.

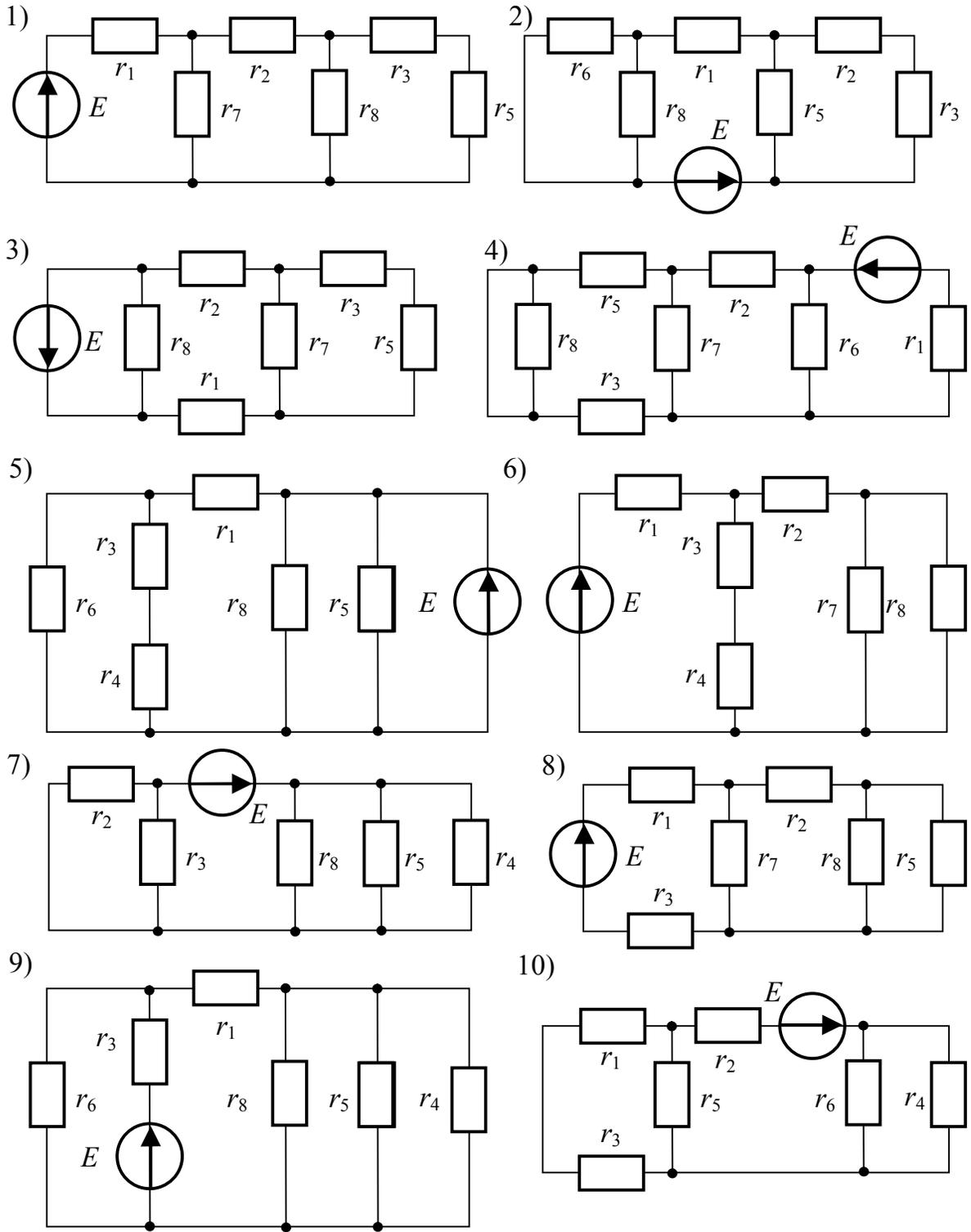


Рис. 1.5. Варианты схем для исследований

**Исследование сложной электрической цепи постоянного тока**

Цель работы: экспериментальная проверка основных методов расчета линейных электрических цепей постоянного тока: наложения, узловых потенциалов, эквивалентного генератора.

## Пояснения к работе

Принцип наложения присущ только линейным цепям. Он заключается в том, что ток любой ветви определяется алгебраическим суммированием составляющих, создаваемых под действием каждого источника энергии в отдельности. Все остальные источники энергии в этом случае исключаются из цепи (заменяются их внутренними сопротивлениями).

В качестве примера рассмотрена электрическая цепь, представленная на рис. 2.1. Параметры элементов цепи известны, требуется определить токи в ветвях схемы с помощью метода наложения.

Сначала определяются составляющие токов в ветвях схемы при действии только источника ЭДС  $E_1$  (рис. 2.2а):

$$I_1' = \frac{E_1}{r_1 + \frac{r_3(r_4 + r_6)}{r_3 + r_4 + r_6}}, \quad I_3' = I_1' \frac{(r_4 + r_6)}{r_3 + r_4 + r_6}, \quad I_6' = I_1' \frac{r_3}{r_3 + r_4 + r_6},$$

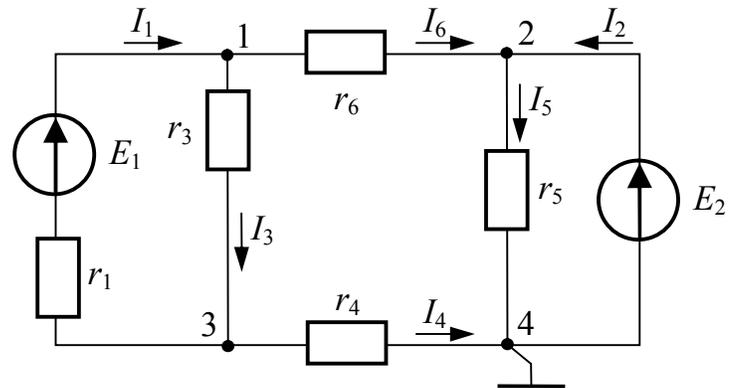


Рис. 2.1. Расчетная схема сложной электрической цепи

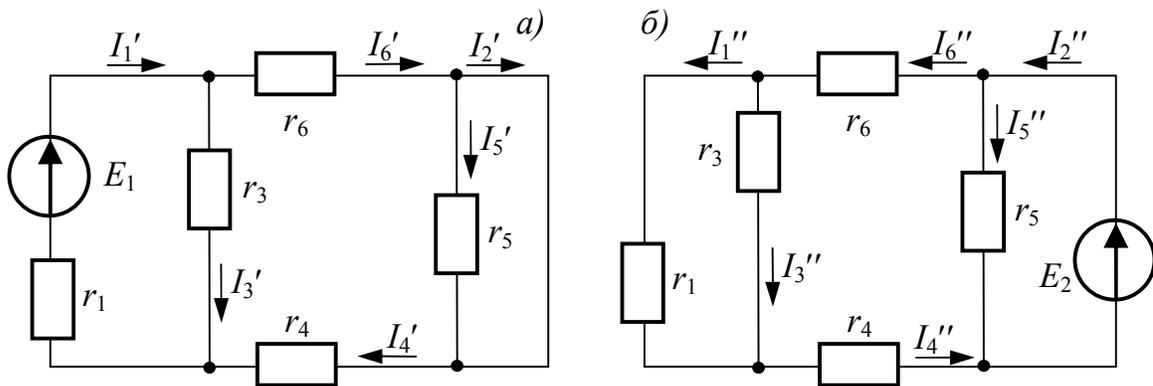


Рис. 2.2. Частичные схемы при расчёте сложной цепи методом наложения

$$I'_4 = I'_2 = I'_6, \quad I'_5 = 0.$$

Затем определяются составляющие токов в ветвях схемы при действии только источника ЭДС  $E_2$  (рис. 2.2б):

$$I''_5 = \frac{E_2}{r_5}, \quad I''_6 = \frac{E_2}{r_6 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3} + r_4}, \quad I''_1 = I''_6 \cdot \frac{r_3}{r_1 + r_3},$$

$$I''_3 = I''_6 \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_3}, \quad I''_4 = I''_6, \quad I''_2 = I''_5 + I''_6.$$

Токи в исходной схеме рис. 2.1 определяются алгебраическим суммированием соответствующих составляющих токов:

$$\begin{aligned} I_1 &= I'_1 - I''_1, & I_2 &= -I'_2 + I''_2, & I_3 &= I'_3 + I''_3, \\ I_4 &= -I'_4 + I''_4, & I_5 &= I'_5 + I''_5, & I_6 &= I'_6 - I''_6. \end{aligned}$$

Метод узловых потенциалов основан на применении первого закона Кирхгофа и закона Ома. При этом потенциал одного из узлов электрической цепи принимается равным нулю (узел заземляется), а для определения потенциалов остальных узлов схемы, независимо от направлений токов, составляется и решается система линейных алгебраических уравнений. Затем по закону Ома рассчитываются токи в ветвях схемы. Проверить правильность расчета токов можно с помощью первого закона Кирхгофа для узлов схемы.

В качестве примера покажем определение токов в ветвях схемы рис. 2.1 методом узловых потенциалов.

Потенциал одного из узлов принимается равным нулю. Пусть  $\varphi_4 = 0$ , тогда  $\varphi_2 = E_2$ .

Для определения неизвестных потенциалов узлов составляется система уравнений:

$$\begin{cases} \varphi_1 \cdot (g_1 + g_3 + g_6) - \varphi_2 \cdot g_6 - \varphi_3 \cdot (g_1 + g_3) = E_1 \cdot g_1, \\ -\varphi_1 \cdot (g_1 + g_3) + \varphi_3 \cdot (g_1 + g_3 + g_4) = -E_1 \cdot g_1, \end{cases}$$

где  $g_1 = \frac{1}{r_1}, \quad g_3 = \frac{1}{r_3}, \quad g_4 = \frac{1}{r_4}, \quad g_6 = \frac{1}{r_6}.$

Токи в ветвях вычисляются по закону Ома:

$$\begin{aligned} I_1 &= (\varphi_3 - \varphi_1 + E_1) \cdot g_1, & I_3 &= (\varphi_1 - \varphi_3) \cdot g_3, & I_4 &= (\varphi_3 - \varphi_4) \cdot g_4, \\ I_5 &= (\varphi_2 - \varphi_4) \cdot g_5, & I_6 &= (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot g_6. \end{aligned}$$

Ток в ветви с источником ЭДС без сопротивления определяется по первому закону Кирхгофа

$$I_2 = I_4 + I_5.$$

Метод эквивалентного генератора. Метод применяется в том случае, когда требуется определить ток в одной ветви схемы, которую называют искомой. Сопротивление  $r$  этой ветви удаляется из схемы, а остальная ее часть

представляется в виде активного двухполюсника, который в свою очередь заменяется эквивалентным генератором с ЭДС  $E$  равной напряжению холостого хода  $U_{xx}$  двухполюсника и внутренним сопротивлением равным входному сопротивлению  $R_{ex}$  соответствующего пассивного двухполюсника (сопротивление относительно разомкнутых зажимов двухполюсника).

Тогда ток в этой ветви определяется по закону Ома

$$I = \frac{U_{xx}}{R_{ex} + r}$$

В рассматриваемом примере (рис. 2.1) с помощью метода эквивалентного генератора определен ток в ветви с сопротивлением  $r_6$ .

Для этого из схемы удаляется сопротивление  $r_6$  и по второму закону Кирхгофа вычисляется напряжение  $U_{xx}$  между разомкнутыми зажимами (рис. 2.3а).

$$U_{xx} = I_{4x}r_4 + I_{3x}r_3 - E_2,$$

где 
$$I_{3x} = \frac{E_1}{r_1 + r_3}, \quad I_{4x} = 0.$$

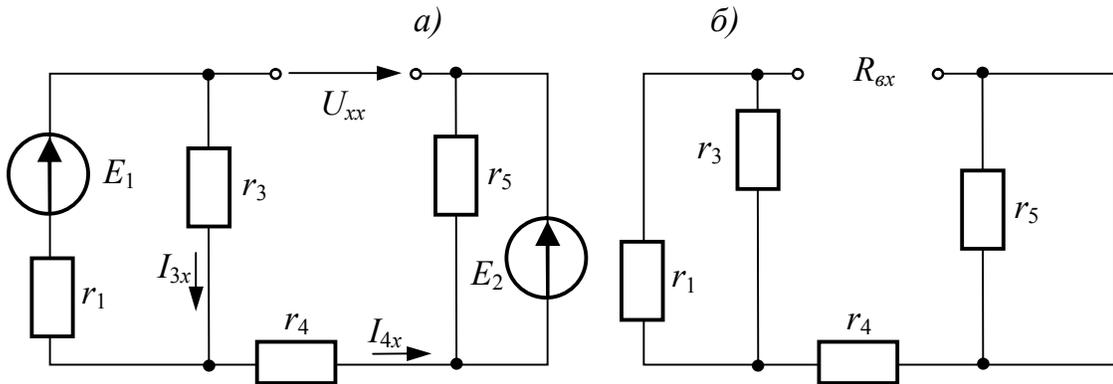


Рис. 2.3. Схемы для определения  $U_{xx}$  и  $R_{ex}$

Далее для определения входного сопротивления пассивного двухполюсника из схемы активного двухполюсника удаляются все источники и заменяются их внутренними сопротивлениями (рис. 2.3б). Тогда

$$R_{ex} = \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3} + r_4 \text{ и искомый ток } I_6 = \frac{U_{xx}}{R_{ex} + r_6}.$$

### Домашняя подготовка к работе

1. В соответствии с номером варианта вычертить схему (рис. 2.4) и принять сопротивления ветвей равными номинальным значениям сопротивлений элементов из табл. 3. (для всех вариантов схем элемент 01 соответствует сопротивлению  $r_1$ , элемент 02 соответствует сопротивлению  $r_2$  и т.д.).

2. Обозначить на схеме и указать положительные направления токов в ветвях и выполнить их расчет методом наложения при  $E_1 = 20 \text{ В}$ ,  $E_2 = 15 \text{ В}$ , результаты расчета занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Результаты расчетов и экспериментов по методу наложения

Исследуемые токи, $mA$							
В схеме включен только источник $E_1$	Расчет						
	Эксперимент						
В схеме включен только источник $E_2$	Расчет						
	Эксперимент						
В схеме включены оба источника	Расчет						
	Эксперимент						

Таблица 2.2. Результаты расчетов и экспериментов по методу узловых потенциалов

Исследуемые величины	Потенциалы узлов, $V$				Токи ветвей, $mA$						
Расчет											
Эксперимент											

3. В схеме рис. 2.4, используя метод эквивалентного генератора, рассчитать ток в ветви с элементом  $r_2$ . Результаты расчета занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Результаты расчетов и экспериментов по методу эквивалентного генератора

Исследуемые величины	$U_{xx}, V$	$I_{K3}, mA$	$R_{ex}, Ом$	$I, mA$
Расчет		---		
Эксперимент				

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 2.4, предусмотрев возможность измерения токов во всех ветвях (в каждой ветви установить переключки). Установить величины ЭДС источников  $E_1 = 20 V$ ,  $E_2 = 15 V$ .

2. Применительно к схеме рис. 2.4 экспериментально проверить выполнение принципа наложения. Сначала произвести измерение составляющих токов в ветвях схемы только при действии источника  $E_1 = 20 V$  (источник  $E_2$  должен быть удален, а вместо него включена переключка), затем выполнить измерение составляющих токов только при действии источника  $E_2$  (источник  $E_1$  должен быть удален, а вместо него включена переключка). Наконец, включив оба источника, измерить полные токи ветвей. Результаты измерений занести в табл. 2.1. Сравнить полученные результаты с результатами расчета и сделать вывод о выполнении принципа наложения.

3. Измерить потенциалы узлов в схеме рис. 2.4. С этой целью зажим «\*» вольтметра соединить с узлом схемы, потенциал которого был принят равным нулю. Подключая второй зажим вольтметра к соответствующим узлам, определить величину и знак потенциалов остальных узлов. Занести в табл. 2.2

результаты измерений потенциалов узлов и результаты измерений токов, которые следует взять из табл. 2.1, когда действуют оба источника). Сделать вывод о совпадении рассчитанных по методу узловых потенциалов величин потенциалов узлов и токов с их экспериментальными значениями.

4. Осуществить экспериментальную проверку метода эквивалентного генератора. Для этого при включенных источниках ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  необходимо разорвать ветвь с элементом  $r_2$ , удалив его из схемы (рис. 2.4) и, подключая к разомкнутым зажимам сначала вольтметр, а затем амперметр, измерить напряжение холостого хода  $U_{xx}$  и ток короткого замыкания  $I_{кз}$ , соответственно. По данным измерений косвенно определить входное сопротивление пассивного двухполюсника, а затем ток в искомой ветви, используя, соответственно, выражения

$$R_{вх} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}, \quad I_2 = \frac{U_{xx}}{R_{вх} + r_2}.$$

Результаты экспериментальных исследований внести в табл. 2.3. Сравнить расчетные и экспериментальные значения величин.

5. Для контура цепи, включающего оба источника, построить потенциальную диаграмму, используя экспериментальные значения токов в ветвях. Привести результаты расчетов потенциалов всех точек контура.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте принцип наложения.
2. В чем сущность метода эквивалентного генератора?
3. Привести порядок расчета электрической цепи с помощью метода узловых потенциалов.
4. Какие существуют способы экспериментального определения входного сопротивления относительно любой пары зажимов сложной электрической цепи?
5. В исследуемой схеме рис. 2.4 записать формулу расчета входного сопротивления  $R_{вх}$  относительно ветви с источником ЭДС  $E_1$ .
6. Указать порядок построения потенциальной диаграммы для контура электрической цепи.

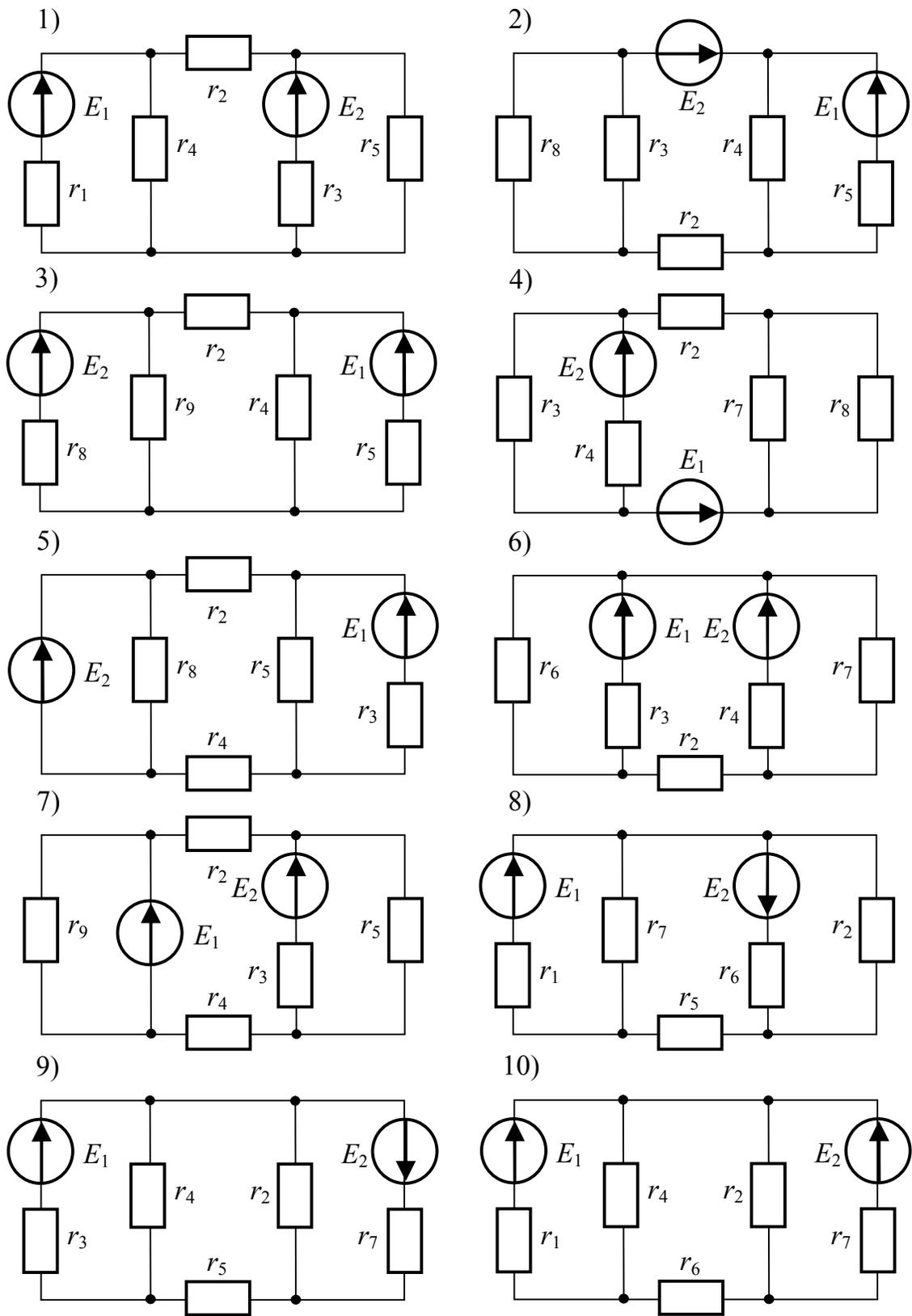


Рис. 2.4. Варианты схем для исследований

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

**Исследование цепей синусоидального тока при последовательном соединении элементов и параллельном соединении ветвей**

**Цель работы:** экспериментальная проверка основных расчётных соотношений, используемых в теории электрических цепей синусоидального тока при последовательном соединении элементов и параллельном соединении ветвей.

## Пояснения к работе

Электрическая цепь синусоидального тока может содержать резистивные, индуктивные и ёмкостные элементы.

В резистивном элементе происходит необратимое преобразование электрической энергии в тепловую, поэтому он называется активным. Мгновенные значения тока и напряжения связаны законом Ома:  $u = i \cdot r$  и совпадают по фазе:  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$  (рис. 3.1,а),

где  $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ ,  $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \cdot r \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ .

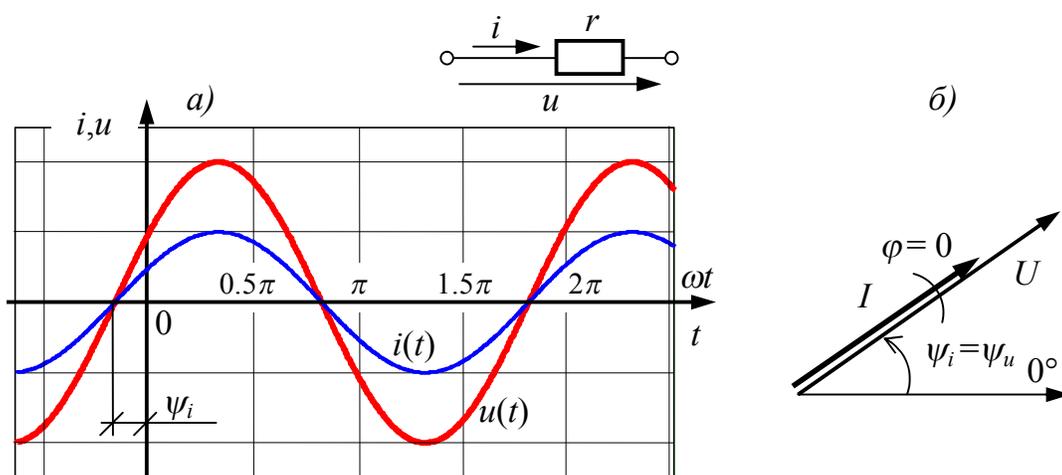


Рис. 3.1. Временная и векторная диаграммы тока и напряжения на активном элементе

Последнее означает, что векторы напряжения и тока совпадают по направлению на векторной диаграмме (рис. 3.1,б), а закон Ома справедлив также для амплитудных и действующих значений тока и напряжения:

$$U_m = I_m \cdot r, \quad U = I \cdot r.$$

В индуктивном элементе электрическая энергия источника преобразовывается в энергию магнитного поля катушки. Связь между мгновенными значениями тока и напряжения определяется законом электромагнитной индукции:  $u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ ,

где  $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ ,  $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \cdot x_L \cdot \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ)$ ,  
 $x_L = \omega L = 2\pi fL$  – индуктивное сопротивление элемента.

Напряжение на индуктивном элементе опережает ток по фазе на  $90^\circ$ :  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 90^\circ$  (рис. 3.2,а). Последнее означает, что вектор напряжения опережает вектор тока на  $90^\circ$  (рис. 3.2,б).

Амплитудные и действующие значения тока и напряжения на индуктивности связаны законом Ома:

$$U_m = I_m \cdot x_L, \quad U = I \cdot x_L.$$

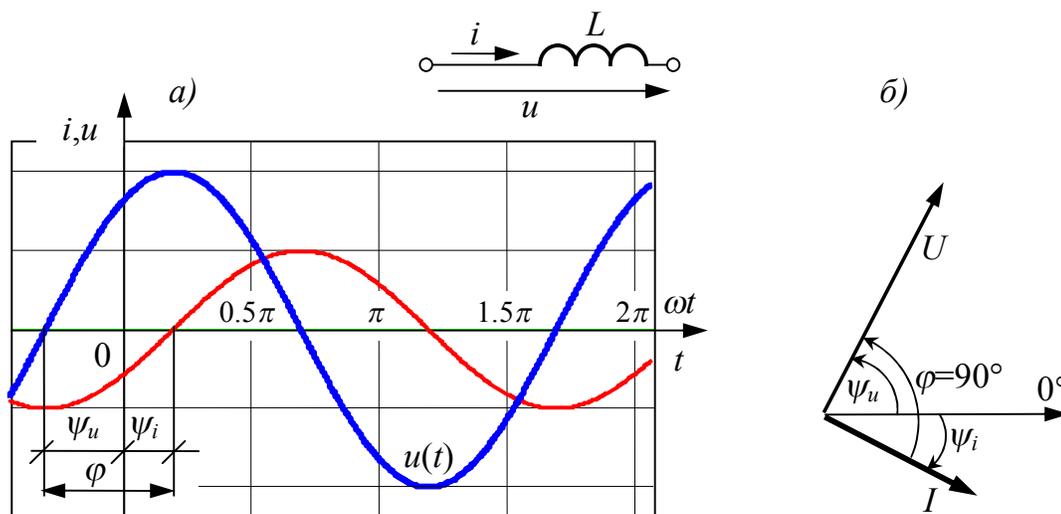


Рис. 3.2. Временная и векторная диаграммы тока и напряжения на индуктивном элементе

В ёмкостном элементе происходит преобразование электрической энергии источника в энергию электрического поля конденсатора. Связь между мгновенными значениями тока и напряжения определяется выражением

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt},$$

где  $i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$ ,  $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \cdot x_C \cdot \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ)$ ,

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \text{ – ёмкостное сопротивление элемента.}$$

Напряжение на ёмкостном элементе отстает от тока по фазе на  $90^\circ$ :  $\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ$  (рис. 3.3,а). Последнее означает, что вектор напряжения отстает от вектора тока на  $90^\circ$  (рис. 3.3,б).

Амплитудные и действующие значения тока и напряжения на ёмкости связаны законом Ома:  $U_m = I_m \cdot x_C, \quad U = I \cdot x_C.$

Индуктивное  $x_L$  и ёмкостное  $x_C$  сопротивления называются реактивными сопротивлениями.

При последовательном соединении активного  $r$ , индуктивного  $x_L$  и ёмкостного  $x_C$  сопротивлений (рис. 3.4,а) мгновенное значение напряжения источника согласно второму закону Кирхгофа определяется алгебраической суммой мгновенных значений напряжений на отдельных элементах

$$u = u_r + u_L + u_C,$$

а действующее значение напряжения источника – векторной суммой действующих значений напряжений на отдельных элементах (рис. 3.4,б) и может быть рассчитано по формуле:

$$U = \sqrt{U_r^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(I \cdot r)^2 + (I \cdot x_L - I \cdot x_C)^2} = I \cdot Z,$$

где  $Z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$  – полное сопротивление цепи при последовательном соединении элементов  $r, L, C$ .

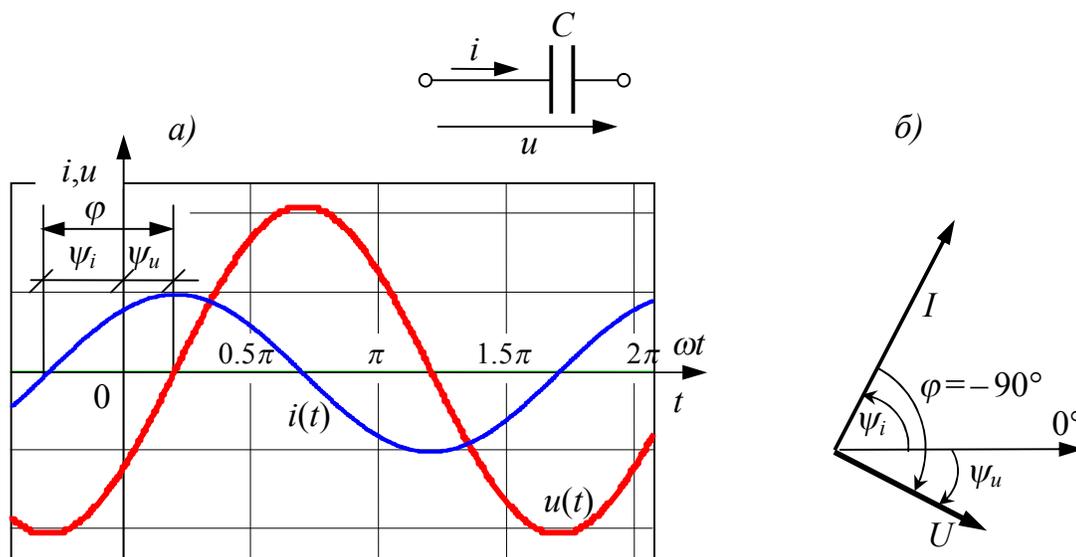


Рис. 3.3. Временная и векторная диаграммы тока и напряжения на ёмкостном элементе

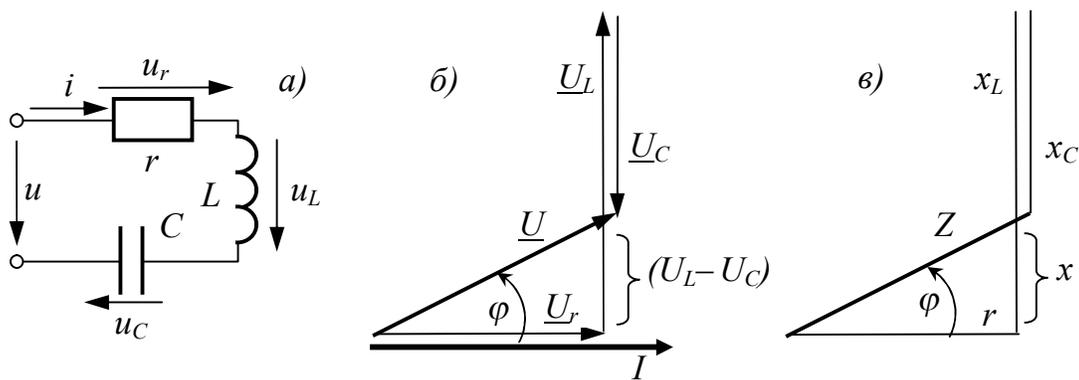


Рис. 3.4. Схема (а), векторная диаграмма (б) и треугольник сопротивлений (в) для последовательного соединения элементов  $r, L, C$

Полное сопротивление цепи  $Z$ , активное  $r$  и реактивное  $x = x_L - x_C$  образуют треугольник сопротивлений (рис. 3.4,в), для которого справедливы следующие соотношения:

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2}, \quad r = Z \cdot \cos \varphi, \quad x = Z \cdot \sin \varphi, \quad \varphi = \arctg \frac{x}{r}.$$

В общем случае при наличии в ветви нескольких  $r$ , нескольких  $L$  и нескольких  $C$  справедливы такие соотношения:

$$Z = \sqrt{(\sum r)^2 + (\sum x_L - \sum x_C)^2},$$

$$I = \frac{U}{Z}, \quad \varphi = \arctg \frac{\sum x_L - \sum x_C}{\sum r},$$

а мгновенное значение тока имеет вид:  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_u - \varphi)$ .

При параллельном соединении ветвей, содержащих активные  $r$ , индуктивные  $x_L$  и ёмкостные  $x_C$  сопротивления (рис. 3.5,а) мгновенное значение тока источника согласно первому закону Кирхгофа равно алгебраической сумме мгновенных значений токов, протекающих через отдельные ветви,

$$i = i_1 + i_2,$$

а действующее значение тока источника – векторной суммой действующих значений токов в отдельных ветвях (рис. 3.5,б) и определяется формулой:

$$I = \sqrt{(I_{a_1} + I_{a_2})^2 + (I_{L_1} - I_{C_2})^2} = \sqrt{(U \cdot (g_1 + g_2))^2 + (U \cdot (b_1 + b_2))^2} =$$

$$= U \cdot \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2} = U \cdot \sqrt{g_3^2 + b_3^2} = U \cdot Y,$$

где  $g_k = \frac{r_k}{Z_k^2}$  – активная проводимость  $k$ -й ветви;

$g_3 = g_1 + g_2$  – эквивалентная активная проводимость;

$b_k = \frac{x_{L_k} - x_{C_k}}{Z_k^2}$  – реактивная проводимость  $k$ -й ветви;

$b_3 = b_1 + b_2$  – эквивалентная реактивная проводимость;

$Y$  – полная проводимость цепи.

Полная проводимость цепи  $Y$ , активная  $g$  и реактивная  $b$  проводимости составляют прямоугольный треугольник (треугольник проводимостей рис. 3.5,в), для которого справедливы следующие соотношения:

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad g = Y \cdot \cos \varphi, \quad b = Y \cdot \sin \varphi, \quad \varphi = \arctg \frac{b}{g}.$$

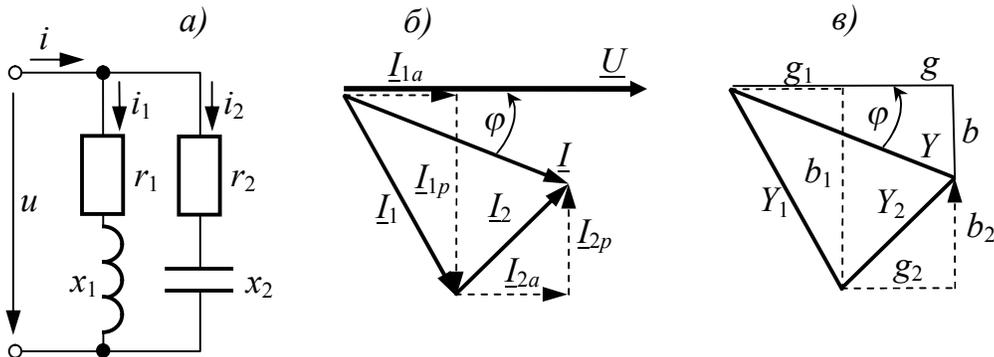


Рис. 3.5. Схема (а), векторная диаграмма (б) и треугольник проводимостей (в) для параллельного соединения элементов  $r$ ,  $L$ ,  $C$

В общем случае при параллельном соединении ветвей, содержащих активные  $r$ , индуктивные  $x_L$  и ёмкостные  $x_C$  сопротивления, справедливы следующие соотношения:

$$Y = \sqrt{(\sum g_k)^2 + (\sum b_k)^2}, \quad I = U \cdot Y, \quad \varphi = \text{actg} \frac{\sum b_k}{\sum g_k}.$$

### Домашняя подготовка к работе

1. В соответствии с номером – варианта начертить рабочую схему с последовательным соединением элементов (рис. 3.6), а из табл. 3.1 выбрать элементы рабочей схемы.

Во всех схемах катушки индуктивности (блок стационарных элементов) обозначены так:  $r_1, L_1$  – параметры первой катушки,  $r_2, L_2$  – параметры второй катушки,  $r_3, L_3$  – параметры третьей катушки,

где  $r_1 = 11 \text{ Ом}, L_1 = 0.18 \text{ Гн}; \quad r_2 = 51 \text{ Ом}, L_2 = 0.69 \text{ Гн};$

$r_3 = 9.5 \text{ Ом}, L_3 = 0.12 \text{ Гн}.$

Параметры емкостных элементов (блок стационарных элементов), обозначенных  $C_1, C_2, C_3$ :  $C_1 = 5 \text{ мкФ}, C_2 = 10 \text{ мкФ}, C_3 = 20 \text{ мкФ}.$

Параметры емкостных элементов, обозначенных  $C_{12}, C_{23}, C_{13}$ , определяются по формулам:

$$C_{12} = C_1 + C_2, \quad C_{23} = C_2 + C_3, \quad C_{13} = C_1 + C_3.$$

Таблица 3.1. Номера элементов схемы и напряжение источника

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Номер элемента									
$r_4$	03	04	05	01	01	05	07	01	02	06
$r_5$	05	-	-	05	03	-	-	03	01	-
$U, B (f = 50 \text{ Гц})$	30	22	26	36	32	20	24	38	34	28

\*При отсутствии в схеме элемента в таблице стоит прочерк.

2. Рассчитать сопротивления выбранных элементов при частоте  $50 \text{ Гц}$ , результаты расчета занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Расчетные сопротивления элементов

Обозначение элемента в схеме*	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Сопротивление элемента, Ом								

\* При отсутствии в схеме элемента в таблице поставить прочерк.

3. Для рабочей схемы с последовательным соединением элементов (рис. 3.6) при заданном напряжении источника рассчитать полное сопротивление цепи, ток и напряжения на её участках. Выполнить построение векторной диаграммы напряжений. Результаты расчёта занести в табл. 3.3.

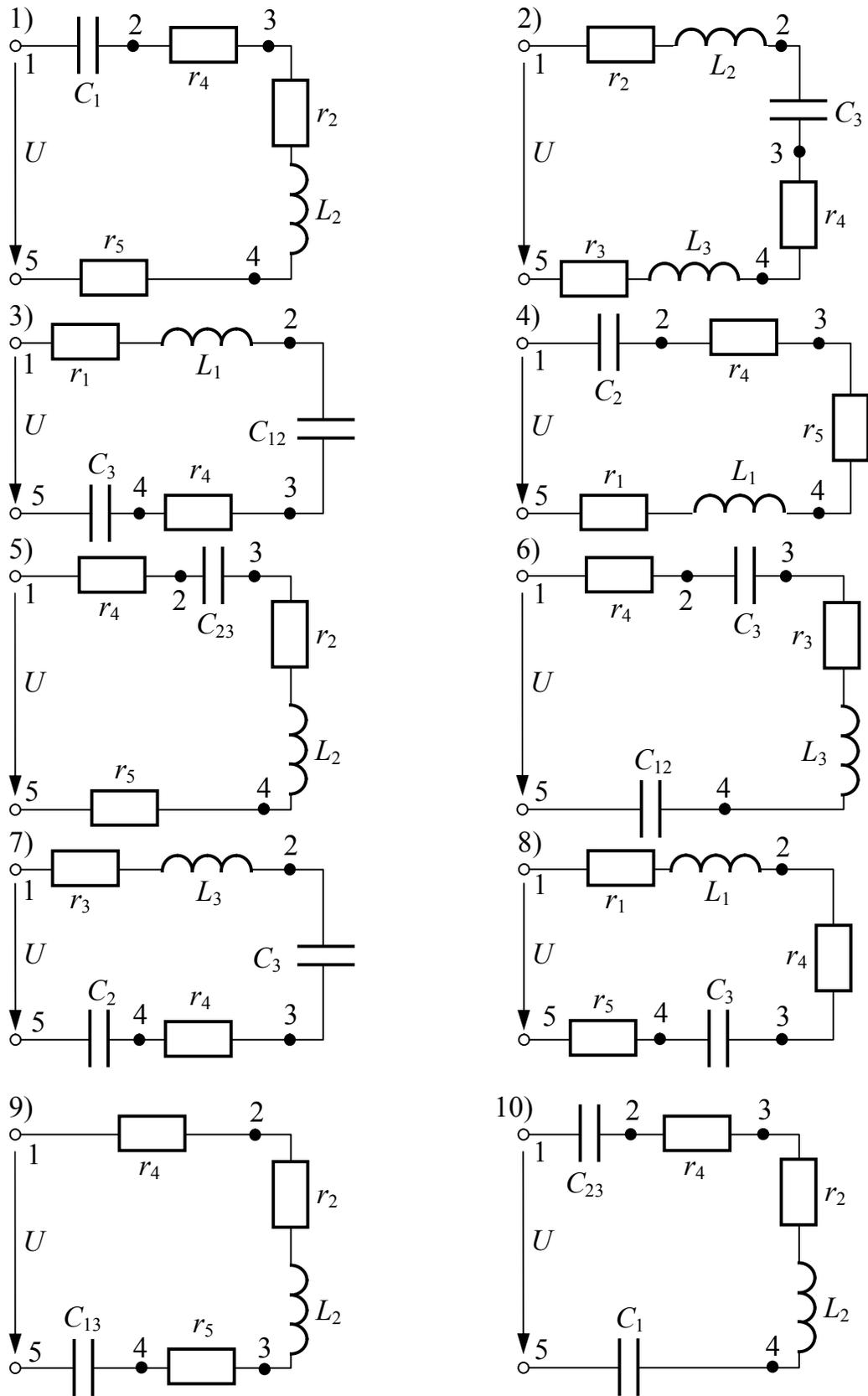


Рис. 3.6. Варианты схем для исследования последовательного соединения

Таблица 3.3. Результаты расчетов и экспериментов для схемы с последовательным соединением

$U = B /$ параметр	$I, mA$	$U_{12}, B$	$U_{23}, B$	$U_{34}, B$	$U_{45}, B$
Вычислено					
Измерено					

4. В соответствии с номером варианта нарисовать рабочую схему с параллельным соединением элементов (рис. 3.7), а из табл. 3.4 выбрать элементы рабочей схемы.

5. Рассчитать проводимости выбранных элементов при частоте  $50 Гц$ , результаты расчета занести в табл. 3.5.

Таблица 3.4. Номера элементов схемы и напряжение источника

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Номер элемента									
$r_4$	03	01	01	03	03	03	07	03	07	06
$r_5$	05	01	06	04	05	01	06	05	06	05
$r_6^*$	-	05	-	06	-	03	-	03	-	06
$U, B \quad f = 50 Гц$	22	24	26	22	30	20	28	36	34	32

\* При отсутствии в схеме элемента в таблице стоит прочерк.

Таблица 3.5. Расчетные сопротивления и проводимости ветвей

Полное сопротивление ветви, $Om$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
Активная проводимость ветви, $См$	$g_1$	$g_2$	$g_3$
Реактивная проводимость ветви, $См$	$b_1$	$b_2$	$b_3$

\* При отсутствии в схеме элемента в таблице поставить прочерк.

6. Для рабочей схемы с параллельным соединением ветвей (рис. 3.7) рассчитать полную проводимость цепи  $Y$  и токи на её участках. Выполнить построение векторной диаграммы токов. Результаты расчёта занести в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Результаты расчетов и экспериментов для схемы с параллельным соединением ветвей

$U = B /$ параметр	$Y, См$	$I, mA$	$I_1, mA$	$I_2, mA$	$I_3, mA$
Вычислено					
Измерено	----				

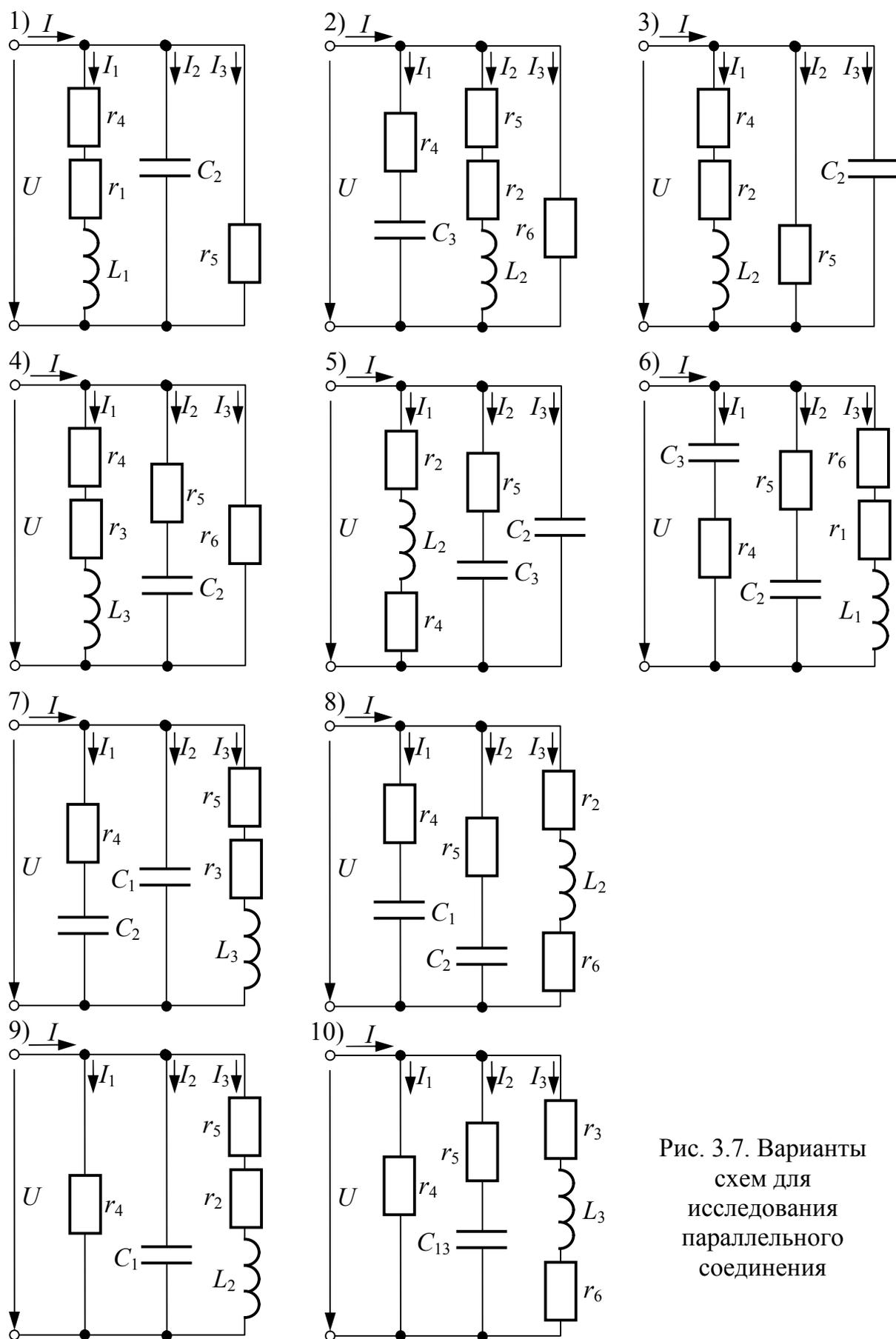


Рис. 3.7. Варианты  
схем для  
исследования  
параллельного  
соединения

## Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему с последовательным соединением элементов (рис.3.6) (питание от блока источников трехфазного переменного напряжения).
2. Установить требуемое напряжение  $U$  и провести измерения тока и напряжений на участках цепи. Результаты измерений занести в табл.3.3. Сопоставить расчётные и экспериментальные значения величин и сделать выводы.
3. Собрать рабочую схему с параллельным соединением ветвей (рис.3.7) (питание от блока источников трехфазного переменного напряжения).
4. Выполнить измерения токов участков цепи. Результаты измерений занести в табл.3.6. Сопоставить расчётные и экспериментальные значения величин и сделать выводы.

## Вопросы для самоконтроля

1. Каков физический смысл активного, индуктивного и ёмкостного сопротивлений?
2. Как зависят активное, индуктивное и ёмкостное сопротивления от частоты?
3. Чему равны углы сдвига фаз между напряжением и током в активном сопротивлении, индуктивном и ёмкостном?
4. Как рассчитать полные сопротивления последовательного соединения  $r$  и  $L$ ;  $r$  и  $C$ ;  $r, L, C$ ?
5. Каков порядок построения векторной диаграммы цепи при последовательном соединении элементов?
6. Каков порядок построения векторной диаграммы цепи при параллельном соединении элементов?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### *Исследование разветвленных цепей синусоидального тока*

Цель работы: исследование разветвленных цепей синусоидального тока и экспериментальная проверка методов их расчёта.

### Пояснения к работе

Для расчёта разветвлённых цепей синусоидального тока с одним источником питания применяют метод проводимостей, основанный на использовании векторных диаграмм (расчёт по активным и реактивным составляющим величин) и преобразований электрических цепей, а также универсальный комплексный метод, который иначе называется символическим.

При расчёте используют соотношения, вытекающие из векторных диаграмм, треугольников сопротивлений и проводимостей.

Символический метод применяют при расчёте электрических цепей синусоидального тока произвольной сложности (несколько источников питания, соединение элементов треугольником или звездой и др.). Сущность метода заключается в том, что в цепях синусоидального тока законы Кирхгофа для действующих и амплитудных значений справедливы в векторной форме. Для операций с векторными величинами используются комплексные числа, изображающие комплексы ЭДС, напряжений, токов, сопротивлений и т.д.

Подобно цепям постоянного тока, многообразие расчётных методов которых базировалось на использовании законов Ома и Кирхгофа, для цепей синусоидального тока эти методы также справедливы для величин в комплексной форме. Поэтому для расчёта цепей синусоидального тока можно использовать весь расчётный аппарат цепей постоянного тока: методы контурных токов, наложения, эквивалентного генератора, преобразования цепей и т.д., но в этих уравнениях токи, напряжения, ЭДС и сопротивления должны быть представлены в комплексной форме. Например, закон Ома и законы Кирхгофа:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}, \quad \sum \underline{I} = 0, \quad \sum \underline{I} \cdot \underline{Z} = \sum \underline{E}.$$

В качестве примера рассмотрим расчёт токов в схеме рис. 4.1а.

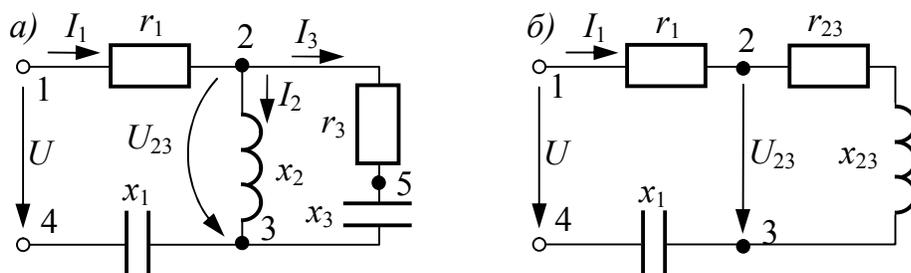


Рис. 4.1. Схема цепи со смешанным соединением сопротивлений

Расчёт выполняем в следующем порядке.

1. Определяем сопротивления реактивных элементов схемы:

$$x_1 = \frac{1}{\omega C}, \quad x_2 = \omega L, \quad x_3 = \frac{1}{\omega C}.$$

2. Используя метод проводимостей, заменяем параллельно включенные ветви одной эквивалентной ветвью (рис. 4.1б), для чего определяем активные и реактивные проводимости каждой из параллельно включенных ветвей:

$$g_2 = 0, \quad g_3 = \frac{r_3}{r_3^2 + (-x_3)^2},$$

$$b_2 = \frac{1}{x_2}, \quad b_3 = \frac{-x_3}{r_3^2 + (-x_3)^2}.$$

Эквивалентная ветвь должна обладать такими же  $g_3, b_3, Y_3$  т.е.

$$g_3 = g_2 + g_3, \quad b_3 = b_2 + b_3, \quad Y_3 = \sqrt{g_3^2 + b_3^2}.$$

3. Определим полное, активное и реактивное сопротивления эквивалентной ветви:

$$Z_3 = \frac{1}{Y_3}, \quad r_3 = g_3 \cdot Z_3^2, \quad x_3 = b_3 \cdot Z_3^2,$$

(положительный знак  $x_3$  указывает на индуктивный характер, а отрицательный – на емкостный).

4. Определяем полное сопротивление цепи (рис. 4.1б):

$$Z = \sqrt{(r_1 + r_3)^2 + (-x_1 + x_3)^2}.$$

5. Вычисляем ток в неразветвлённой части цепи:

$$I_1 = \frac{U}{Z}.$$

6. Находим напряжение на параллельно включенных ветвях электрической цепи и их токи:

$$U_{23} = I_1 \cdot Z_3, \quad I_2 = \frac{U_{23}}{x_2}, \quad I_3 = \frac{U_{23}}{Z_3}.$$

7. Строим векторную диаграмму (рис. 4.2). Для ее построения рекомендуется определить напряжения на всех элементах цепи, а также активные и реактивные составляющие токов параллельных ветвей:

$$U_{12} = I_1 \cdot r_1, \quad U_{34} = I_1 \cdot x_1, \quad U_{25} = I_3 \cdot r_3, \quad U_{53} = I_3 \cdot x_3.$$

$$I_{2p} = I_2, \quad I_{3a} = g_3 \cdot U_{23}, \quad I_{3p} = b_3 \cdot U_{23}.$$

На рис. 4.2 представлена качественно построенная векторная диаграмма электрической цепи рис. 4.1а.

Построение векторной диаграммы начинаем с вектора напряжения  $U_{23}$ , положение которого может быть произвольным. Остальные векторы напряжений и токов имеют строго определённые положения относительно выбранного вектора  $U_{23}$ . Далее выполняется построение диаграммы токов. Вектор тока  $I_2$  отстаёт по фазе на  $90^\circ$  от вектора напряжения  $U_{23}$  вследствие индуктивного характера сопротивления второй ветви. Ток  $I_3$  имеет активно-емкостный характер, поэтому его вектор опережает вектор напряжения  $U_{23}$  на

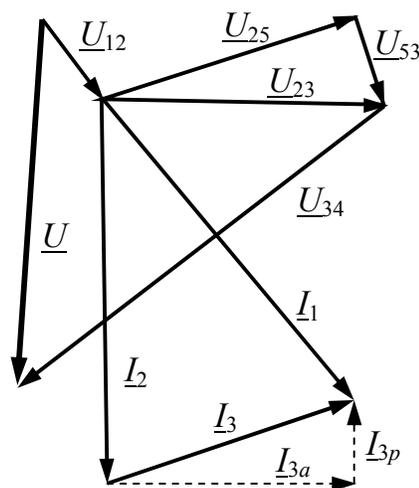


Рис. 4.2. Векторная диаграмма

углом  $\varphi_3 = \arctg \frac{x_3}{r_3}$ . Построение вектора тока  $I_3$  рекомендуется выполнить по составляющим: активная составляющая  $I_{3a}$  совпадает с напряжением  $U_{23}$ , реактивная (емкостная) составляющая  $I_{3p}$  опережает  $U_{23}$  на  $90^\circ$ .

Ток в неразветвлённой части цепи согласно первому закону Кирхгофа равен векторной сумме токов в параллельно включённых ветвях:  $I_1 = I_2 + I_3$ .

Построение векторов напряжений  $\vec{U}_{12}$ ,  $\vec{U}_{34}$  осуществляем относительно вектора тока  $\vec{I}_1$ . По отношению к току  $\vec{I}_1$  вектор  $\vec{U}_{34}$  (напряжение на емкости) отстаёт на  $90^\circ$ , а  $\vec{U}_{12}$  (напряжение на активном сопротивлении) совпадает с током  $\vec{I}_1$ .

Согласно второму закону Кирхгофа в комплексной форме:  $\underline{U} = \underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{34}$ , а  $\underline{U}_{23} = \underline{U}_{25} + \underline{U}_{53}$ , причем  $\underline{U}_{25}$  совпадает по направлению с током  $\underline{I}_2$ , а  $\underline{U}_{53}$  отстаёт от этого тока на  $90^\circ$ .

При построении векторных диаграмм сложение векторов токов или напряжений согласно законам Кирхгофа производится в любой последовательности, однако, если требуется построить топографическую диаграмму, то сложение векторов напряжений производится строго в той же последовательности, в которой находятся элементы на схеме.

Расчёт схемы рис. 4.1а символическим методом выполним в следующем порядке.

1. Подготовим схему для решения символическим методом, для чего представим напряжение источника и сопротивления ветвей схемы в комплексном виде:

$\underline{U} = Ue^{j0}$ , В (напряжение источника направляем по вещественной оси),

$\underline{Z}_1 = r_1 - jx_1$ ,  $\underline{Z}_2 = jx_2$ ,  $\underline{Z}_3 = r_3 - jx_3$ .

В результате схема имеет вид, представленный на рис. 4.3.

2. Определяем комплекс входного сопротивления:

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}, \quad \underline{Z}_{ex} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23}.$$

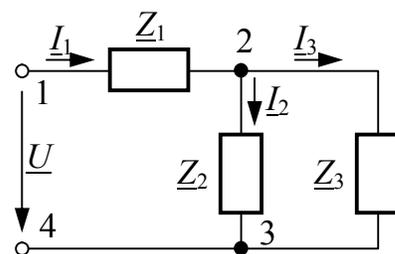


Рис. 4.3. Расчётная схема

Согласно закону Ома в комплексной форме определяем ток в неразветвленной части цепи:  $\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{ex}}$ .

3. Определяем комплекс напряжения  $\underline{U}_{23}$  и токи в параллельных ветвях:

$$\underline{U}_{23} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{23}, \quad \underline{I}_2 = \underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}, \quad \underline{I}_3 = \underline{I}_1 \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

4. Напряжения на различных участках цепи:

$$\underline{U}_{12} = \underline{I}_1 \cdot r_1, \quad \underline{U}_{34} = \underline{I}_1 \cdot (-jx_1), \quad \underline{U}_{25} = \underline{I}_3 \cdot r_3, \quad \underline{U}_{53} = \underline{I}_3 \cdot (-jx_3).$$

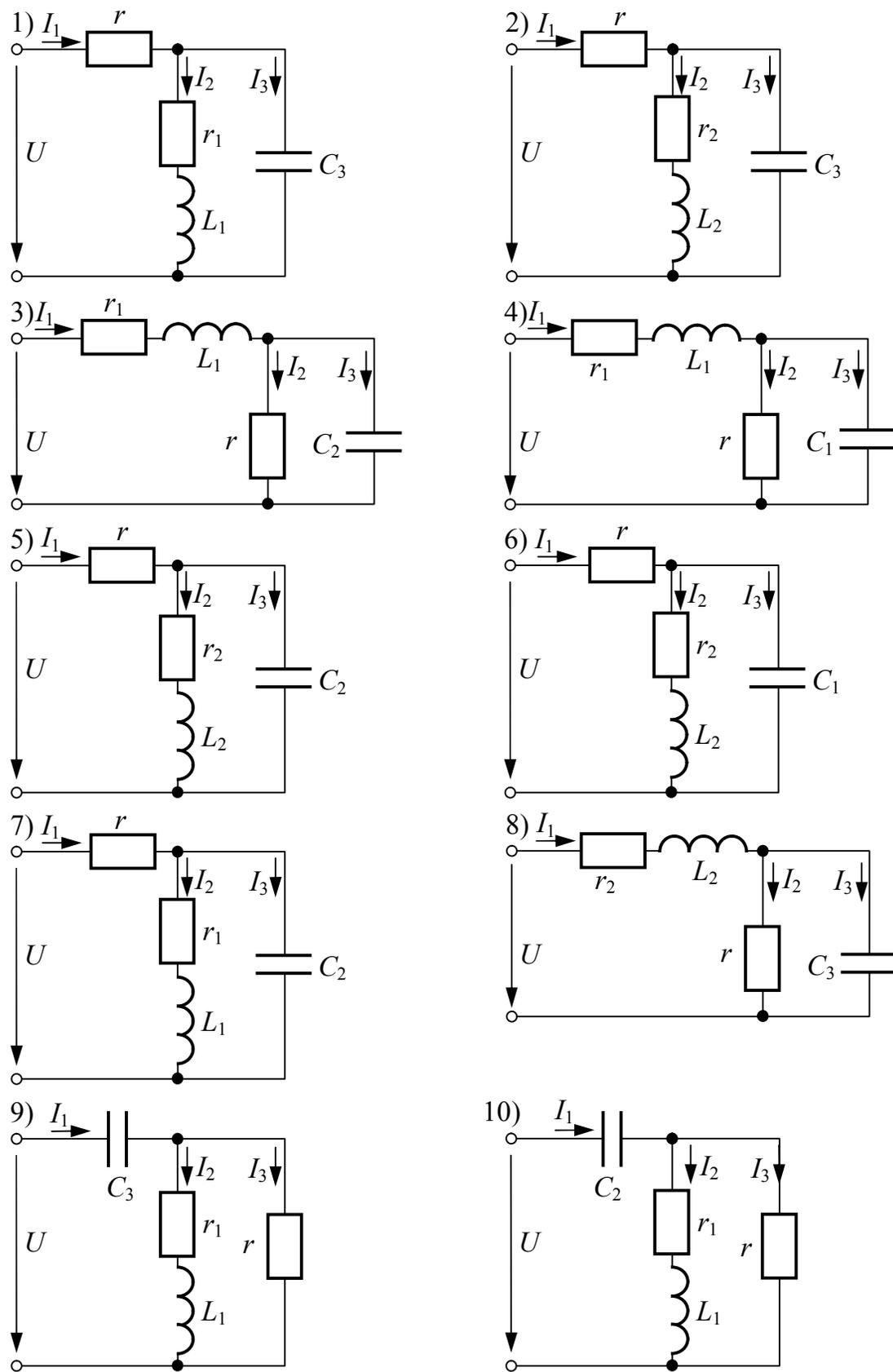


Рис. 4.4. Варианты схем для исследований

## Домашняя подготовка к работе

1. Ознакомиться с методами расчёта цепей синусоидального тока и освоить методику построения векторных диаграмм электрических цепей.

2. Согласно номеру варианта по рис. 4.4 выбрать и вычертить рабочую схему (номер варианта соответствует номеру схемы). По табл. 4.2 выбрать номера элементов, используемых в схеме. Рассчитать сопротивления реактивных элементов при частоте  $f = 50 \text{ Гц}$ . Данные занести в табл. 4.3.

Во всех схемах катушки индуктивности обозначены так:  $r_1, L_1$  – параметры первой катушки,  $r_2, L_2$  – параметры второй катушки,

где  $r_1 = 11 \text{ Ом}$ ,  $L_1 = 0.18 \text{ Гн}$ ;  $r_2 = 51 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 0.69 \text{ Гн}$ .

Параметры емкостных элементов, обозначенных  $C_1, C_2, C_3$ :

$$C_1 = 5 \text{ мкФ}, C_2 = 10 \text{ мкФ}, C_3 = 20 \text{ мкФ}.$$

3. Используя метод проводимостей, рассчитать напряжения и токи в рабочей схеме. Результаты расчёта занести в табл. 4.4.

Таблица 4.2. Номера элементов рабочей схемы и напряжение источника

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Номер элемента									
$r$	02	07	05	03	06	04	01	03	05	07
$U, B (f = 50 \text{ Гц})$	22	38	26	24	36	34	20	28	30	32

Таблица 4.3. Характеристика элементов рабочей схемы

Обозначения в схеме*	$L_1, \text{ Гн}$	$L_2, \text{ Гн}$	$C_1, \text{ мкФ}$	$C_2, \text{ мкФ}$	$C_3, \text{ мкФ}$
Номинальная величина					
Сопротивление ( $f = 50 \text{ Гц}$ ), $\text{ Ом}$					

\* При отсутствии в схеме элемента в таблице поставить прочерк.

5. По данным расчёта построить в масштабе векторную диаграмму цепи.

6. Используя символический метод, рассчитать токи и напряжения в рабочей схеме. Результаты расчёта занести в табл. 4.4 и табл. 4.5.

Таблица 4.4. Результаты расчёта токов и эксперимента

Исследуемые величины	$I_1, \text{ mA}$	$I_2, \text{ mA}$	$I_3, \text{ mA}$
Расчет по методу проводимостей			
Символический метод расчета			
Эксперимент			

Таблица 4.5. Результаты расчёта напряжений и эксперимента

Исследуемые величины	$U_{23},$ $B$	$U_r,$ $B$	$U_{r1},$ $B$	$U_{r2},$ $B$	$U_{L1},$ $B$	$U_{L2},$ $B$	$U_{C1},$ $B$	$U_{C2},$ $B$	$U_{C3},$ $B$
Расчет по методу проводимостей									
Символический метод расчета									
Эксперимент			-	-	-	-			

\* При отсутствии в схеме элемента в таблице поставить прочерк.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему рис. 4.4 и установить заданное напряжение источника (использовать блок источников трехфазного переменного напряжения).

2. Измерить напряжения и токи в рабочей схеме, результаты измерений занести в табл.4.4. Сравнить экспериментальные величины с расчётными, полученными согласно методу проводимостей и символическому методу, и сделать выводы.

3. По результатам эксперимента вычислить и сравнить с расчетным значением эквивалентное полное сопротивление параллельного участка.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какова последовательность расчёта смешанного соединения цепи синусоидального тока методом проводимостей?

2. В чём сущность символического метода расчёта цепей синусоидального тока?

3. Какова последовательность построения векторных диаграмм электрических цепей синусоидального тока при смешанном соединении?

4. Как записываются законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме?

5. Как в электрической цепи синусоидального тока параллельно включённые ветви заменить одной эквивалентной ветвью, используя метод проводимостей?

6. Параллельно включены  $Z_1 = 10 + j10 \text{ Ом}$  и  $Z_2 = 10 - j10 \text{ Ом}$ . Рассчитайте их эквивалентное сопротивление.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### *Исследование резонансных явлений*

Цель работы: исследование и проверка основных соотношений и частотных характеристик при резонансе в последовательном и параллельном контурах.

## Пояснения к работе

Резонансом называется такой режим работы пассивной цепи, содержащей индуктивности и емкости, при котором напряжение и ток на входе цепи совпадают по фазе. При резонансе входное реактивное сопротивление (или входная реактивная проводимость) цепи равно нулю.

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad \psi_u = \psi_i, \quad \varphi = \psi_u - \psi_i = 0.$$

В цепи с последовательным соединением  $r$ ,  $L$ ,  $C$  (рис. 5.1,а) возникает резонанс напряжений. Этот режим цепи имеет место при условии:

$$x = x_L - x_C = 0, \quad x_L = x_C \quad \text{или} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (5.1)$$

Напряжения на индуктивности и ёмкости при резонансе равны по величине и противоположны по фазе, а напряжение на резистивном элементе равно напряжению источника (рис. 5.1,б).

Из условия (5.1) следует, что резонанс достигается изменением параметров цепи: индуктивности или емкости, либо частоты напряжения источника питания.

Угловая частота, на которой наступает резонанс, называется резонансной угловой частотой:

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

Индуктивное и емкостное сопротивления при резонансе называются характеристическим сопротивлением:

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Напряжения на индуктивности и емкости при резонансе могут значительно превышать напряжение источника, которое равно напряжению на активном сопротивлении:

$$U = I \cdot z = I \cdot r.$$

Отношение напряжения на индуктивности или ёмкости к напряжению источника при резонансе называют добротностью контура,

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho I}{r I} = \frac{\rho}{r}.$$

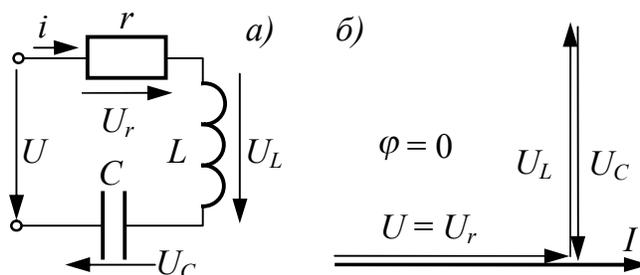


Рис. 5.1. Схема (а) и векторная диаграмма (б) цепи при резонансе напряжений

Зависимость параметров цепи  $x_L, x_C, x, z$  от частоты называют частотными характеристиками, а зависимости действующих (амплитудных) значений тока и напряжений от частоты – резонансными кривыми.

На рис. 5.2 приведены частотные характеристики и резонансные кривые последовательного контура  $r, L, C$ . При их построения использованы формулы:

$$x_L = \omega L, \quad x_C = \frac{1}{\omega C}, \quad x = \omega L - \frac{1}{\omega C},$$

$$z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (6.6)$$

$$U_L = I x_L = \frac{U \cdot \omega L}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad U_C = I x_C = \frac{U \cdot \frac{1}{\omega C}}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

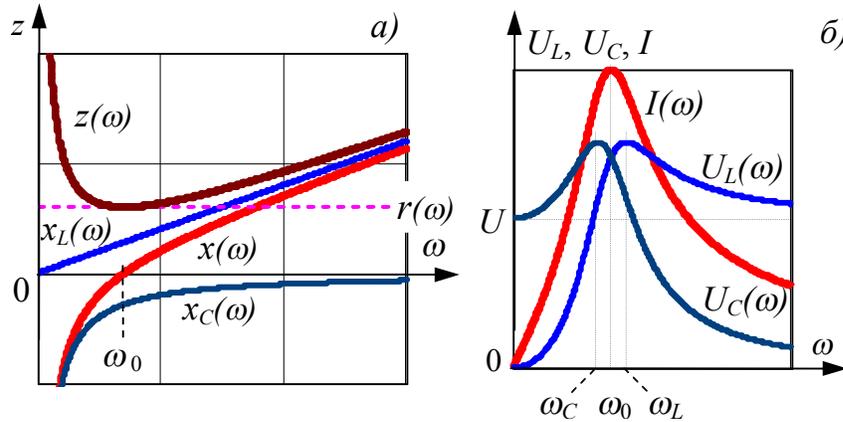


Рис. 5.2. Частотные характеристики и резонансные кривые цепи  $r, L, C$ .

Как следует из графиков (рис. 5.2,б), максимум тока наблюдается при резонансной частоте  $\omega_0$ , а максимумы напряжений  $U_L$  и  $U_C$  соответственно при частотах  $\omega_L$  и  $\omega_C$ :

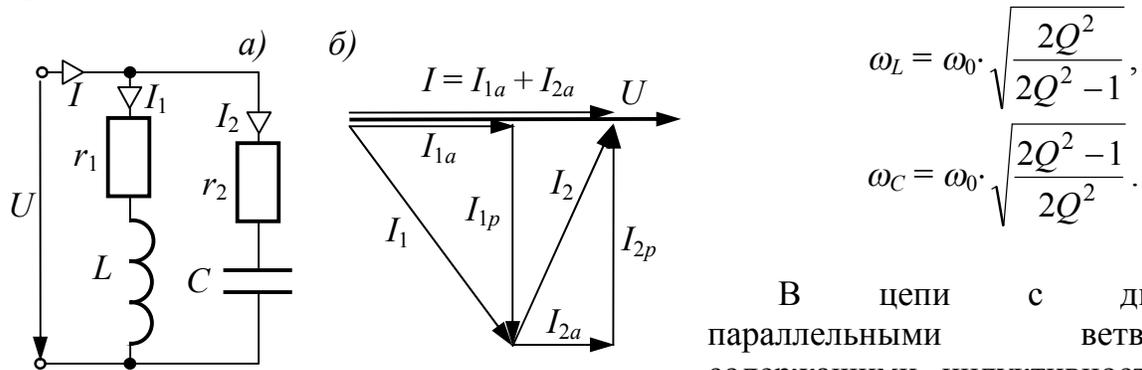


Рис. 5.3. Схема (а) и векторная диаграмма (б) цепи при резонансе токов

В цепи с двумя параллельными ветвями, содержащими индуктивности и емкости (рис. 5.3,а), резонанс наступает при равенстве нулю

входной проводимости:

$$b = b_1 - b_2 = 0, \quad b_1 = b_2.$$

где 
$$b_1 = \frac{\omega L}{r_1^2 + (\omega L)^2},$$

$$b_2 = \frac{1/\omega C}{r_2^2 + (1/\omega C)^2}.$$

В этом случае реактивные составляющие токов  $I_{1p}$  и  $I_{2p}$  равны по величине и противоположны по фазе (рис. 5.3,б). Величины токов в ветвях  $I_1$  и  $I_2$  могут значительно превысить ток в неразветвлённой части цепи  $I$ , поэтому резонанс в параллельном контуре получил название резонанса токов.

Из (6.8) следует, что резонанс токов в рассматриваемой цепи можно достичь изменением пассивных параметров цепи  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $L$  и  $C$  либо изменением частоты напряжения источника  $\omega$ .

Решение указанного соотношения относительно  $\omega$  даёт значение для резонансной частоты:

$$\omega_0' = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - r_1^2}{L/C - r_2^2}} = \omega_0 \cdot \sqrt{\frac{\rho^2 - r_1^2}{\rho^2 - r_2^2}}.$$

Из полученного выражения следует, что резонанс токов возможен в случае, когда сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  оба больше или меньше  $\rho$ .

При  $r_1 = r_2 = 0$ , получаем: 
$$\omega_0' = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

т.е. резонансная частота такая же, как и в последовательном контуре.

В случае, когда  $r_1 = r_2 = \rho$ , имеет место резонанс при любой частоте (так называемый *безразличный резонанс*).

#### Домашняя подготовка к работе

1. Используя данные табл. 5.1, рассчитать индуктивность и ёмкость последовательного контура  $r, L, C$ :  $L = \frac{r \cdot Q}{2\pi f_0}$ ,  $C = \frac{1}{r \cdot Q \cdot 2\pi f_0}$ . Результаты расчета занести в табл. 5.2.

Таблица 5.1. Исходные данные для расчета

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Резонансная частота $f_0$ , кГц	4	5	4	5	4	5	4	5	4	5
Добротность $Q$	2	2.5	3	2	2.5	3	2	2.5	3	2
Активное сопротивление $r$ , Ом	100	100	100	50	50	50	150	150	150	75



2. По данным табл. 5.5 построить графики зависимостей  $I(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$ ,  $U_C(\omega)$ . Определить частоты, при которых ток и напряжения достигают максимальных величин, а также числовые значения этих максимумов. Данные экспериментальных исследований занести в табл. 5.3. Сопоставить результаты расчета и эксперимента и сделать выводы.

3. Собрать схему рис. 5.3,а с параллельным резонансным контуром, используя те же реактивные элементы  $L$  и  $C$ , что и в последовательном контуре и  $r_1 = r_2 = 100 \text{ Ом}$ . Установить напряжение источника  $U = 5 \text{ В}$  и, изменяя частоту от 1 до 9  $\text{кГц}$ , снять резонансные кривые  $I(\omega)$ ,  $I_1(\omega)$ ,  $I_2(\omega)$ . Данные экспериментальных исследований занести в табл. 5.6.

Таблица 5.6. Результаты измерений

$f, \text{кГц}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I, \text{мА}$									
$I_1, \text{мА}$									
$I_2, \text{мА}$									

4. В общей системе координат построить графики зависимостей  $I(\omega)$ ,  $I_1(\omega)$ ,  $I_2(\omega)$ . Определить резонансную частоту и величины токов при этой частоте. Данные занести в табл. 5.4. Сопоставить результаты расчета и эксперимента и сделать выводы.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Какой режим работы называют резонансным?
2. В каких цепях можно наблюдать резонанс напряжений? Указать его характерные особенности.
3. Постройте векторную диаграмму цепи при резонансе напряжений.
4. Какой вид имеют частотные характеристики последовательного резонансного контура?
5. Укажите все возможные способы достижения резонанса напряжений.
6. В каких цепях можно наблюдать резонанс токов? Указать его характерные особенности.
7. Постройте векторную диаграмму цепи при резонансе токов.
8. Какой характер имеют зависимости токов в ветвях параллельного резонансного контура от частоты при отсутствии резистивных сопротивлений?
9. Укажите все возможные способы достижения резонанса токов.
10. Приведите примеры использования на практике резонанса напряжений и резонанса токов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

**Исследование цепей с взаимной индуктивностью**

Цель работы: экспериментальное определение величины взаимной индуктивности  $M$ ; проверка расчетных соотношений, справедливых для последовательного соединения элементов, и методов расчета разветвленных цепей с индуктивно связанными элементами.

## Пояснения к работе

Два элемента называют индуктивно связанными, если при изменении тока в одном элементе, в другом наводится ЭДС взаимной индукции или два элемента называются индуктивно связанными, если у них весь магнитный поток или его часть являются общими для элементов. Взаимная индуктивность определяется выражением:  $M = \frac{\Psi_{12}}{I_1} = \frac{\Psi_{21}}{I_2}$ , где  $\Psi_{12}$  – потокосцепление второго элемента, создаваемое током  $I_1$ ,  $\Psi_{21}$  – потокосцепление первого элемента, создаваемое током  $I_2$ .

Степень индуктивной связи катушек можно характеризовать коэффициентом связи, который определяется соотношением:

$$K_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} < 1,$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности самоиндукции элементов.

Для определения знака напряжения взаимной индукции прибегают к специальной разметке выводов катушек. Два зажима двух индуктивно связанных катушек называются одноимёнными (однополярными), если при одинаково направленных токах  $i_1$ ,  $i_2$  относительно этих зажимов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции в каждом элементе складываются. Это так называемые «начала» или «концы» обмоток.

При последовательном соединении и согласном включении катушек ток относительно одноименных зажимов имеет одинаковое направление и магнитные потоки самоиндукции и взаимоиндукции складываются, а при встречном включении ток относительно одноименных зажимов имеет противоположное направление и потоки вычитаются. В результате этого индуктивность цепи и ее полное сопротивление при согласном включении катушек больше, чем при встречном.

При последовательном соединении расчет цепи выполняется по закону Ома  $I = U/Z$ , причём

$$Z_{согл} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2 + 2X_M)^2}, \quad Z_{встр} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2 - 2X_M)^2},$$

где  $X_1 = \omega L_1$ ,  $X_2 = \omega L_2$  – индуктивные сопротивления первой и второй катушек,

$X_M = \omega M$  – индуктивное сопротивление взаимной индукции.

Так как  $Z_{\text{согл}} > Z_{\text{встр}}$ , то при одинаковом напряжении источника ток в цепи при согласном включении катушек меньший, чем при встречном. Этот факт используют при экспериментальном определении одноименных зажимов индуктивно связанных катушек.

Проделав согласное и встречное включения при последовательном соединении элементов, можно определить взаимную индуктивность  $M$ :

$$M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega},$$

где  $X_{\text{согл}}$  и  $X_{\text{встр}}$  – реактивное сопротивление цепи при согласном и встречном включении, соответственно.

Напряжение на отдельной катушке вычисляется по формуле

$$U_{\text{кат}} = \sqrt{r_k^2 + (X_k \pm X_M)^2} \cdot I.$$

Расчёт цепей со смешанным соединением элементов при наличии индуктивных связей выполняется в комплексной форме. Его можно выполнить методом законов Кирхгофа, методом контурных токов а можно, применив «развязку индуктивной связи». Напомним правило развязки: *если индуктивно связанные элементы сходятся в узле разноимёнными зажимами, то для эквивалентной замены связи в ветви с катушками необходимо ввести элемент  $+X_M$ , а в общую для них ветвь – элемент  $-X_M$ ; и наоборот, если катушки в узле сходятся одноимёнными зажимами, то в их ветви добавляется элемент  $-X_M$ , а в общую ветвь – элемент  $+X_M$* . В домашней подготовке к работе токи разветвленной цепи предлагается рассчитать именно с применением развязки связи. Это позволит убедиться в справедливости правила развязки.

### Домашняя подготовка к работе

1. Нарисовать схемы согласного и встречного включения первой ( $r_1, L_1$ ) и второй ( $r_2, L_2$ ) катушек при последовательном соединении.

2. При заданном напряжении питания  $U$  ( $f = 50 \text{ Гц}$ ) (табл. 6.1) произвести расчет тока и напряжений на первой  $U_1$  и на второй  $U_2$  катушках при последовательном соединении для согласного и встречного включений. Параметры цепи: для варианта №10  $r_1 = 4 \text{ Ом}$ ,  $L_1 = 1.93 \text{ Гн}$ ,  $r_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 5.35 \text{ Гн}$ ,  $M = 3.05 \text{ Гн}$ ; для остальных вариантов  $r_1 = 11 \text{ Ом}$ ,  $L_1 = 0.18 \text{ Гн}$ ,  $r_2 = 51 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 0.69 \text{ Гн}$ ,  $M = 0.24 \text{ Гн}$ . Результаты расчета занести в табл. 6.2.

Таблица 6.1. Напряжение питания

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, \text{В}$	30	25	20	15	32	27	22	18	24	35

3. Изучить порядок построения векторных диаграмм цепи при последовательном включении катушек.

4. В соответствии с вариантом нарисовать схему смешанного соединения элементов (рис. 6.1).

5. Выполнить расчет токов схемы рис. 6.1. Напряжение источника принять согласно варианту (табл. 6.1). Параметры катушек указаны выше, а остальные

элементы схемы рис. 6.1 имеют следующие параметры:  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 200 \text{ Ом}$ ,  $C_1 = 10 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 20 \text{ мкФ}$ .

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему последовательного соединения катушек и при заданном напряжении источника измерить ток  $I$  и напряжения на катушках  $U_1$  и  $U_2$ . Вычислить полное и индуктивное сопротивления, а также индуктивность цепи для согласного и встречного включений

$$Z = \frac{U}{I}, \quad X = \sqrt{Z^2 - r^2}, \quad L = \frac{X}{\omega} \quad (\text{здесь } r = r_1 + r_2).$$

Результаты измерений и вычислений занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Результаты исследования цепи при последовательном соединении катушек

Исследуемые величины		$U, \text{ В}$	$I, \text{ мА}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$Z, \text{ Ом}$	$X, \text{ Ом}$	$L, \text{ Гн}$
Согласное включение	Расчет							
	Эксперимент							
Встречное включение	Расчет							
	Эксперимент							

По результатам экспериментов, приведенным в табл. 6.2, рассчитать взаимную индуктивность  $M$ .

2. Построить в масштабе векторные диаграммы для согласного и встречного включений катушек, показав на них напряжения на всех элементах цепи (на  $r_1$ ,  $L_1$  и т.д.).

3. В соответствии с вариантом собрать схему рис. 6.1, предусмотрев возможность измерения токов в ветвях схемы. Установить требуемое напряжение источника и измерить токи. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 6.3. Сравнить полученные результаты, сделать выводы.

Таблица 6.3. Результаты исследования цепи при смешанном соединении элементов

Исследуемые величины	$U, \text{ В}$	$I_1, \text{ мА}$	$I_2, \text{ мА}$	$I_3, \text{ мА}$
Расчет				
Эксперимент				

### Вопросы для самоконтроля

1. Какова физическая сущность явления взаимной индукции, и как оно может быть отражено математически?

2. Какие зажимы катушек называют одноимёнными, какие существуют способы их определения?

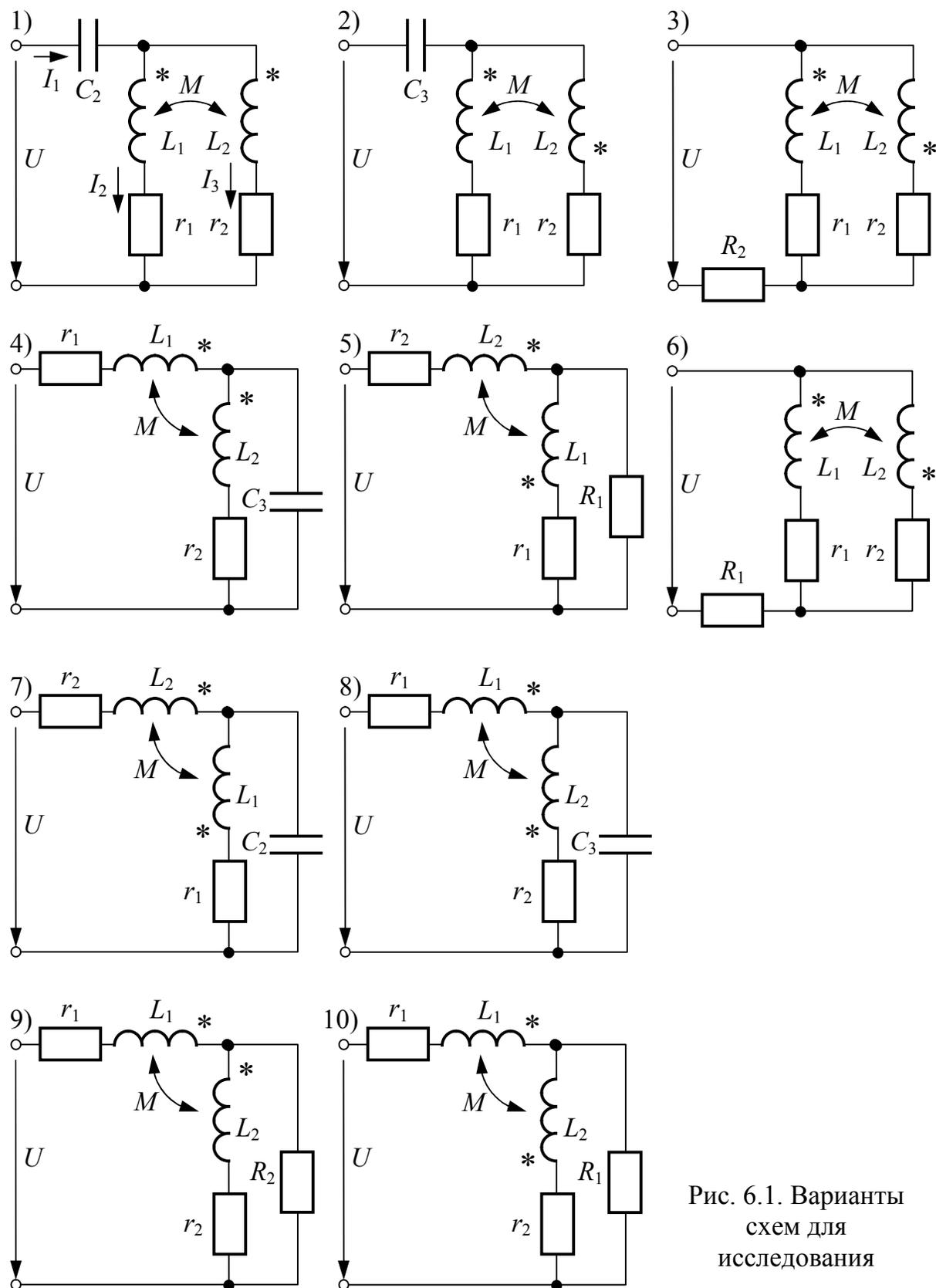


Рис. 6.1. Варианты  
схем для  
исследования

3. Как можно определить взаимную индуктивность  $M$  катушек экспериментально?

4. Какое соединение индуктивно связанных катушек носит название согласного (встречного)?

5. Что такое «ёмкостный эффект» и когда он возможен при последовательном соединении?

6. Постройте векторные диаграммы для согласного и встречного включения двух индуктивно связанных катушек.

7. Сформулируйте и покажите на небольшом примере правило «развязки» индуктивной связи.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### *Исследование трёхфазных цепей*

Цель работы: экспериментальная проверка соотношений между линейными и фазными величинами напряжений и токов при соединении сопротивлений нагрузки звездой и треугольником.

#### Пояснения к работе

В трёхфазных цепях сопротивления нагрузки включаются в схему соединения звездой или треугольником. При равенстве комплексных сопротивлений фаз нагрузки она называется симметричной, в противном случае – несимметричной. В трехфазной цепи возникает симметричный режим работы, если к симметричной нагрузке приложена симметричная система напряжений:

$$\underline{U}_A = U, \quad \underline{U}_B = \underline{U}_A \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_C = \underline{U}_A \cdot e^{+j120^\circ}.$$

При соединении звездой (рис. 7.1) сопротивления фаз нагрузки

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi},$$

а токи 
$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_A \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_A \cdot e^{+j120^\circ}.$$

Эти токи образуют симметричную систему векторов (равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ ). В этом случае ток нулевого провода, определяемый согласно первому закону Кирхгофа, равен нулю:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$$

Напряжение смещения нейтрали (напряжение между нулевыми точками приемника и источника) также равно нулю:  $\underline{U}_N = \underline{U}_{O_1O} = 0$ .

По этой причине в симметричном режиме нулевой провод не используется.

Линейные напряжения определяются по второму закону Кирхгофа в виде разности соответствующих фазных напряжений и тоже образуют симметричную систему векторов:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B, \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C, \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A,$$

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} U \cdot e^{j30^\circ}, \quad \underline{U}_{BC} = \sqrt{3} U \cdot e^{-j90^\circ}, \quad \underline{U}_{CA} = \sqrt{3} U \cdot e^{j150^\circ}.$$

При соединении нагрузки в звезду линейные и фазные величины напряжений и токов связаны между собой соотношениями:

$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_\phi, \quad I_l = I_\phi.$$

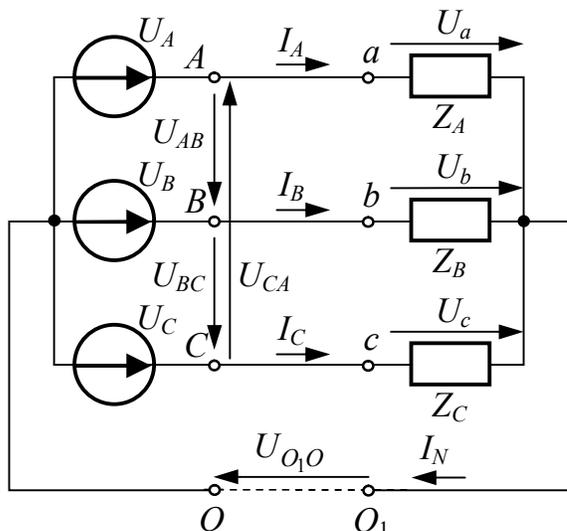


Рис. 7.1. Схема соединения звездой

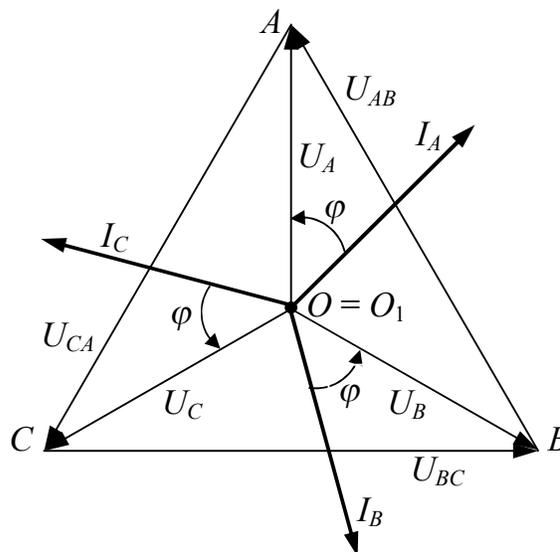


Рис. 7.2. Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной нагрузке, соединенной звездой ( $\varphi > 0$ )

Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной активно-индуктивной нагрузке, соединённой звездой, показана на рис. 7.2.

Если нагрузка несимметрична, то между нейтральными точками нагрузки  $O_1$  и источника  $O$  возникает напряжение смещения нейтрали  $\underline{U}_{O_1O}$ , которое определяется по методу двух узлов:

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}.$$

Здесь  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C, \underline{Y}_N$  – комплексы проводимостей фаз нагрузки и нулевого провода, соответственно;  $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$  – комплексы фазных напряжений источника.

Фазные напряжения на нагрузке определяются согласно второму закону Кирхгофа:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{O_1O}, \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{O_1O}, \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{O_1O}.$$

Расчет токов выполняется по закону Ома:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_A}, \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_B}, \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_C}.$$

При несимметричной нагрузке для выравнивания фазных напряжений приёмника применяется нулевой провод (НП), ток в котором определяется по первому закону Кирхгофа:

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

При соединении нагрузки треугольником (рис. 7.3) фазные напряжения на нагрузке равны линейным напряжениям, поэтому фазные токи определяются по закону Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{AB} / \underline{Z}_{ab}, \quad \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{BC} / \underline{Z}_{bc}, \quad \underline{I}_{ca} = \underline{U}_{CA} / \underline{Z}_{ca}.$$

Линейные токи определяются по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.$$

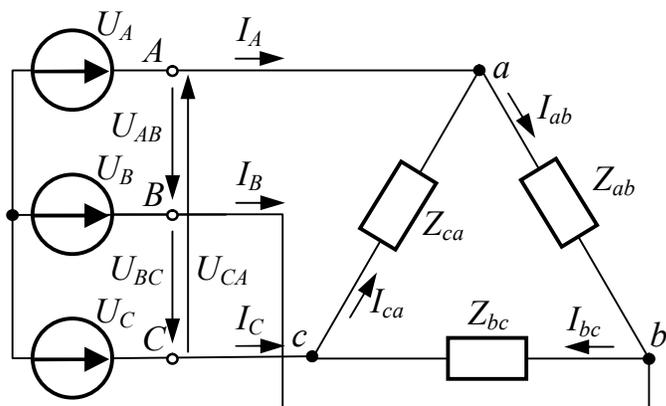


Рис. 7.3. Схема соединения треугольником

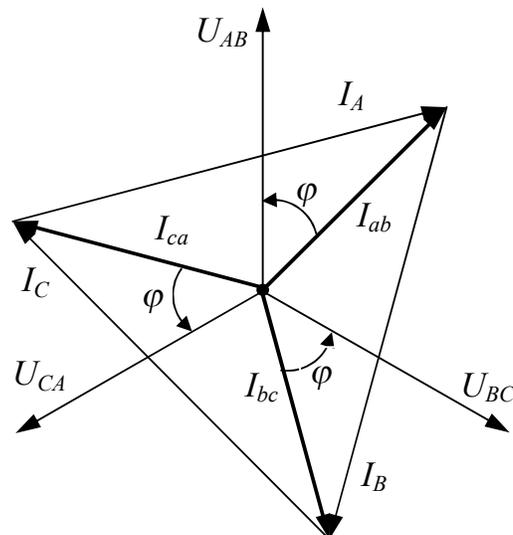


Рис. 7.4. Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной нагрузке, соединенной треугольником ( $\varphi > 0$ )

При симметричном режиме работы ( $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z} = \underline{Z} \cdot e^{j\varphi}$ ) фазные токи образуют симметричную систему векторов:

$$\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{AB} / \underline{Z}, \quad \underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ab} \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \underline{I}_{ca} = \underline{I}_{ab} \cdot e^{j120^\circ}.$$

Линейные токи также образуют симметричную систему векторов:

$$\underline{I}_A = \sqrt{3} \underline{I}_{ab} \cdot e^{-j30^\circ}, \quad \underline{I}_B = \sqrt{3} \underline{I}_{bc} \cdot e^{-j30^\circ}, \quad \underline{I}_C = \sqrt{3} \underline{I}_{ca} \cdot e^{-j30^\circ} \quad \text{или} \quad \underline{I}_B = \underline{I}_A \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_A \cdot e^{j120^\circ}.$$

Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной активно-индуктивной нагрузке, соединенной треугольником, показана на рис. 7.4.

При соединении нагрузки треугольником линейные и фазные величины напряжений и токов связаны между собой соотношениями:

$$U_l = U_\phi, \quad I_l = \sqrt{3} \cdot I_\phi.$$

Если нагрузка несимметрична, то токи определяются так же, как и при симметричном режиме: фазные – по закону Ома, а линейные – по первому закону Кирхгофа.

#### Домашняя подготовка к работе

1. Изучить тему «Трёхфазные цепи синусоидального тока», ознакомиться с целью и пояснениями к данной лабораторной работе. Подготовить схемы соединения звездой и треугольником и таблицы для результатов экспериментов.

2. Выполнить расчет токов и напряжений при соединении нагрузки звездой для трёх режимов: симметричная нагрузка (с нулевым проводом и без него); обрыв одной из фаз нагрузки (с нулевым проводом и без него); короткое замыкание одной из фаз нагрузки (без нулевого провода). Напряжение трехфазного источника и параметры нагрузки выбрать в соответствии с вариантом из табл. 7.1. Результаты расчётов занести в табл. 7.3. По результатам расчетов построить векторные диаграммы для всех режимов.

3. Выполнить расчет токов и напряжений при соединении нагрузки треугольником для трёх режимов: симметричная нагрузка; обрыв одной из фаз нагрузки; обрыв линейного провода в одной из фаз. Напряжение трехфазного источника и параметры нагрузки выбрать в соответствии с вариантом из табл. 7.1. Результаты расчётов занести в табл. 7.4. По результатам расчетов построить векторные диаграммы для всех режимов.

Таблица 7.1. Варианты заданий для соединения нагрузки звездой и треугольником

Вариант	$U_{\phi}, В$	$\underline{Z}, Ом$	Схема «Y»	Схема «Y»	Схема «Δ»	Схема «Δ»
			Обрыв фазы	КЗ фазы	Обрыв фазы	Обрыв провода
1	12	200	В	С	a-b	С
2	26	-j796	С	В	b-c	В
3	15	300	А	А	c-a	А
4	22	-j637	В	А	a-b	А
5	16	400	С	В	b-c	В
6	30	500-j637	В	С	c-a	С
7	20	500	А	В	a-b	В
8	32	400-j637	С	А	b-c	А
9	34	400-j796	В	С	c-a	С
10	38	500-j796	В	В	a-b	В

#### Порядок выполнения работы

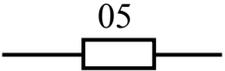
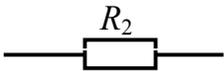
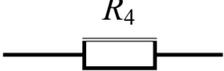
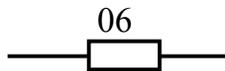
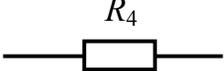
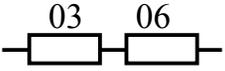
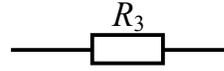
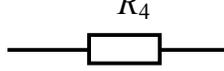
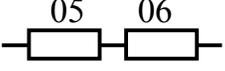
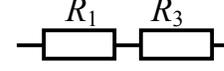
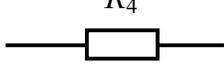
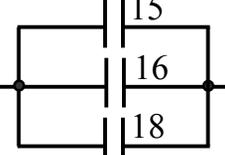
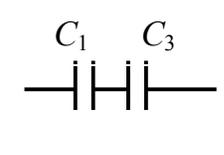
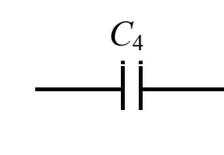
1. Используя набор съёмных и блок стационарных элементов стенда, сформировать симметричную трехфазную нагрузку в соответствии с рассчитанным вариантом. Формирование сопротивлений фаз нагрузки выполнить, используя табл. 7.2, согласно которой в одной из фаз нагрузка состоит из съёмных резистивных (01 – 10) и ёмкостных (11 – 20) элементов. В другой фазе при формировании нагрузки используется блок стационарных резистивных ( $R_1 – R_3$ ) и емкостных ( $C_1 – C_3$ ) элементов, а в третьей фазе используются регулируемые резистивный ( $R_4$ ) и емкостный ( $C_4$ ) элементы этого блока.

2. Подключить сформированную симметричную трехфазную нагрузку, соединенную звездой, к блоку трёхфазного источника и установить напряжение

в соответствии с вариантом. В каждой из фаз необходимо включить переключки, предусмотрев возможность измерения токов.

3. Произвести измерения токов в фазах  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  и нулевом проводе  $I_N$ , линейных  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  и фазных  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  напряжений на нагрузке и напряжения смещения нейтрали  $U_N$  при включенном и при отключенном нулевом проводе. Исследования провести для трех случаев: симметричный режим; режим обрыва одной из фаз нагрузки; режим короткого замыкания одной из фаз нагрузки. Проведение короткого замыкания выполнить только при отключенном нулевом проводе в присутствии преподавателя. Результаты всех измерений занести в табл. 7.3.

Таблица 7.2. Формирование сопротивлений нагрузки

$\underline{Z}$ , Ом	Съемные элементы	Блок стационарных элементов	Блок стационарных элементов
200			
300			
400			
500			
$j637$			
$j796$			

4. Сформированные в п.1 сопротивления фаз соединить треугольником, подключить к блоку трёхфазного источника и установить фазное напряжение в соответствии с вариантом. В каждом линейном проводе и в каждой фазе нагрузки необходимо включить переключки, предусмотрев возможность измерения линейных и фазных токов.

5. Произвести измерения линейных  $I_A, I_B, I_C$  и фазных  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  токов, а также напряжений на нагрузке  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ . Исследования провести для трёх случаев: симметричный режим; режим обрыва одной из фаз нагрузки; режим обрыва линейного провода в одной из фаз. Результаты всех измерений занести в табл. 7.4.

Таблица 7.3. Результаты исследования 3х-фазной цепи при соединении нагрузки звездой

Режим работы			Напряжения, $V$						Токи, $A$			
			Линейные			Фазные						
			$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_a$	$U_b$	$U_c$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$
Симметричный	Без НП	Расч.										
		Эксп.										
	С НП	Расч.										
		Эксп.										
Обрыв фазы	Без НП	Расч.										
		Эксп.										
	С НП	Расч.										
		Эксп.										
КЗ фазы	Без НП	Расч.										
		Эксп.										

Таблица 7.4. Результаты исследования 3х-фазной цепи при соединении нагрузки треугольником.

Режим работы		Напряжения, $V$			Токи, $A$					
					Линейные			Фазные		
		$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{ab}$	$I_{bc}$	$I_{ca}$
Симметричный	Расч.									
	Эксп.									
Обрыв фазы	Расч.									
	Эксп.									
Обрыв лин. провода	Расч.									
	Эксп.									

5. Сравнить измеренные и расчётные значения токов и напряжений по каждому из пунктов исследования. Проверить соответствие векторных диаграмм, построенных при подготовке к работе, экспериментальным данным.

6. Сформулировать выводы по выполненной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Как соотносятся между собой линейные и фазные напряжения и токи при соединении приемника звездой?
2. Почему при симметричной нагрузке в нулевом проводе отсутствует ток?
3. Какое назначение имеет нулевой провод в трехфазных цепях?
4. Что называется смещением нейтрали? Как рассчитывается и как измеряется эта величина?
5. Почему короткое замыкание в одной из фаз приемника разрешается выполнять только при выключенном нулевом проводе?
6. Расскажите о порядке построения векторных диаграмм трехфазных цепей при соединении приемника звездой.
7. Как соотносятся между собой линейные и фазные напряжения и токи при соединении приемника треугольником?
8. Как изменяются линейные токи симметричного приемника, соединенного треугольником, при обрыве одной из его фаз?
9. Расскажите о порядке построения векторных диаграмм трехфазных цепей при соединении приемника треугольником.
10. Как изменяются линейные и фазные токи симметричного приемника, соединенного треугольником, при обрыве одного из линейных проводов?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### *Исследование электрических цепей несинусоидального тока*

Цель работы: экспериментальная проверка методики расчета линейных электрических цепей при несинусоидальных воздействиях и исследование влияния индуктивности и емкости на форму кривой тока.

#### Пояснения к работе

Методика расчета линейных электрических цепей несинусоидального тока состоит в том, что заданное несинусоидальное периодическое напряжение или ток источника аналитически или графоаналитически представляют в виде гармонического ряда Фурье, после чего выполняют расчет цепи по каждой гармонике отдельно и записывают результирующие значения мгновенных или действующих значений токов и напряжений на отдельных участках.

В общем случае периодическая несинусоидальная функция представляется рядом Фурье вида

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \cdot \sin(\omega t + \psi_1) + A_2 \cdot \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + A_k \cdot \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots, \quad (8.1)$$

где  $A_0$  – постоянная составляющая ряда Фурье или нулевая гармоника;

$A_1 \cdot \sin(\omega t + \psi_1)$  – основная гармоника ряда, имеющая одинаковый с несинусоидальной функцией период;

$A_k \cdot \sin(k\omega t + \psi_k)$  –  $k$ -я гармоника ряда с частотой, в  $k$  раз большей частоты основной гармоники.

Если несинусоидальная периодическая функция  $f(\omega t)$  имеет геометрически правильную форму и легко может быть представлена в виде аналитической функции, то ее разложение в ряд Фурье осуществляется аналитически согласно известным формулам. Результаты такого разложения приведены в справочниках.

Постоянную составляющую  $A_0$  ряда Фурье, амплитуду синусной составляющей  $A_k'$   $k$ -ой гармоники ряда и амплитуду косинусной составляющей  $A_k''$   $k$ -ой гармоники находят из выражений:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t),$$

$$A_k' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(k\omega t) d(\omega t),$$

$$A_k'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos(k\omega t) d(\omega t).$$

При замене синусного и косинусного рядов одинарным синусоидальным рядом Фурье (8.1) используют следующие формулы:

$$A_k = \sqrt{(A_k')^2 + (A_k'')^2},$$

$$\psi_k = \arctg \frac{A_k''}{A_k'}, \text{ если } A_k' > 0, \quad \psi_k = 180^\circ + \arctg \frac{A_k''}{A_k'}, \text{ если } A_k' < 0.$$

При построении различных гармоник в одной системе координат необходимо учитывать, что масштабы по оси ординат для всех гармоник одинаковы, а по оси абсцисс – различны. Масштаб по оси абсцисс для  $k$ -ой гармоники должен быть взят в  $k$  раз большим, чем для первой гармоники, так как в одном периоде первой гармоники вмещается  $k$  периодов  $k$ -ой гармоники.

В данной работе используется несинусоидальное периодическое напряжение источника треугольной и прямоугольной форм (рис. 8.1 и 8.2).

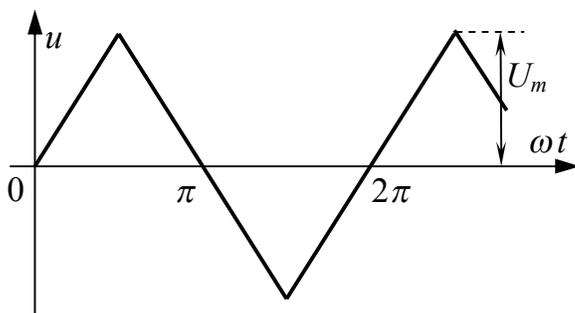


Рис. 8.1. Несинусоидальное напряжение треугольной формы

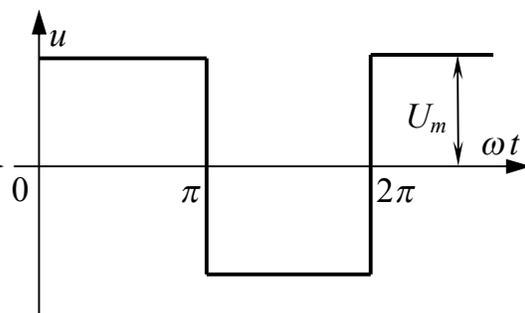


Рис. 8.2. Несинусоидальное напряжение прямоугольной формы

Ряд Фурье для напряжения треугольной формы имеет вид:

$$u(\omega t) = \frac{8U_m}{\pi^2} \left( \sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \dots \right),$$

а для напряжения прямоугольной формы:

$$u(\omega t) = \frac{4U_m}{\pi} \left( \sin\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right).$$

При расчете цепи по каждой из гармоник напряжения источника отдельно следует помнить о том, что индуктивное и емкостное сопротивления зависят от частоты

$$X_L^{(k)} = k \cdot X_L^{(1)}, \quad X_L^{(0)} = 0; \quad X_C^{(k)} = X_C^{(1)}/k, \quad X_C^{(0)} = \infty.$$

Из приведенных соотношений следует, что индуктивность подавляет высшие гармоники в составе кривой тока, делая ее по форме близкой к синусоиде. Емкость, наоборот, способствует увеличению высших гармоник в кривой тока, чем делает ее более искаженной в сравнении с кривой питающего напряжения.

Действующие значения несинусоидальных напряжений и токов:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2}, \quad I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_k^2}.$$

#### Домашняя подготовка к работе

1. Согласно номеру варианта и данных табл. 8.1 вычертить график несинусоидального напряжения источника (рис. 8.1 или 8.2), электрическую цепь для проведения исследований (рис. 8.3) и выбрать их параметры (табл. 8.1).

Таблица 8.1. Параметры электрической цепи для исследований

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вид напряжения источника	Напряжения треугольной формы (рис. 8.1)					Напряжения прямоугольной формы (рис. 8.2)				
$U_m, B$	10	15	20	22	15	20	10	15	20	22
$r, Ом$	51	150	75	100	300	51	150	75	100	300
$L, мГн$	5	7	10	15	5	5	7	10	15	5
$C, мкФ$	2	1	2	2	0.5	2	1	2	2	0.5

2. Разложить несинусоидальное периодическое напряжение источника  $u(\omega t)$  в ряд Фурье, выполнив расчет для трех гармоник – основной и двух следующих высших. Вычислить действующее значение входного напряжения. Результаты расчета занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2. Амплитудные значения различных гармоник входного напряжения и действующие значения напряжений и тока в схеме рис. 8.3а.

Исследуемые величины	$U_{1m}, B$	$U_{3m}, B$	$U_{5m}, B$	$U, B$	$U_r, B$	$U_C, B$	$I, mA$
Расчет							
Эксперимент	-	-	-				

3. Для электрической цепи рис. 8.3а при напряжении источника  $u(\omega t)$  частоты  $f = 1 \text{ кГц}$  рассчитать мгновенные и действующие значения тока, действующие значения напряжений на резисторе и конденсаторе. Результаты расчета занести в табл. 8.2. Построить график тока.

#### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 8.3а с параметрами элементов, указанными в табл. 8.1. Максимальное напряжение источника  $U_m$  и его частоту  $f = 1 \text{ кГц}$  установить по изображению  $u(\omega t)$  на экране осциллографа. Предусмотреть в схеме переключку для измерения тока.

2. С помощью комбинированного прибора измерить действующие значения тока и напряжений на источнике, резисторе и конденсаторе. Результаты измерений занести в табл. 8.2. Сопоставить результаты расчета и эксперимента и сделать вывод.

3. Подключить осциллограф параллельно резистору  $r$  и снять с экрана кривую  $u_r(\omega t)$ . Сравнить полученную кривую с поостранным графиком тока. Сделать вывод.

4. Сравнить формы кривых напряжения источника питания и тока. Сделать вывод о влиянии ёмкости на форму кривой тока.

5. Собрать схему рис. 8.3б и снять осциллограмму напряжения на резисторе, которая по форме совпадает с кривой тока. Сравнить формы кривых напряжения источника питания и тока. Сделать вывод о влиянии индуктивности на форму кривой тока.

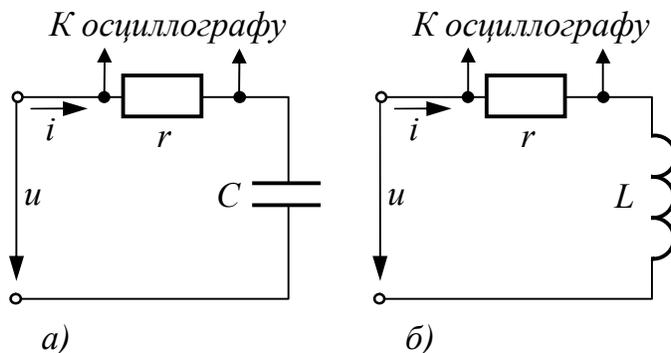


Рис. 8.3. Схемы для исследований

#### Вопросы для самоконтроля

1. Укажите причины появления высших гармоник в кривой тока линейной цепи.

2. В чем сущность и каковы особенности методики расчета линейных электрических цепей при несинусоидальных напряжениях?

3. Каков гармонический состав напряжения источника треугольной (прямоугольной) формы? Как объяснить такой гармонический состав питающего напряжения? Какие гармоники отсутствуют в гармоническом составе напряжения и почему?

4. Как индуктивное и ёмкостное сопротивления приемников зависят от номера гармоники?

5. Как вычисляются действующие значения несинусоидальных напряжений и токов?

6. Какие значения несинусоидальных функций измеряют приборы различных систем?

7. Определить показание амперметра магнитоэлектрической системы при включении его в одну из ветвей цепи (рис. 8.3).

8. Какое влияние оказывают индуктивность и емкость цепи на форму кривой тока при сопоставлении ее с формой несинусоидального напряжения источника?

9. Назовите известные устройства, в которых имеют место несинусоидальные напряжения и токи.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

### **Исследование переходных процессов в электрических цепях постоянного тока с одним накопителем энергии**

Цель работы: исследование переходных процессов при заряде и разряде цепи с индуктивностью и цепи с ёмкостью. Экспериментальная проверка расчетных графиков зависимостей напряжений и токов от времени.

#### Пояснения к работе

При включении цепи  $r, L$  на постоянное напряжение  $U$  (рис. 9.1 электронный ключ  $\mathcal{E}K$  замыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением, составленным на основании второго закона Кирхгофа

$$ir + L \frac{di}{dt} = U.$$

Решение уравнения относительно тока имеет вид:

$$i = i_{np} + i_{cs},$$

где  $i_{np} = \frac{U}{r}$  – принужденная составляющая тока, которая определяется как установившийся ток после окончания переходного процесса;

$i_{cs} = Ae^{pt}$  – свободная составляющая тока, которая определяется в экспоненциальном виде;

$A$  – постоянная интегрирования;

$p$  – корень характеристического уравнения.

Для рассматриваемого случая характеристическое уравнение имеет вид:

$$pL + r = 0, \text{ решение которого } p = -\frac{r}{L}.$$

Постоянная интегрирования определяется из начальных условий:

$$A = i_{cs}(0_+) = i(0_+) - i_{np}(0_+).$$

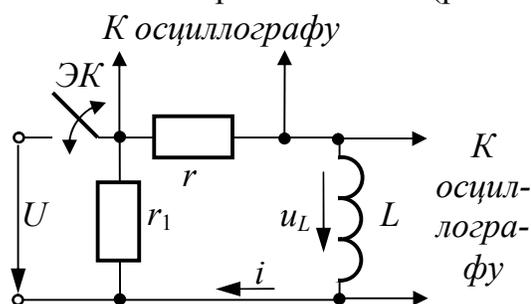


Рис. 9.1. Схема исследования переходных процессов в цепи  $r, L$

Согласно первому закону коммутации  $i(0_+) = i(0_+) = i(0_+) = i(0_-) = 0$ .

Тогда:  $A = 0 - \frac{U}{r} = -\frac{U}{r}$  и  $i = i_{np} + i_{cs} = \frac{U}{r} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}})$ ,

где  $\tau_3 = \frac{L}{r}$  – постоянная времени цепи при заряде индуктивности.

Напряжение на индуктивности

$$u_L = L \frac{di}{dt} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}.$$

Графики зависимостей  $i(t)$  и  $u_L(t)$  представлены на рис. 9.2а.

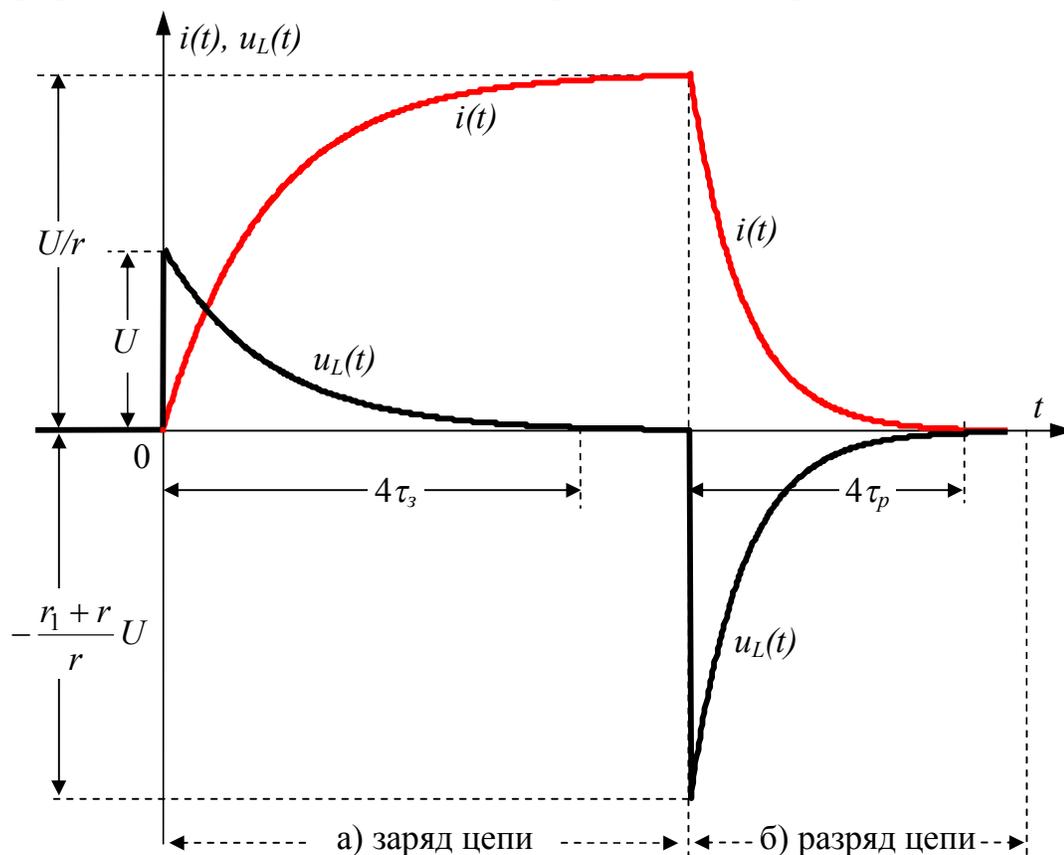


Рис. 9.2. Графики зависимостей  $i(t)$  и  $u_L(t)$

В начальный момент времени при  $t = 0$  (момент замыкания ЭК) ток в цепи  $i(0_+) = 0$ , а напряжение на индуктивности  $u_L(0_+) = U$ . В дальнейшем ток возрастает по экспоненциальному закону до  $i_{np} = \frac{U}{r}$ , а напряжение спадает до  $u_{Lnp} = 0$ .

Таким образом, для рассматриваемой цепи в начальный момент переходного процесса индуктивный элемент обладает бесконечным сопротивлением, что эквивалентно разрыву, а в принужденном режиме его сопротивление становится равным нулю (короткое замыкание). В процессе

заряда индуктивность выступает накопителем энергии магнитного поля. К концу переходного процесса она накапливает энергию:

$$W_M = \frac{Li_{np}^2}{2} = \frac{LU^2}{2r^2}.$$

Теоретически переходный процесс длится бесконечно долго, однако практически он заканчивается через промежуток времени, когда свободная составляющая уменьшается до величины, меньшей 5% её наибольшего значения.

Практическая продолжительность переходного процесса при разряде

$$T_m = (3 \div 5)\tau_3.$$

При переключении цепи  $r, L$  на сопротивление  $r_1$  (рис. 9.1 ЭК размыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$i \cdot (r + r_1) + L \frac{di}{dt} = 0.$$

Решение этого уравнения

$$i = i_{np} + i_{св},$$

где  $i_{np} = 0$  – принужденная составляющая тока;

$$i_{св} = Ae^{pt} \text{ – свободная составляющая тока.}$$

В этом случае характеристическое уравнение имеет вид:

$$pL + r + r_1 = 0, \quad \text{решение которого } p = -\frac{r + r_1}{L}.$$

Постоянная интегрирования  $A = i_{св}(0_+) = i(0_+) - i_{np}(0_+)$ .

Согласно первому закону коммутации  $i(0_+) = i(0_-) = \frac{U}{r}$ ,

тогда 
$$A = \frac{U}{r} - 0 = \frac{U}{r} \quad \text{и} \quad i = \frac{U}{r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}},$$

где  $\tau_p = \frac{L}{r + r_1}$  – постоянная времени цепи при разряде индуктивности.

Напряжение на индуктивности:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -\frac{r_1 + r}{r} U \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}}.$$

Графики зависимостей  $i(t)$  и  $u_L(t)$  представлены на рис. 9.2б.

Из-за наличия сопротивления  $r_1$  постоянная времени экспоненты цепи разряда индуктивности уменьшается в  $\frac{\tau_3 = r_1 + r}{r}$  раз по сравнению с постоянной времени экспоненты цепи заряда.

Уменьшение продолжительности переходного процесса при разряде сопровождается увеличением в такой же пропорции напряжения на индуктивности в начальный момент времени.

В процессе разряда энергия, накопленная в индуктивности при заряде (предыдущий режим), выделяется в сопротивлениях  $r$  и  $r_1$ .

При включении цепи  $r, C$  на постоянное напряжение  $U$  (рис. 9.3, ЭК замыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$rC \frac{du_C}{dt} + u_C = U.$$

Решение этого уравнения имеет вид :

$$u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв},$$

где  $u_{Cnp}$  и  $u_{Cсв}$  – принужденная и свободная составляющие напряжения, соответственно.

$u_{Cnp} = U$ , определяется как установившееся после окончания переходного процесса напряжение на конденсаторе.

$u_{Cсв} = Ae^{pt}$  определяется в экспоненциальном виде, где  $A$  – постоянная интегрирования;

$p$  – корень характеристического уравнения.

Для рассматриваемого случая характеристическое уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{pC} + r = 0, \text{ решение которого } p = -\frac{1}{rC}.$$

Постоянная интегрирования  $A = u_{Cсв}(0_+) = u_C(0_+) - u_{Cnp}(0_+)$ .

Согласно второму закону коммутации  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$ ,

тогда  $A = 0 - U = -U$  и  $u_C(t) = U - U \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}} = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}})$ , где  $\tau_3 = rC$  – постоянная времени экспоненты при заряде емкости.

Ток заряда емкости:

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}.$$

Графики зависимостей  $i(t)$  и  $u_C(t)$  представлены на рис. 9.4а.

В начальный момент времени при  $t=0$  (момент замыкания ЭК) напряжение на конденсаторе  $u_C(0_+) = 0$ , а ток в цепи  $i(0_+) = \frac{U}{r}$ . В дальнейшем напряжение на конденсаторе возрастает по экспоненциальному закону до  $u_{Cnp} = U$ , а ток уменьшается до  $i_{np} = 0$ .

Таким образом, для рассматриваемой цепи в начальный момент переходного процесса конденсатор обладает нулевым сопротивлением (эквивалентен короткому замыканию), а в принужденном режиме его сопротивление становится равным бесконечности (разрыв цепи). В процессе заряда конденсатор выступает накопителем энергии электрического поля. К концу переходного процесса он накапливает энергию:

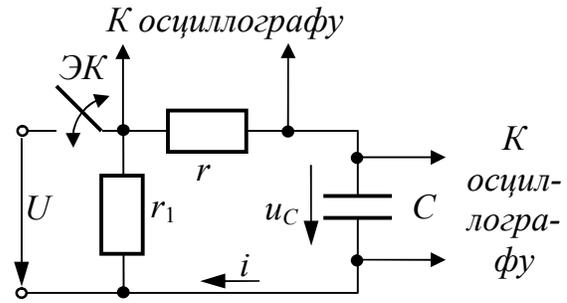
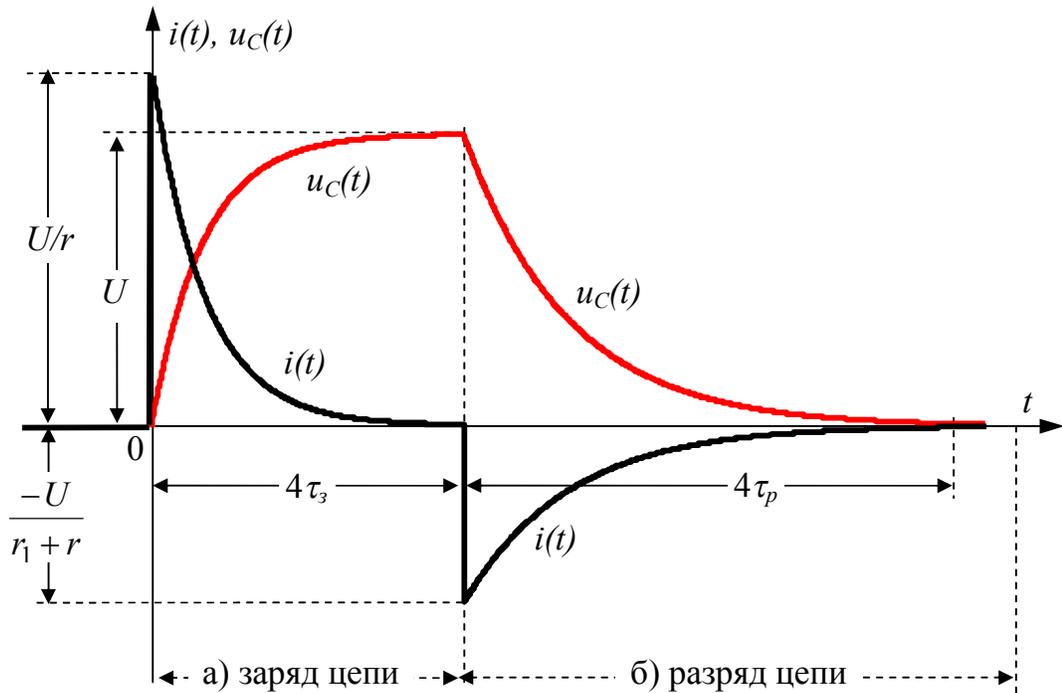


Рис. 9.3. Схема исследования переходных процессов в цепи  $r, C$

$$W_{\Sigma} = \frac{C \cdot U^2}{2}.$$

Рис. 9.4. Графики зависимостей  $i(t)$  и  $u_C(t)$ 

При переключении цепи  $r, C$  на сопротивление  $r_1$  (рис. 9.3, ЭК размыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением:

$$(r + r_1) \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв},$$

где  $u_{Cnp}$  и  $u_{Cсв}$  – принужденная и свободная составляющие напряжения, соответственно;  $u_{Cnp} = 0$ ,  $u_{Cсв} = Ae^{pt}$ .

Здесь  $A$  – постоянная интегрирования;

$p$  – корень характеристического уравнения цепи разряда.

Для рассматриваемого случая характеристическое уравнение имеет вид:

$$\frac{1}{pC} + r + r_1 = 0, \quad \text{решение которого } p = -\frac{1}{(r + r_1)C}.$$

Постоянная интегрирования  $A = u_{Cсв}(0_+) = u_C(0_+) - u_{Cnp}(0_+)$ .

Согласно второму закону коммутации  $u_C(0_+) = u_C(0_-) = U$ ,

тогда  $A = U - 0 = U$  и  $u_C(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}}$ ,

где  $\tau_p = (r + r_1) \cdot C$  – постоянная времени экспоненты при разряде емкости.

Ток разряда емкости:  $i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{-U}{r + r_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_p}}$ .

Графики зависимостей  $i(t)$  и  $u_C(t)$  представлены на рис. 9.4б.

Из-за наличия сопротивления  $r_1$  в цепи разряда конденсатора происходит увеличение постоянной времени цепи в  $\frac{\tau_p = r_1 + r}{\tau_3}$  раз и соответствующее

уменьшение величины тока в нулевой момент времени. В процессе разряда энергия, накопленная конденсатором при заряде (предыдущий режим), выделяется в сопротивлениях  $r$  и  $r_1$  в виде тепла.

Заметим, что график напряжения  $u_C(t)$  в цепи  $r, C$  аналогичен графику тока  $i(t)$  в цепи  $r, L$ . И наоборот, график  $i(t)$  в цепи  $r, C$  аналогичен графику  $u_L(t)$  в цепи  $r, L$ . Это свойство получило название дуальности цепей.

### Домашняя подготовка к работе

1. Изучить тему "Переходные процессы в цепях постоянного тока при заряде и разряде цепи с индуктивностью и цепи с ёмкостью".

2. В соответствии с номером варианта и данными табл. 9.1 для схемы рис. 9.1 определить основные расчетные величины, характеризующие переходный процесс, а также ток  $i(t)$  и напряжение на индуктивности  $u_L(t)$  при включении цепи  $r, L$  к источнику постоянного напряжения  $U = 5 \text{ В}$  (ЭК замыкается) и при замыкании цепи  $r, L$  на резистор  $r_1$  (ЭК размыкается). Основные расчетные величины занести в табл. 9.2.

Таблица 9.1. Параметры элементов для исследования цепи  $r, L$

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L, \text{ мГн}$	5	7	10	12	15	17	5	7	10	12
$r, \text{ Ом}$	50	75	100	100	150	150	75	100	125	150
$r_1, \text{ Ом}$	75	50	100	75	100	100	50	75	75	100

3. Начертить расчетные графики  $i(t)$  и  $u_L(t)$  при замыкании и размыкания ключа.

Таблица 9.2. Результаты расчета и эксперимента при исследовании цепи  $r, L$

Показатели переходного процесса	Включение (заряд) цепи $r, L$						
	$\tau_3, \text{ мс}$	$i(0_+), \text{ мА}$	$u_L(0_+), \text{ В}$	$i_{np}, \text{ мА}$	$u_{Lnp}, \text{ В}$	$i(t)$	$u_L(t)$
Вычислено							
Измерено						-	-
Показатели переходного процесса	Замыкание (разряд) цепи $r, L$ на резистор $r_1$						
	$\tau_p, \text{ мс}$	$i(0_+), \text{ мА}$	$u_L(0_+), \text{ В}$	$i_{np}, \text{ мА}$	$u_{Lnp}, \text{ В}$	$i(t)$	$u_L(t)$
Вычислено							
Измерено						-	-

4. В соответствии с номером варианта и данными табл. 9.3 для схемы рис. 9.4 определить основные расчетные величины, характеризующие переходный процесс, а также ток переходного процесса  $i(t)$  и напряжение на конденсаторе  $u_C(t)$  при включении цепи  $r, C$  к источнику постоянного напряжения  $U = 5 В$  (ЭК замыкается) и при замыкании цепи  $r, C$  на резистор  $r_1$  (ЭК размыкается). Основные расчетные величины занести в табл. 9.4.

Таблица 9.3. Параметры элементов для исследования цепи  $r, C$ 

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$C, мкФ$	0.1	0.2	0.25	0.35	0.5	0.75	0.1	0.2	0.25	0.35
$r, Ом$	500	200	200	150	125	75	400	150	150	125
$r_1, Ом$	300	150	150	125	50	50	350	200	200	150

Таблица 9.4. Результаты расчета и эксперимента при исследовании цепи  $r, C$ 

Показатели переходного процесса	Включение (заряд) цепи $r, C$						
	$\tau_z, мс$	$i(0_+), мА$	$u_C(0_+), В$	$i_{np}, мА$	$u_{Cnp}, В$	$i(t)$	$u_C(t)$
Вычислено							
Измерено						-	-
Показатели переходного процесса	Замыкание (разряд) цепи $r, C$ на резистор $r_1$						
	$\tau_p, мс$	$i(0_+), мА$	$u_C(0_+), В$	$i_{np}, мА$	$u_{Cnp}, В$	$i(t)$	$u_C(t)$
Вычислено							
Измерено						-	-

5. Начертить расчетные графики  $i(t)$  и  $u_C(t)$  при замыкании и размыкании ключа.

#### Порядок выполнения работы

1. В соответствии с номером варианта выбрать элементы цепи и собрать схему рис. 9.1. На вход исследуемой цепи подать постоянное напряжение  $U = 5 В$  (использовать источник постоянного регулируемого напряжения). Синхронизацию электронного ключа осуществить напряжением прямоугольной формы амплитудой 5-10 В частотой 1 кГц (использовать блок переменного напряжения).

2. Подключая осциллограф к активному сопротивлению  $r$  и индуктивному элементу  $L$ , снять с экрана осциллографа экспериментальные графики, соответственно, тока  $i(t)$  и напряжения  $u_L(t)$  при включении и выключении ЭК. Убедиться в экспоненциальном характере переходного процесса и с учетом масштабов времени  $m_t$ , напряжения  $m_u$  и тока  $m_i = m_u/r$  определить основные показатели переходного процесса, занести их в табл. 9.2.

3. В соответствии с номером варианта выбрать элементы цепи и собрать схему рис. 9.3. На вход цепи подать постоянное напряжение  $U = 5 \text{ В}$  (использовать источник постоянного регулируемого напряжения). Синхронизацию ЭК осуществить напряжением прямоугольной формы амплитудой  $5\text{-}10 \text{ В}$  частотой  $1 \text{ кГц}$  (использовать блок переменного напряжения).

4. Подключая осциллограф к активному сопротивлению  $r$  и конденсатору  $C$ , переснять с экрана осциллографа экспериментальные графики, соответственно, тока  $i(t)$  и напряжения  $u_C(t)$  при включении и выключении ЭК. Убедиться в экспоненциальном характере переходного процесса и с учетом масштабов вычислить основные показатели переходного процесса, занести их в табл. 9.4.

5. Провести сравнительный анализ переходных процессов в цепях  $r, L$  и  $r, C$ . Объяснить возможное расхождение теоретических и экспериментальных характеристик процесса.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Каков физический смысл постоянной времени цепи, как она определяется для цепи  $r, L$  и цепи  $r, C$ ?

2. Сформулируйте законы коммутации, используемые при анализе переходных процессов.

3. Какова теоретическая и практическая продолжительности переходного процесса?

4. Запишите выражения и приведите графики изменения тока  $i(t)$  и напряжения  $u_L(t)$  при заряде и разряде индуктивного элемента.

5. Запишите выражения и приведите графики изменения тока  $i(t)$  и напряжения  $u_C(t)$  при заряде и разряде емкостного элемента.

6. Можно ли получить в исследуемых цепях колебательный характер переходного процесса путем подбора параметров элементов?

7. Какое влияние оказывает на переходный процесс сопротивление  $r_1$  при замыкании и размыкании ЭК?

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

##### *Исследование переходных процессов в последовательной цепи постоянного тока с $r, L, C$ – элементами*

Цель работы: исследование переходного процесса и анализ его количественных показателей в последовательном контуре  $r, L, C$ ; экспериментальная проверка расчетных графиков зависимостей напряжений и тока от времени.

Пояснения к работе

Исследуемая электрическая цепь (рис. 10.1) содержит последовательный контур  $r, L, C$ , электронный ключ (ЭК), источник регулируемого постоянного напряжения  $U$  и разрядный резистор  $r_1$ . Для электронного ключа используется внутренняя синхронизация, что обеспечивает его коммутацию с частотой сети  $f = 50 \text{ Гц}$  (период  $T = 0.02 \text{ с}$ ).

Половину периода длительностью  $0.1 \text{ с}$  ЭК находится в замкнутом состоянии. За это время в контуре  $r, L, C$  происходит переходный процесс, в результате которого конденсатор заряжается до напряжения источника  $U$ . Параметры цепи заряда подобраны таким образом, что переходный процесс является периодическим и затухает раньше, чем произойдет размыкание ключа ЭК. Вторую половину периода ключ ЭК разомкнут, и в цепи происходит разряд конденсатора через индуктивность и резисторы  $r$  и  $r_1$ . Сопротивление  $r_1$  подобрано таким образом, что этот процесс носит аperiодический характер. Его время затухания также меньше длительности разомкнутого состояния ключа ЭК, и к началу следующего периода коммутации ЭК конденсатор полностью разряжен и новый процесс повторяется при нулевых начальных условиях.

Таким образом, оба переходных режима (заряд и разряд) повторяются с частотой сети и могут наблюдаться на экране осциллографа при условии, что развертка последнего также синхронизирована с сетью.

При включении цепи  $r, L, C$  на постоянное напряжение  $U$  (рис. 10.1, ключ ЭК замыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением, составленным на основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений:

$$i \cdot r + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U.$$

Решение этого уравнения относительно тока и напряжения на конденсаторе имеет вид:

$$i = i_{np} + i_{св}, \quad u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв},$$

где  $i_{np}$ ,  $i_{св}$ ,  $u_{Cnp}$ ,  $u_{Cсв}$  – принужденные и свободные составляющие тока и напряжения на конденсаторе.

Принужденные значения величин после коммутации:  $i_{np} = 0$ ,  $u_{Cnp} = U$ .

Вид свободных составляющих  $i_{св}$  и  $u_{Cсв}$  зависит от характера переходного процесса и определяется соотношением параметров элементов  $r, L, C$ .

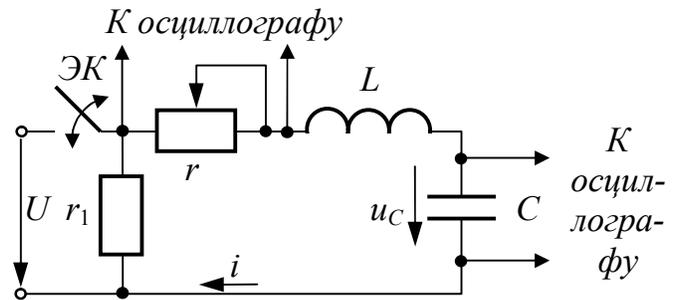


Рис. 10.1. Схема исследования переходных процессов в цепи  $r, L, C$

Колебательный характер наступает при условии  $r < r_{кр}$  (где  $r_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$  – критическое сопротивление), что соответствует комплексным сопряженным корням характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{r}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2} = -\delta \pm j\omega_0,$$

где  $\delta = \frac{r}{2L}$  – коэффициент затухания;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{r}{2L}\right)^2} \text{ – угловая частота свободных колебаний.}$$

Для рассматриваемого случая свободные составляющие определяются по формулам:

$$u_{Cв}(t) = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi_u), \quad i_{св}(t) = Be^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi_i),$$

где  $A, B, \psi_u, \psi_i$  – постоянные интегрирования.

Постоянные интегрирования определяются с помощью законов коммутации и законов Кирхгофа из выражений для свободных составляющих и их производных при  $t = 0_+$ . Для схемы (рис. 10.1)  $\psi_u = \arctg \frac{\omega_0}{\delta}$ ,  $\psi_i = 0$ ,

$$A = -\frac{U}{\sin \psi_u}, \quad B = \frac{U}{\omega_0 L}.$$

После подстановки постоянных интегрирования выражения для напряжения на конденсаторе и тока имеют вид:

$$u_C(t) = U - \frac{U}{\sin \psi_u} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi_u), \quad i(t) = \frac{U}{\omega_0 L} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t).$$

Напряжение на индуктивности:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = -\frac{U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t - \psi_u).$$

Ток заряда и напряжение на конденсаторе совершают колебания около своих установившихся значений (рис. 10.2а).

Величина  $\delta$  характеризует скорость затухания колебаний, а величины  $\omega_0$  и  $\psi_u$  – частоту и начальную фазу свободных колебаний, соответственно.

При замыкании цепи  $r, L, C$  на резистор  $r_1$  (рис. 10.1 ключ ЭК размыкается) переходный процесс описывается дифференциальным уравнением, составленным на основании второго закона Кирхгофа для мгновенных значений:

$$i \cdot (r + r_1) + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = 0. \quad (10.1)$$

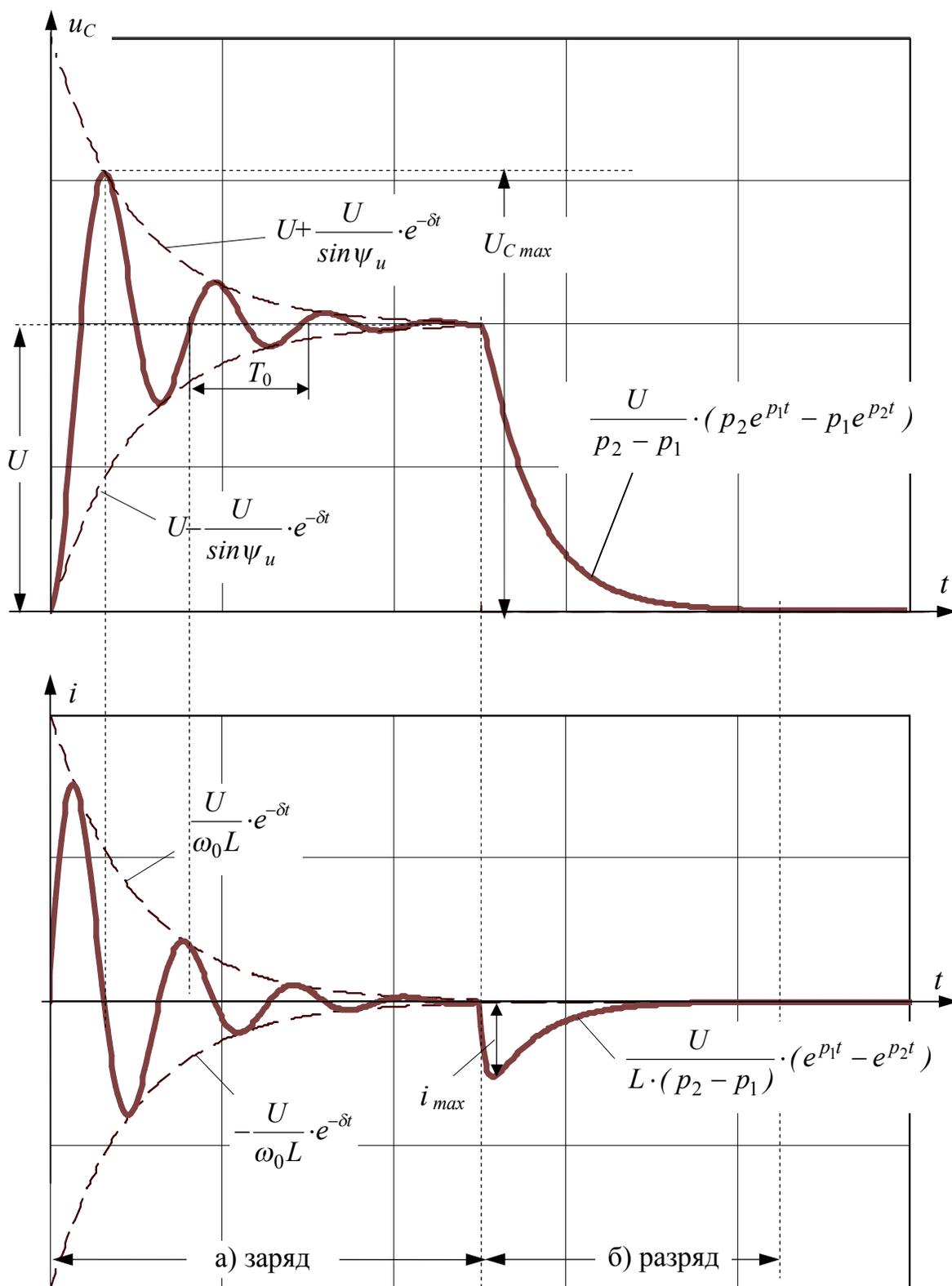


Рис. 10.2 Графики зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при заряде и разряде цепи  $r, L, C$

Параметры цепи при разряде подобраны таким образом, что  $r + r_1 > r_{кр}$  и характер процесса становится апериодическим, что соответствует двум вещественным отрицательным корням характеристического уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{r + r_1}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r + r_1}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Решение уравнения (10.1) относительно тока и напряжения на конденсаторе имеет вид:

$$i = i_{np} + i_{св}, \quad u_C = u_{Cnp} + u_{Cсв},$$

где  $i_{np} = 0, u_{Cnp} = 0$ .

В соответствии с законами коммутации  $u_C(0_+) = U, i(0_+) = 0$ ; тогда окончательно:

$$u_C(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} = \frac{U}{p_2 - p_1} \left( p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t} \right),$$

$$i(t) = B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} = \frac{U}{L(p_2 - p_1)} \left( e^{p_1 t} - e^{p_2 t} \right).$$

Напряжение на индуктивности:

$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = \frac{U}{p_2 - p_1} \left( p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t} \right).$$

В этом случае напряжение на конденсаторе с течением времени плавно уменьшается от начального значения  $u_C(0) = U$  до нуля, а ток, являясь отрицательным, сначала возрастает по абсолютной величине, а затем стремится к нулевому значению (рис. 10.2б).

Практическая продолжительность переходного процесса определяется промежутком времени, за которое свободная составляющая уменьшается до величины, которая может составлять  $1 \div 5\%$  наибольшего значения.

#### Домашняя подготовка к работе

1. В соответствии с номером варианта и данными табл. 10.1 для схемы рис. 10.1 выполнить расчет переходного процесса при включении цепи  $r, L, C$  на постоянное напряжение  $U = 5 \text{ В}$  (замкнутое состояние ключа ЭК). Получить числовые выражения для  $u_C(t)$  и  $i(t)$ .

Таблица 10.1. Параметры элементов для исследования

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r, \text{ Ом}$	40	50	50	50	50	70	75	75	50	50
$r_1, \text{ Ом}$	700	800	1000	510	510	700	510	510	510	300
$L, \text{ мГн}$	50	70	70	70	70	80	100	90	90	70
$C, \text{ мкФ}$	1	1	0.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5

2. Для схемы рис. 10.1 выполнить расчет переходного процесса при разряде конденсатора  $C$  через последовательно включенные индуктивность  $L$  и

резисторы  $r$  и  $r_1$  (разомкнутое состояние ключа ЭК). Получить числовые выражения для  $u_C(t)$  и  $i(t)$ .

3. Заполнить расчетную часть табл. 10.2 показателей переходного процесса при разряде и заряде конденсатора  $C$  в схеме (рис. 10.1).

Таблица 10.2. Результаты расчёта и эксперимента

№ п/п	Исследуемые показатели переходного процесса	Расчет	Эксперимент
1	2	3	4
1. Заряд конденсатора $0 < t < 0.01 c$			
1.1	Критическое сопротивление контура $r_{кр}, Ом$		
1.2	Коэффициент затухания $\delta = r/(2L), 1/c$		
1.3	Максимальное напряжение $U_{Cmax}, B$		
1.4	Частота свободных колебаний $\omega_0, рад/c$		
1.5	Период свободных колебаний $T_0, c$		
1.6	Практическая длительность процесса $t_{nn}, c$		
2. Разряд конденсатора $0.01 < t < 0.02c$			
2.1	Корни характеристического уравнения $p_1$ и $p_2, 1/c$		-
2.2	Максимальный ток разряда конденсатора $i_{max}, mA$		
2.3	Практическая длительность процесса $t_{nn}, c$		

#### Порядок выполнения работы

1. В соответствии с номером варианта выбрать номера элементов цепи (табл. 10.1) и собрать на наборном поле стенда УИЛС рабочую схему (рис. 10.1). В качестве сопротивления  $r$  использовать блок переменных сопротивлений стенда.

2. Включить осциллограф и с его помощью установить напряжение регулируемого источника  $U = 5 B$ .

3. Поочередно подключая осциллограф к конденсатору  $C$  и резистору  $r_1$ , переснять с экрана графики зависимостей  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при заряде и разряде конденсатора. С учетом масштабов времени  $m_t$ , напряжения  $m_u$  и тока  $m_i = \frac{m_u}{r}$

определить основные сравниваемые показатели процесса и заполнить табл. 10.2.

4. Сравнить расчетные и экспериментальные графики  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при разряде конденсатора, построив их в одной системе координат.

5. Изменяя величину сопротивления  $r$ , получить на экране осциллографа и переснять график  $u_C(t)$  или  $i(t)$ , соответствующий граничному режиму переходного процесса (между апериодическим и колебательным). Опытным путем определить величину критического сопротивления цепи  $r_{кр}$  и занести в табл. 10.2.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Каков физический и математический смысл критического сопротивления цепи  $r, L, C$  и как его определить через параметры элементов?

2. Объясните с физической точки зрения возможность установления в произвольной  $r, L, C$  цепи токов и напряжений аperiodического и колебательного характера.

3. Запишите выражения и приведите графики изменения тока  $i(t)$  и напряжения  $u_C(t)$  при аperiodическом характере заряда конденсатора в цепи  $r, L, C$ , включенной на постоянное напряжение  $U$ .

4. Запишите выражения и приведите графики  $u_C(t)$  и  $i(t)$  при колебательном характере заряда конденсатора.

5. Как определяется практическая продолжительность аperiodического и колебательного процессов?

6. Пользуясь рассчитанными при домашней подготовке выражениями тока  $i(t)$  при заряде и разряде конденсатора, получить выражения для напряжений на резисторе  $r$  и на индуктивности  $L$ .

7. Каким является механический аналог для электрической цепи  $r, L, C$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

### *Исследование нелинейных цепей постоянного тока*

Цель работы: исследование вольт-амперных характеристик нелинейных элементов и проверка графических методов расчета электрических цепей, содержащих нелинейные резисторы.

#### Пояснения к работе

Расчеты электрических цепей с нелинейными сопротивлениями построены на использовании графических методов преобразования цепей на основе законов Кирхгофа. Путем постепенной замены последовательно или параллельно соединенных элементов можно получить вольт-амперные характеристики всей цепи и её отдельных участков, а уже по ним определить токи и напряжения в ветвях.

При последовательном соединении нелинейных элементов (рис. 11.1а) получение эквивалентной вольт-амперной характеристики (ВАХ) выполняется путем графического сложения напряжений каждого из элементов при одних значениях тока (рис. 11.1б).

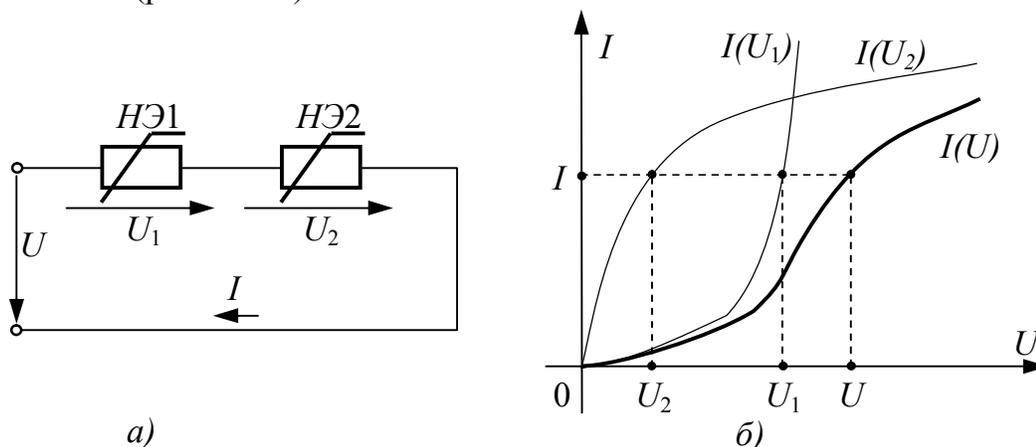


Рис. 11.1. Последовательное соединение нелинейных элементов

При параллельном соединении нелинейных элементов (рис. 11.2а) получение эквивалентной вольт-амперной характеристики (ВАХ) выполняется путем графического сложения токов каждого из элементов при одних значениях напряжения (рис. 11.2б).

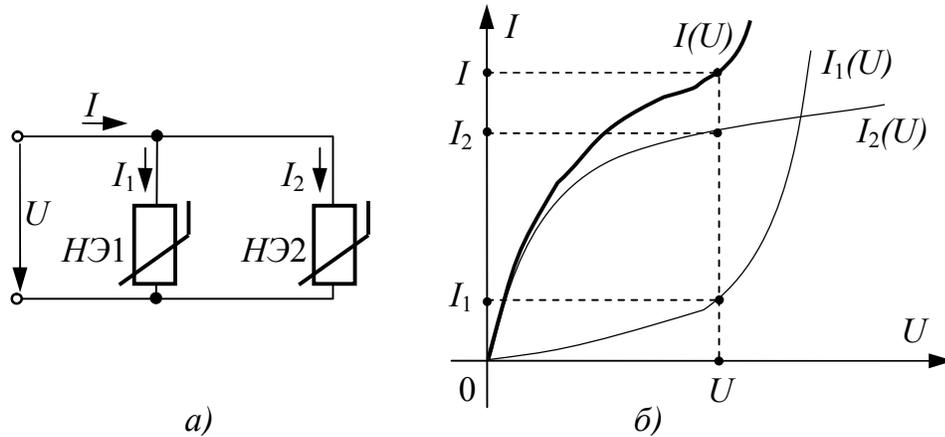


Рис. 11.2. Параллельное соединение нелинейных элементов

Для построения результирующей ВАХ смешанного соединения нелинейных элементов (рис. 11.3а) на первом этапе выполняется построение промежуточной ВАХ параллельно соединенных элементов  $(I_2+I_3)(U_{23})$ . Затем промежуточная ВАХ складывается с ВАХ нелинейного элемента, находящегося в общей части цепи, как при последовательном соединении (рис. 11.3б).

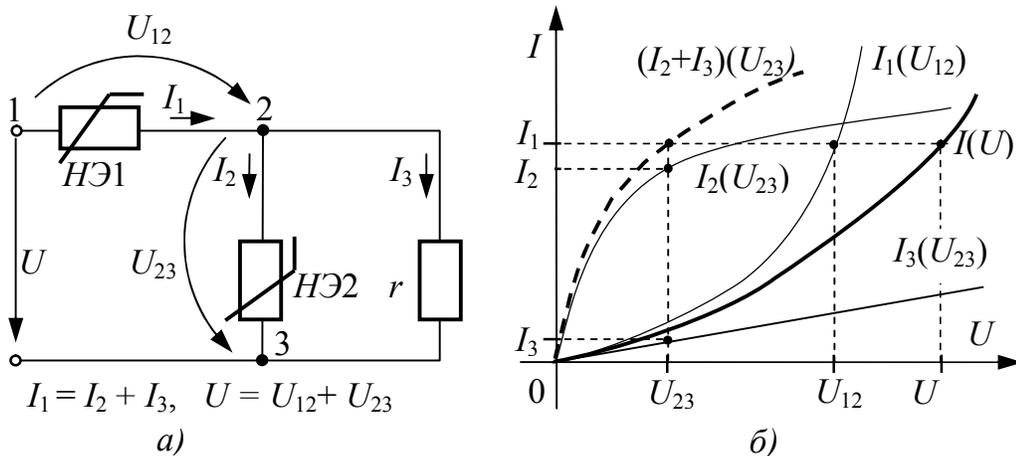


Рис. 11.3. Смешанное соединение нелинейных элементов

Расчет нелинейной электрической цепи (рис. 11.4а) методом двух узлов приведен на рис. 11.4б. На первом этапе выполняется построение вольт-амперной характеристики каждой ветви рассматриваемой цепи  $I_1(U_{ab})$ ,  $I_2(U_{ab})$  и  $I_3(U_{ab})$ . При этом используются выражения, полученные с помощью второго закона Кирхгофа:

$$U_{ab} = E_1 - U_1, \quad U_{ab} = U_2, \quad U_{ab} = E_3 - I_3 r.$$

Затем параллельно соединенные первая и третья ветви заменены эквивалентной с вольт-амперной характеристикой  $(I_1+I_3)(U_{ab})$ , полученной путем графического сложения токов. На основании первого закона Кирхгофа

$I_1 + I_3 = I_2$ , который выполняется в точке пересечения вольт-амперных характеристик  $(I_1 + I_3)(U_{ab})$  и  $I_2(U_{ab})$ , определены значения тока  $I_2$  и узлового напряжения  $U_{ab}$ . По полученному значению  $U_{ab}$  с помощью вольт-амперных характеристик  $I_1(U_{ab})$  и  $I_3(U_{ab})$  определены токи  $I_1$  и  $I_3$ .

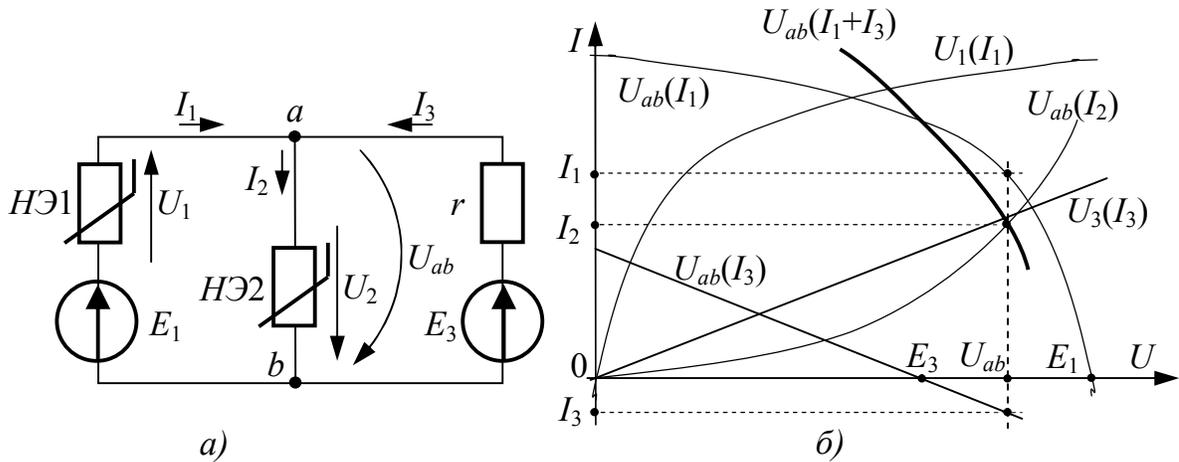


Рис. 11.4. Расчет нелинейной цепи методом двух узлов

#### Домашняя подготовка к работе

1. Начертить схемы и изучить графические методы расчета нелинейных электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединениях нелинейных элементов.

2. В соответствии с номером варианта и данными табл. 11.1 начертить рабочую схему (рис. 11.5) и записать порядок её расчета.

Таблица 11.1. Параметры элементов для исследования

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$r, \text{ Ом}$	200	300	400	250	350	450	200	300	400	250
$E_1, \text{ В}$	20	-10	-	-8	20	-	18	20	-	20
$E_2, \text{ В}$	12	-	12	20	-	20	20	-	20	16
$E_3, \text{ В}$	-	20	20	-	12	-10	-	-8	16	-

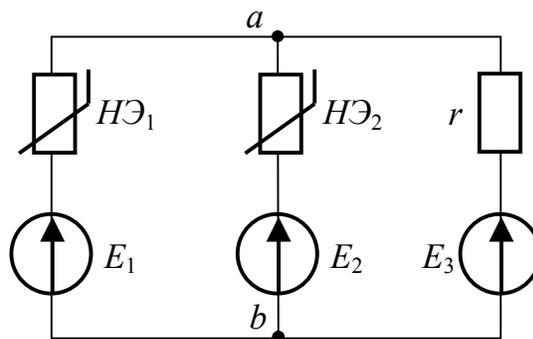


Рис. 11.5. Рабочая схема для исследования нелинейной цепи методом двух узлов

## Порядок выполнения работы

1. Используя регулируемый источник постоянного тока, снять вольт-амперные характеристики нелинейных элементов  $HЭ_1$  и  $HЭ_2$ . Напряжение изменять от 0 до 20 В с интервалом 2 В. Данные занести в табл. 11.2 и вычислить статические сопротивления элементов.

Таблица 11.2. Результаты эксперимента и расчёта

№ п/п	Нелинейный элемент $HЭ_1$			Нелинейный элемент $HЭ_2$		
	$U, В$	$I, mA$	$r_{cm}, Ом$	$U, В$	$I, mA$	$r_{cm}, Ом$
1.						
2.						
.....						

2. По данным табл. 11.2 в одной системе координат построить зависимости статических сопротивлений нелинейных элементов  $HЭ_1$  и  $HЭ_2$  от напряжения источника.

3. В одной системе координат построить вольт-амперные характеристики нелинейных элементов и результирующие расчетные ВАХ цепи при последовательном и параллельном соединениях нелинейных элементов. Результаты расчета внести в табл. 11.3.

4. В одной системе координат построить вольт-амперные характеристики нелинейных элементов, резистивного элемента  $r$  и результирующую расчетную ВАХ цепи при смешанном соединении элементов. Резистивный элемент  $r$  (табл. 11.1) следует подключить по указанию преподавателя параллельно нелинейному элементу  $HЭ_1$  или  $HЭ_2$ . Результаты расчета внести в табл. 11.3.

4. Используя регулируемый источник постоянного напряжения, снять вольт-амперные характеристики цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединениях элементов. Результаты измерений внести в табл. 11.3. Сравнить экспериментальные  $I_s$  и расчетные  $I_p$  значения токов при одних и тех же значениях напряжения источника.

Таблица 11.3. Результаты расчёта и эксперимента

№ п/п	Соединение элементов								
	последовательное			параллельное			смешанное		
	$U, В$	$I_p, mA$	$I_s, mA$	$U, В$	$I_p, mA$	$I_s, mA$	$U, В$	$I_p, mA$	$I_s, mA$
1.									
2.									
.....									

5. Используя экспериментально полученные вольт-амперные характеристики нелинейных элементов  $HЭ_1$  и  $HЭ_2$ , в соответствии с номером варианта и данными табл. 11.1 рассчитать методом двух узлов токи в ветвях рабочей схемы (рис. 11.5). Результаты расчета внести в табл. 11.4.

Таблица 11.4. Результаты расчёта и эксперимента методом двух узлов

	$U_{ab}, B$	$I_1, mA$	$I_2, mA$	$I_3, mA$
Вычислено				
Измерено				

6. Собрать схему (рис. 11.5) с параметрами, взятыми из табл. 11.1 в соответствии с номером варианта, и измерить узловое напряжение и токи в ветвях. Результаты измерений внести в табл. 11.4 и сопоставить их с расчетом.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Какие цепи называются нелинейными?
2. Что называется вольт-амперной характеристикой нелинейного элемента?
3. Как определяются статические и дифференциальные сопротивления нелинейных элементов? Поясните их физический и геометрический смысл.
4. Как изменяется статическое сопротивление лампы накаливания с ростом напряжения?
5. Назовите области применения исследуемых в работе нелинейных элементов.
6. Приведите пример графического метода расчета нелинейных цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединениях элементов.
7. Объясните метод двух узлов применительно к расчету нелинейных электрических цепей.

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

##### *Исследование разветвленных цепей с вентилями, содержащих источники постоянного и синусоидального напряжений*

Цель работы: экспериментальная проверка напряжений и токов в цепях с полупроводниковым диодом, рассчитанных с использованием метода кусочно-линейной аппроксимации.

#### Пояснения к работе

Сущность метода кусочно-линейной аппроксимации заключается в том, что реальную характеристику нелинейного элемента заменяют ломаной линией, состоящей из нескольких отрезков прямых. Для каждого линейного участка характеристики расчет выполняют с помощью методов, применяемых в линейных цепях. Для перехода к расчету на следующем линейном участке находят значения величин, соответствующих концу предыдущего линейного участка. Для каждого отрезка прямой нелинейный элемент в схеме представляют в виде последовательно соединенных пассивного линейного элемента и источника ЭДС.

Наиболее просто метод кусочно-линейной аппроксимации реализуется в резистивных электрических цепях с вентилями, вольт-амперные характеристики которых чаще всего представляют в виде отрезков прямых.

В качестве примера рассмотрим схему рис. 12.1 с двумя источниками, тремя резисторами и полупроводниковым диодом.

Пусть:  $u(t) = 7.2 \cdot \sin \omega t$  В,  $E = 2.4$  В,  $r_1 = r_2 = 6$  Ом,  $r_3 = 12$  Ом.

Вольт-амперная характеристика диода представлена на рис. 12.2 (идеальный диод). Используя метод кусочно-линейной аппроксимации, требуется определить токи в ветвях схемы и напряжение на диоде. Рассматривая работу схемы (рис. 12.1) приходим к заключению, что возможны два режима и соответственно два интервала ее работы: при закрытом диоде ( $i_d = 0, u_d < 0$ ) и при открытом диоде ( $i_d > 0, u_d = 0$ ).

На рис. 12.3 представлена схема замещения цепи для первого интервала времени, когда диод  $VD$  открыт и используется линейный участок 0-1 его вольт-амперной характеристики (рис. 12.2). В этой схеме диод имеет нулевое сопротивление. Полученную цепь, в которой действуют источники синусоидального и постоянного напряжений, целесообразно, рассчитать методом наложения:

$$i_1^I = \frac{U_m}{r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}} \cdot \sin \omega t + \frac{E}{r_2 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3}} \cdot \frac{r_3}{r_1 + r_3} = 0.72 \cdot \sin \omega t + 0.16 \text{ А},$$

$$i_2^I = i_d^I = \frac{U_m}{r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}} \cdot \frac{r_3}{r_1 + r_3} \cdot \sin \omega t + \frac{E}{r_2 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3}} = 0.48 \cdot \sin \omega t + 0.24 \text{ А},$$

$$i_3^I = \frac{U_m}{r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}} \cdot \frac{r_2}{r_2 + r_3} \cdot \sin \omega t - \frac{E}{r_2 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3}} \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_3} = 0.24 \cdot \sin \omega t - 0.08 \text{ А},$$

$$u_d^I = 0.$$

Полученные выражения справедливы для тех значений  $\omega t$ , которые удовлетворяют условию  $i_d^I(\omega t) \geq 0$ , то есть  $0.48 \cdot \sin \omega t + 0.24 \geq 0$  или  $\sin \omega t \geq -0.5$ .

Последнему неравенству соответствуют два диапазона  $0 \leq \omega t \leq \omega t_1$  и  $\omega t_2 \leq \omega t \leq 360^\circ$ , причём  $\omega t_1 = 210^\circ$ ,  $\omega t_2 = 330^\circ$ .

На рис. 12.4 представлена схема замещения цепи для второго интервала времени, когда диод  $VD$  заперт и используется участок 0-2 его вольт-амперной характеристики (рис. 12.2). В этой схеме диод имеет бесконечно большое сопротивление (разрыв цепи). Токи в ветвях определяются только источником синусоидального напряжения:

$$I_2^{II} = 0, \quad i_1^{II} = i_3^{II} = \frac{U_m}{r_1 + r_3} \cdot \sin \omega t = 0.4 \text{ А},$$

$$u_d^{II} = E + i_3^{II} \cdot r_3 - i_2^{II} \cdot r_2 = 4.8 \cdot \sin \omega t + 2.4 \text{ В}.$$

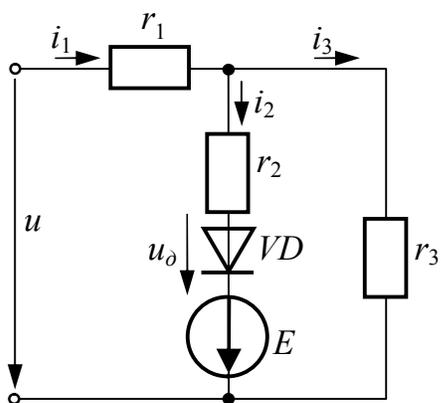


Рис. 12.1

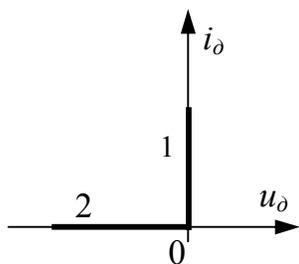


Рис. 12.2

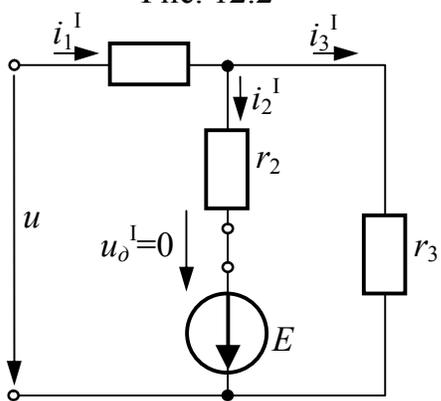


Рис. 12.3

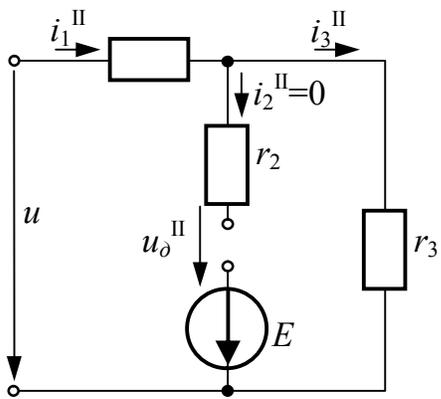


Рис. 12.4

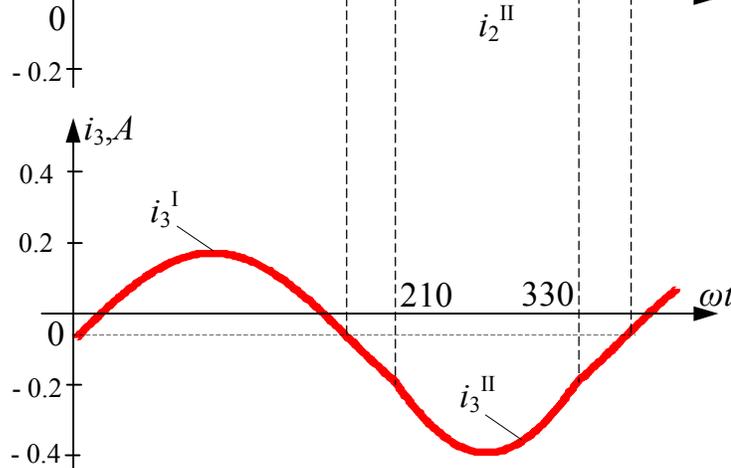
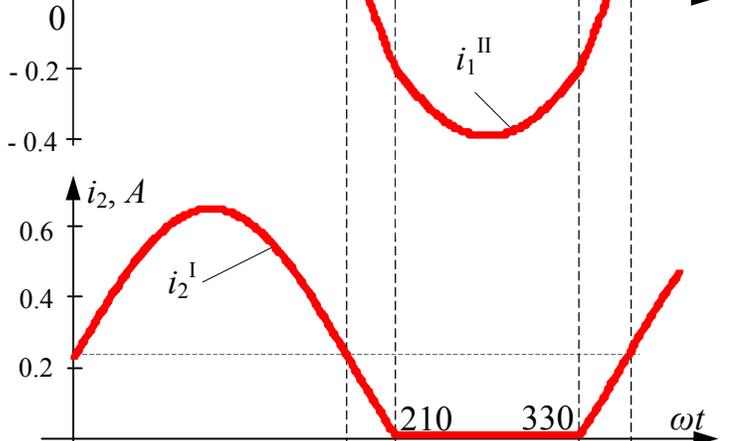
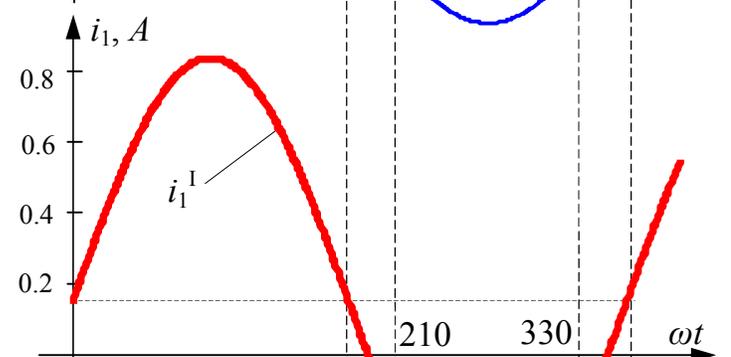
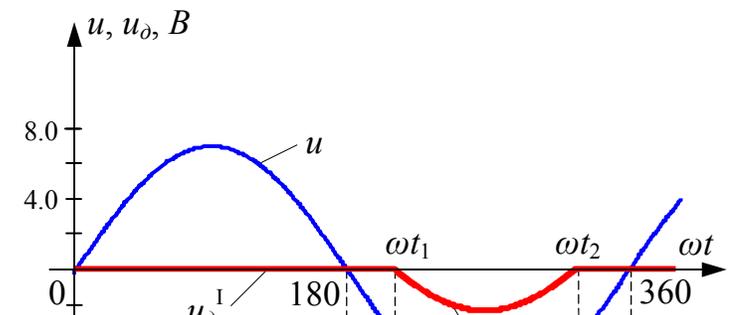


Рис. 12.5

Полученные выражения справедливы для тех значений  $\omega t$ , которые удовлетворяют условию  $u_{\delta}^{\text{II}} \leq 0$ , то есть  $4.8 \cdot \sin \omega t + 2.4 \leq 0$  или  $\sin \omega t \leq -0.5$

Последнему неравенству соответствует один диапазон  $\omega t_1 \leq \omega t \leq \omega t_2$ .

По результатам расчета на рис. 12.5 представлены графики токов в ветвях, напряжение на диоде и входное напряжение сети.

Действующие и средние значения несинусоидальных токов определяются, соответственно, через интегралы вида

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt.$$

Приближенно они могут быть рассчитаны непосредственно по графикам в соответствии с выражениями:

$$I = \sqrt{\frac{\sum i_n^2}{n}}, \quad I_{cp} = \frac{\sum i_n}{n},$$

где  $n$  – число участков, на которые разбивается период функции ( $n = 18 \div 36$ );  
 $i_n$  – значение тока на  $n$ -ом участке.

Тип диода выбирают по величине среднего значения тока в прямом направлении и по максимальному обратному напряжению в закрытом состоянии.

В нашем примере  $I_{\delta cp} = 0.441 \text{ A}$ ,  $I_{\delta} = 0.494 \text{ A}$ ,  $U_{\delta max} = 2.4 \text{ B}$ .

#### Домашняя подготовка к работе

1. В соответствии с номером варианта вычертить рабочую схему, используя рис. 12.6.

2. Используя заданные значения параметров схемы (табл. 12.1), рассчитать мгновенные значения токов во всех ветвях электрической цепи и напряжения на диоде.

Таблица 12.1. Параметры элементов для исследования

Параметры электрической цепи	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_m, \text{ B}$	20	18	16	20	18	16	12	18	20	18
$E, \text{ B}$	10	10	8	12	9	8	8	8	10	8
$r_1, \text{ Ом}$	200	100	150	75	100	150	75	100	75	100
$r_2, \text{ Ом}$	--	--	200	100	300	300	300	200	200	300
$r_3, \text{ Ом}$	300	300	300	200	200	100	--	--	100	200

3. Построить расчетные графики токов  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  и напряжения  $u_{\delta}(t)$ .

4. Рассчитать средние и действующие значения токов в ветвях, а также максимальное обратное напряжение на диоде. Результаты расчета занести в табл. 12.2.

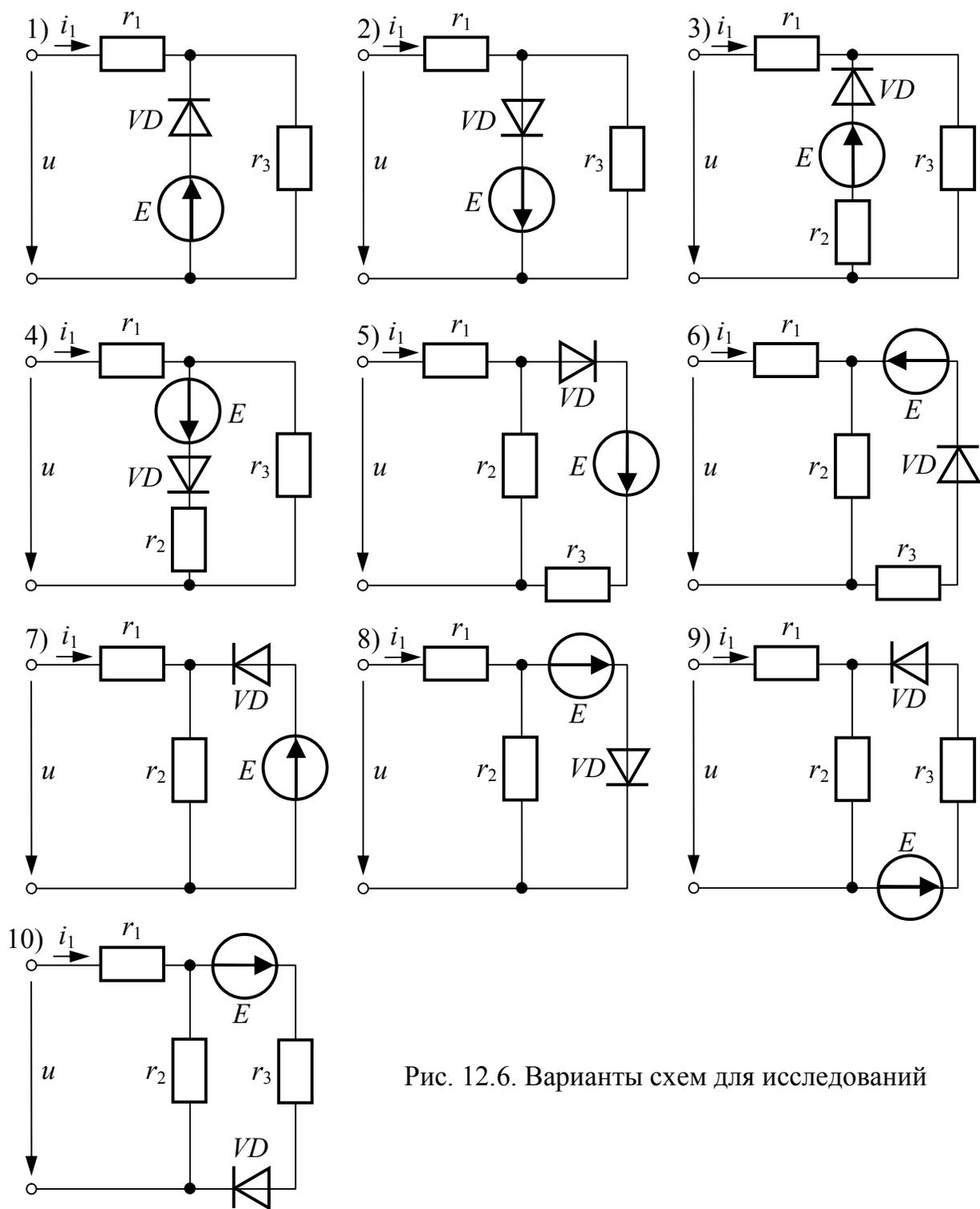


Рис. 12.6. Варианты схем для исследований

Таблица 12.2. Результаты расчёта и эксперимента

Сравниваемые показатели	$I_{1cp}$ , <i>мА</i>	$I_1$ , <i>мА</i>	$I_{2cp}$ , <i>мА</i>	$I_2$ , <i>мА</i>	$I_{3cp}$ , <i>мА</i>	$I_3$ , <i>мА</i>	$U_{dmax}$ , <i>В</i>
Расчет							
Эксперимент							

## Порядок выполнения работы

1. В соответствии с номером варианта выбрать номера элементов цепи и собрать рабочую схему. В качестве источников энергии использовать источник регулируемого постоянного напряжения и источник регулируемого синусоидального напряжения частотой 50 Гц. В каждой ветви предусмотреть возможность включения амперметра.

2. Подключая поочерёдно осциллограф параллельно резисторам  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ , переснять с его экрана графики зависимости напряжений от времени, которые пропорциональны зависимостям  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$ . С учетом масштабов времени  $m_t$  и тока  $m_i = m_u/r$ , ( $m_u$  – масштаб напряжения) сравнить экспериментально полученные мгновенные токи в ветвях с расчетными зависимостями  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$ .

3. Переснять с экрана осциллографа график зависимости мгновенного значения напряжения на диоде от времени и сравнить его с расчетным значением  $u_d(t)$ . Величину максимального обратного напряжения на диоде внести в табл. 12.2.

4. С помощью цифрового измерительного прибора типа Щ-4313 измерить действующие и средние значения токов в ветвях схемы ( рис. 12.6 ) и внести их в табл. 12.2. При измерении средних значений токов переключатель прибора поставить в положение “Постоянный ток”, а при измерении действующих токов – “Переменный ток”.

5. Сравнить расчетные и экспериментальные значения токов в табл. 12.2 и сделать соответствующие выводы.

## Вопросы для самоконтроля.

1. В чем состоит сущность метода кусочно-линейной аппроксимации?
2. Приведите другие возможные методы расчета напряжений и токов исследуемой цепи с вентилем.
3. Нарисуйте ВАХ реального и идеального полупроводникового диода.
4. По каким параметрам выбирается полупроводниковый диод?
5. Из каких соображений определяют временные границы интервалов аппроксимации?
6. Как вычисляют действующие и средние значения несинусоидальных напряжений и токов?
7. Приборы каких систем могут быть использованы для измерений действующих и средних значений несинусоидальных токов.

**Исследование однофазных выпрямителей синусоидального тока**

Цель работы: изучение и экспериментальное исследование однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей, в том числе содержащих емкостный фильтр.

## Пояснения к работе

Выпрямитель – это устройство, служащее для преобразования переменного тока в постоянный. Основным элементом выпрямителей является полупроводниковый диод, обладающий односторонней проводимостью. На рис. 13.1а приведены схема однополупериодного выпрямителя и временная диаграмма тока в его нагрузке. Схема двухполупериодного выпрямителя (мостовая) и временная диаграмма тока в его нагрузке  $R_H$  показаны на рис. 13б.

Основными величинами, характеризующими работу выпрямителей, являются: среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке (нулевая гармоника)  $U_{но}$ , его действующее значение  $U_H$ ; среднее значение выпрямленного тока нагрузки  $I_{но}$ , его действующее значение  $I_H$ , активная мощность нулевой гармоники  $P_o$ , активная мощность нагрузки  $P_H$ , коэффициент эффективности выпрямителя  $\eta$ .

Эти величины определяются следующими выражениями:

$$U_{но} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_H(\omega t) d(\omega t), \quad I_{но} = \frac{U_{но}}{R_H}, \quad U_H = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_H^2(\omega t) d(\omega t)}, \quad U_H = \frac{U_H}{R_H},$$

$$P_o = U_{но} \cdot I_{но}, \quad P_H = U_H \cdot I_H, \quad \eta = \frac{P_o}{P_H}.$$

Заметим, что приведенные соотношения дают: для однополупериодного выпрямителя  $U_{но} = 0.45U$ ,  $U_H = U/\sqrt{2}$ , а для двухполупериодного  $U_{но} = 0.9U$ ,  $U_H = U$ , где  $U$  – действующее значение напряжения питания.

Для повышения эффективности выпрямителя и снижения пульсаций напряжения и тока нагрузки применяют сглаживающие фильтры. Схема однополупериодного выпрямителя с ёмкостным фильтром, а также зависимости напряжения сети и напряжения на нагрузке от времени показаны на рис. 13.1б. В этой схеме напряжение и ток нагрузки рассчитывают с помощью метода кусочно-линейной аппроксимации, и они описываются выражениями:

$$u_H(\omega t) = u_C(\omega t) = \begin{cases} U_m \cdot \sin(\omega t) & \text{if } \omega t_1 < \omega t < \omega t_2 \\ U_m \cdot \sin(\omega t_2) \cdot e^{-\frac{\omega t - \omega t_2}{\tau}} & \text{if } \omega t_2 < \omega t < \omega t_3 \end{cases}, \quad i(\omega t) = \frac{u_H(\omega t)}{R_H},$$

где  $U_m$  – амплитуда напряжения питания;

$\omega t_1$  и  $\omega t_2$  – моменты отпираания и запираания диода, соответственно;

$\tau = R_H C$  – постоянная времени цепи разряда конденсатора.

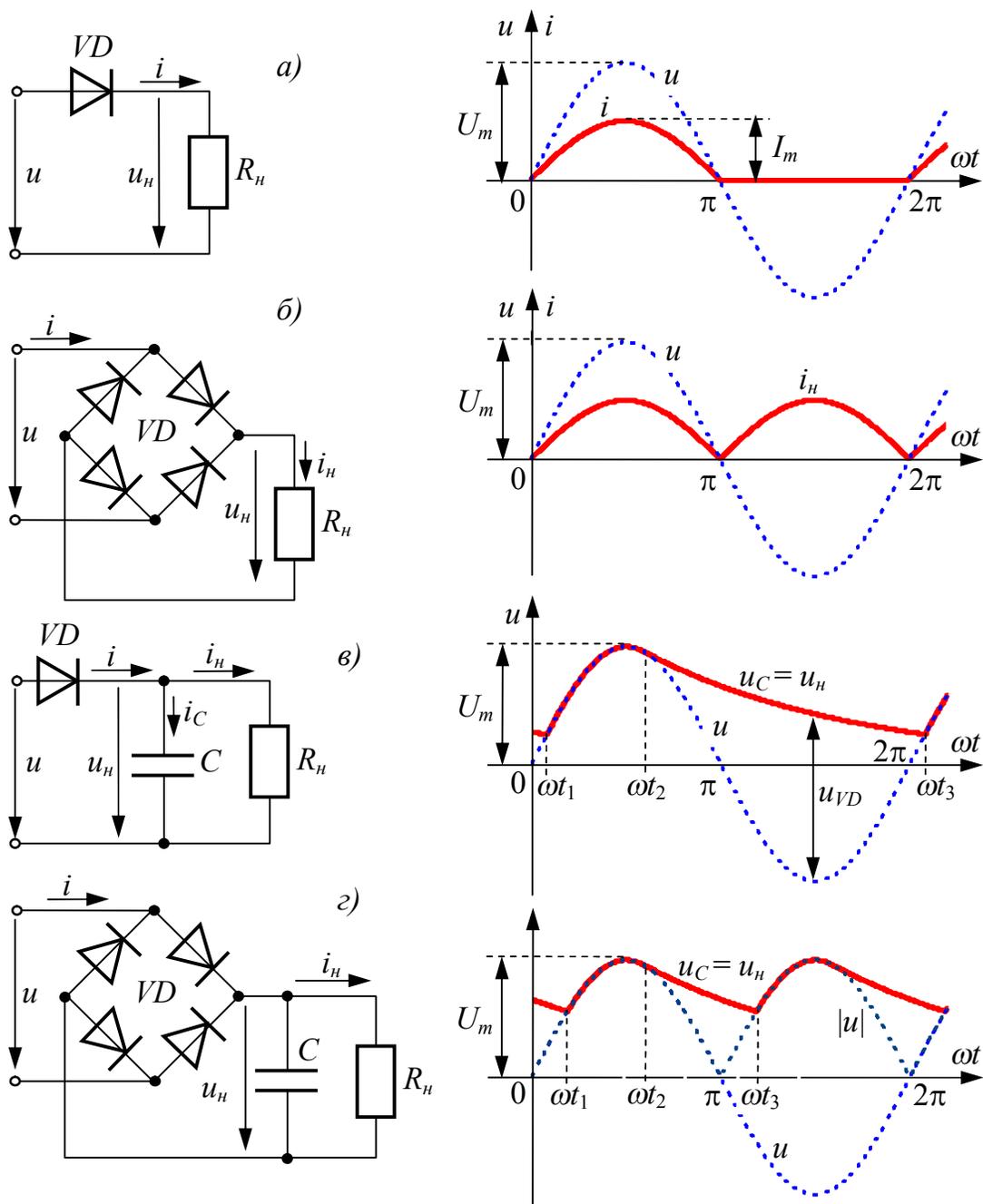


Рис. 13.1. Схемы однофазного выпрямления переменного тока

Момент запирающего диода  $\omega t_2$  определяется из условия равенства нулю его тока:  $\omega t_2 = \pi + \arctg(-\omega\tau)$ . Моменты отпирающего диода  $\omega t_1$  и  $\omega t_3 = \omega t_1 + 2\pi$  можно определить из условия равенства нулю напряжения на нем:

$$\sin \omega t_1 = \sin \omega t_2 \cdot e^{-\frac{\omega t_1 - \omega t_2 + 2\pi}{\omega\tau}}$$

Следует заметить, что последнее равенство является трансцендентным и определение  $\omega t_3$  и остальных показателей выпрямителя является непростою задачей. С целью упрощения расчетов прибегнем к использованию

коэффициента схемы  $K_c$ , являющегося отношением  $U_{но}/U$ . Анализ приведенных выше формул показывает, что  $K_c$  зависит только от величины  $\omega\tau$ . Многократные расчеты позволили выяснить зависимость  $K_c(\omega\tau)$  и аппроксимировать ее формулой

$$K_c = 1.22 + 0.00228\omega\tau - 0.812 \cdot e^{-\frac{\omega\tau}{5}}. \quad (13.1)$$

Для мостовой схемы выпрямления с конденсатором (рис. 13.1г)  $\omega t_2$  определяется точно так же, как и для однополупериодной, а  $\omega t_1$  и  $\omega t_3 = \omega t_1 + \pi$  – по формуле

$$\sin \omega t_1 = \sin \omega t_2 \cdot e^{-\frac{\omega t_1 - \omega t_2 + \pi}{\omega\tau}}.$$

Расчет показателей мостовой схемы также целесообразно производить с помощью  $K_c$ . Однако здесь формула зависимости  $K_c(\omega\tau)$  иная, а именно

$$K_c = 1.33 + 0.00086\omega\tau - 0.443 \cdot e^{-\frac{\omega\tau}{5}}. \quad (13.2)$$

#### Домашняя подготовка к работе

1. В соответствии с номером варианта (табл. 13.1) рассчитать основные величины, характеризующие работу однофазного однополупериодного выпрямителя без фильтра (рис. 13.1а) и занести их в табл. 13.2.

Таблица 13.1. Параметры схемы и напряжение питания ( $f = 50 \text{ Гц}$ )

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, \text{В}$	30	25	20	15	32	27	22	18	16	21
$R_n, \text{Ом}$	1000	800	700	510	1000	800	700	510	510	700
$C, \text{мкФ}$	20	25	30	35	20	25	30	35	35	35

2. Рассчитать  $\omega\tau = 2\pi f R_n C$  и по (13.1) определить  $K_c$ ,  $U_{но} = K_c U$  и другие величины, предусмотренные в табл. 13.2 для однофазного однополупериодного выпрямителя с фильтром (рис. 13.1в) и туда же их занести.

3. В соответствии с номером варианта (табл. 13.1) рассчитать основные величины, характеризующие работу мостового однофазного выпрямителя без фильтра (рис. 13.1б) и занести их в табл. 13.2.

4. Зная  $\omega\tau$ , по (13.2) определить  $K_c$ ,  $U_{но} = K_c U$  и другие величины, предусмотренные в табл. 13.2 для однофазного мостового выпрямителя с фильтром (рис. 13.1г) и туда же их занести.

Таблица 13.2. Результаты расчетов и экспериментального исследования схем выпрямления

Величины, характеризующие выпрямитель	Однополупериодный				Мостовой выпрямитель			
	Без конденс.		С конденс.		Без конденс.		С конденс.	
	Расчет	Эксп.	Расчет	Эксп.	Расчет	Эксп.	Расчет	Эксп.
$U_{н0}, В$								
$I_{н0}, МА$								
$U_n, В$			-	-				-
$I_n, МА$			-	-			-	-
$P_o, Вт$							-	
$P_n, Вт$			-	-			-	-
$\eta$			-	-			-	-

#### Порядок выполнения работы

1. В соответствии с номером варианта выбрать номера элементов цепи и собрать схему однополупериодного выпрямителя без конденсатора (рис. 13.1а). Предусмотреть возможность измерения тока нагрузки. Установить требуемую величину напряжения питания. С экрана осциллографа снять график  $u_n(t)$ .

2. Измерить средние и действующие значения напряжения и тока нагрузки, результаты измерений занести в табл. 13.2. Определить остальные величины, характеризующие работу выпрямителя.

3. Схему п.1 дополнить требуемым конденсатором (рис. 13.1в). С экрана осциллографа снять график  $u_n(t)$ .

4. Повторить п.2.

5. Собрать однофазную мостовую схему выпрямления без конденсатора (рис. 13.1б) и выполнить работу, указанную в п.1 и п.2.

6. Схему п.5 дополнить требуемым конденсатором (рис. 13.1г) и выполнить работу, указанную в п.1 и п.2. Сделать вывод о влиянии конденсатора на основные характеристики выпрямителя.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Какие устройства являются выпрямителями?
2. Какие схемы выпрямления исследуются в данной работе?
3. Какие основные величины характеризуют работу выпрямителя?
4. Как можно уменьшить пульсации тока в нагрузке выпрямителя?
5. Приборами какой системы можно измерить средние и действующие значения выпрямленного напряжения и тока?
6. Какое влияние на основные характеристики выпрямителя оказывает конденсатор, включенный параллельно нагрузке?

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

#### *Исследование пассивных четырехполюсников*

Цель работы: определение коэффициентов четырехполюсника по опытам холостого хода и короткого замыкания, расчет параметров Т- или П-схем замещения и характеристических параметров, экспериментальная проверка его основных уравнений в форме  $A$ .

### Пояснения к работе

Четырехполюсник – это часть цепи, имеющая два входных и два выходных зажима. Основные уравнения, связывающие первичные и вторичные напряжения и токи, имеют вид (форма  $A$ )

$$\underline{U}_1 = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2.$$

Здесь коэффициенты  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$  и  $\underline{D}$  являются в общем случае комплексными числами и связаны между собой соотношением:

$$\underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} = 1.$$

Коэффициенты четырехполюсника можно вычислить по его входным сопротивлениям, определяемым в режимах холостого хода и короткого замыкания. Вычисление коэффициентов производится по формулам:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x} \cdot \underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_{2k}(\underline{Z}_{1x} - \underline{Z}_{1k})}};$$

$$\underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2k}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1x}}; \quad \underline{D} = \underline{A} \frac{\underline{Z}_{2k}}{\underline{Z}_{1k}},$$

где  $\underline{Z}_{1x} = \frac{U_{1x}}{I_{1x}} = Z_{1x} \cdot e^{j\varphi_{1x}}$  – комплекс входного сопротивления четырехполюсника в режиме холостого хода при питании его со стороны первичных зажимов;

$\underline{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = Z_{1k} \cdot e^{j\varphi_{1k}}$  – комплекс входного сопротивления четырехполюсника в режиме короткого замыкания при питании его со стороны первичных зажимов;

$\underline{Z}_{2k} = \frac{U_{2k}}{I_{2k}} = Z_{2k} \cdot e^{j\varphi_{2k}}$  – комплекс входного сопротивления четырехполюсника в режиме короткого замыкания при питании его со стороны вторичных зажимов.

Так как пассивный четырехполюсник характеризуется тремя независимыми коэффициентами, то его можно заменить трехэлементной эквивалентной схемой. Основными эквивалентными схемами четырехполюсника являются Т-образная и П-образная.

Связь между параметрами этих схем и коэффициентами четырехполюсника выражается соотношениями:

для Т-образной схемы

$$\underline{Z}_{1T} = \frac{A-1}{C}; \quad \underline{Z}_{2T} = \frac{D-1}{C}; \quad \underline{Z}_{0T} = \frac{1}{C};$$

для П-образной схемы

$$\underline{Z}_{1\Pi} = \frac{\underline{\square}}{D-1}; \quad \underline{Z}_{2\Pi} = \frac{\underline{\square}}{\underline{\square}-1}; \quad \underline{Z}_{0\Pi} = \underline{\square}.$$

Характеристические параметры четырехполюсника могут быть рассчитаны по его коэффициентам

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\frac{A \cdot B}{C \cdot D}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\frac{D \cdot B}{C \cdot A}}; \quad th \underline{\Gamma} = \sqrt{\frac{B \cdot C}{A \cdot D}};$$

$$e^{2\underline{\Gamma}} = \frac{1 + th \underline{\Gamma}}{1 - th \underline{\Gamma}} = M e^{j\delta}; \quad a = \frac{1}{2} \ln M; \quad b = \delta \pm 2\pi;$$

$$\underline{\Gamma} = a + jb$$

или по опытам холостого хода и короткого замыкания

$$\underline{Z}_{1C} = \sqrt{\underline{Z}_{1\Pi} \underline{Z}_{10}}; \quad \underline{Z}_{2C} = \sqrt{\underline{Z}_{2\Pi} \underline{Z}_{20}}; \quad th \underline{\square} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}}{\underline{Z}_{1\Pi}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{20}}{\underline{Z}_{2\Pi}}}.$$

Исследуемый четырехполюсник собирается в виде сложной цепи, состоящей из катушек индуктивности, резисторов и емкостей.

Стенды УИЛС не оборудованы приборами, позволяющими определять аргументы комплексных сопротивлений (имеются только вольтметры и амперметры). Поэтому для их определения в каждом эксперименте нужно выполнить дополнительный опыт. В данной работе для дополнительного опыта целесообразно использовать включаемый последовательно с входом четырехполюсника ёмкостный элемент с сопротивлением  $X_c \approx (1 \div 1.5)X$ , где  $X$  – входное реактивное сопротивление в основном эксперименте. Если величина  $X_c$  известна, то можно рассчитать  $X$ , а значит и аргумент  $\varphi$  комплекса входного сопротивления. Действительно, в основном эксперименте полное входное сопротивление

$$Z_v = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (14.1)$$

а в дополнительном опыте

$$Z_{vd} = \sqrt{R^2 + (X - X_c)^2} \quad (14.2)$$

Совместное решение (14.1) и (14.2) дает:

$$X = \frac{Z_v^2 - Z_{vd}^2 + X_c^2}{2X_c}, \quad (14.3)$$

причем знак  $\varphi$  определяется по характеру изменения  $Z_{vd}$  по сравнению с  $Z_v$ , а величина – по формуле

$$\varphi = \arcsin \frac{X}{Z_v} \quad (14.4)$$

## Домашняя подготовка к работе

1. Используя рис. 14.1, в соответствии с номером варианта вычертить Вашу схему четырехполюсника. Параметры схем рис. 14.1: катушка  $L_2 - r_2 = 21 \text{ Ом}$ ,  $L_2 = 0.69 \text{ Гн}$ ; конденсатор  $C_1 = 5 \text{ мкФ}$ ; резисторы –  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 400 \text{ Ом}$ ;  $R_{01} = 51 \text{ Ом}$ ;  $R_{10} = 1000 \text{ Ом}$ .

2. По заданным параметрам схемы рассчитать комплексы входных сопротивлений четырехполюсника в режимах холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ) при питании со стороны первичных зажимов ( $Z_{1x}$ ,  $Z_{1k}$ ), а также в режимах ХХ и КЗ при питании со стороны вторичных зажимов ( $Z_{2x}$ ,  $Z_{2k}$ ). Результаты занести в табл. 14.1.

3. Рассчитать коэффициенты четырехполюсника  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и проверить взаимосвязь их между собой.

4. Определить параметры схемы замещения: для четных вариантов Т-образной, для нечетных П-образной.

5. Рассчитать характеристические параметры четырехполюсника  $Z_{1C}$ ,  $Z_{2C}$  и  $\Gamma$ .

6. По заданным величинам напряжения на первичных зажимах  $U_1$  и сопротивления нагрузки  $R_n$ , включенного на вторичные зажимы (табл. 14.2), рассчитать первичный ток.

Таблица 14.1. Результаты расчета и экспериментального определения входных сопротивлений четырехполюсника

Напряже- ние подведено к зажимам	Ре- жим	$Z_v$ , Ом, расч. по схеме	Осн. экспер.		Дополн. опыт			Вычислено					
			$U$ , $B$	$I$ , $mA$	$U$ , $B$	$I$ , $mA$	$U_c$ , $B$	$Z_v$ , $Ом$	$Z_{vd}$ , $Ом$	$X_c$ , $Ом$	$X$ , $Ом$	$\varphi$ , $град$	$Z_v$ , $Ом$
1 – 1	ХХ												
	КЗ												
2 - 2	ХХ												
	КЗ												

Таблица 14.2. Напряжение на первичных зажимах и сопротивление нагрузки

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_1, B$	28	25	20	24	23	27	22	18	16	21
$R_n, Ом$	1000	800	700	510	1000	800	700	510	510	700

## Порядок выполнения работы

1. В соответствии с номером варианта собрать схему четырехполюсника, предусмотрев возможность измерения входного напряжения и тока. В качестве  $L_2$ ,  $C_1$ ,  $R_1$  и  $R_3$  использовать устройства блока стационарных элементов, а в качестве  $R_{01}$  и  $R_{10}$  – съемные элементы с номерами 01 и 10, соответственно.

2. Измерить действующие значения напряжения и тока питания, занести их в табл. 14.1 и рассчитать модули входных сопротивлений  $Z_{1x}$ ,  $Z_{1k}$ ,  $Z_{2x}$ ,  $Z_{2k}$

(основной эксперимент). Рекомендуемые значения напряжения питания  $15 \div 30 \text{ В}$  ( $f = 50 \text{ Гц}$ ).

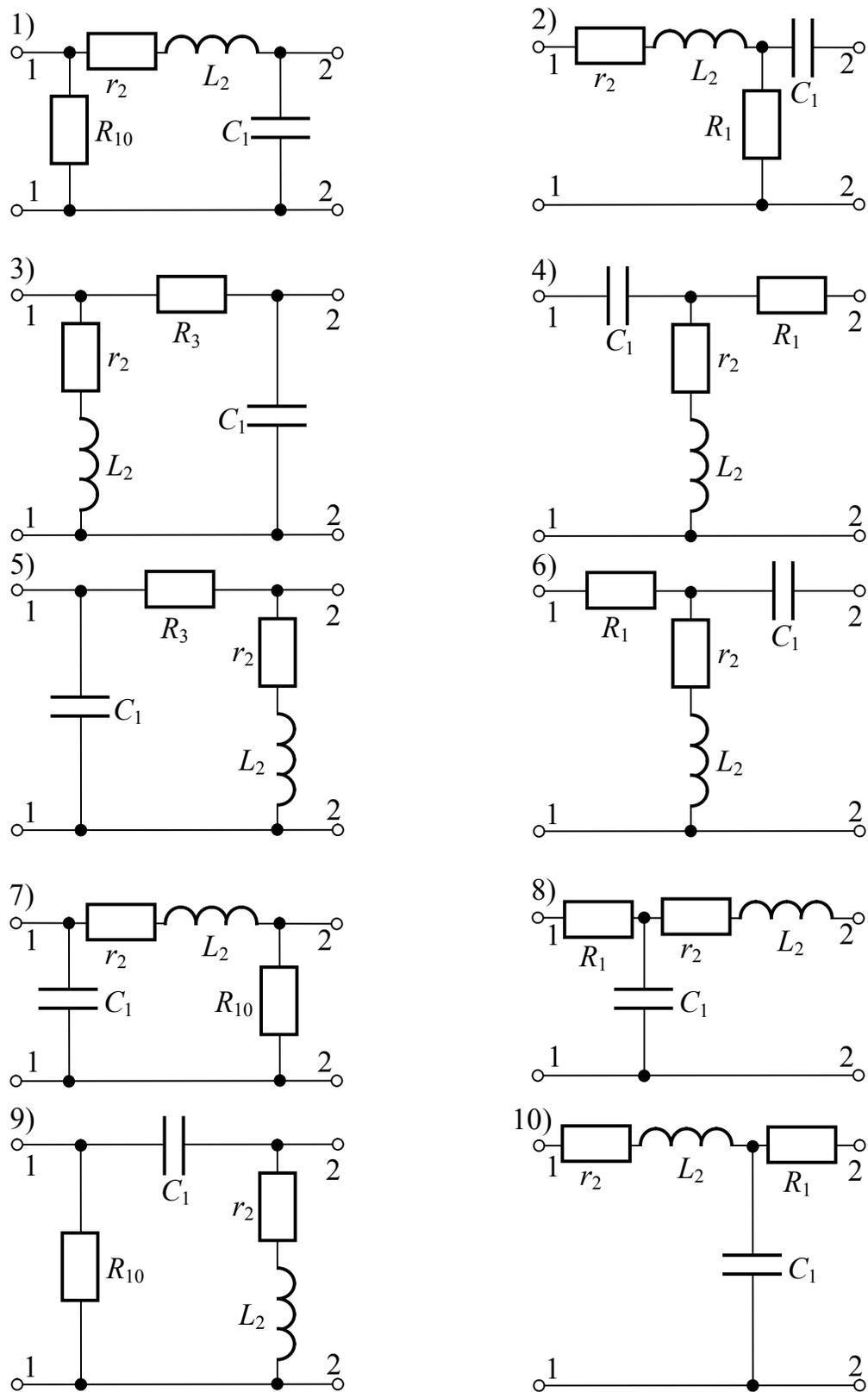


Рис. 14.1. Варианты схем для исследования четырёхполусиков

3. Для определения величины и знака аргументов комплексов  $\underline{Z}_{1x}$ ,  $\underline{Z}_{1k}$ ,  $\underline{Z}_{2x}$ ,  $\underline{Z}_{2k}$  в каждом эксперименте выполнить дополнительный опыт, в котором использовать ёмкостный элемент. Для уточнения сопротивления ёмкостного элемента предусмотреть измерение напряжения на нём. Результаты дополнительного опыта и расчеты по ним в соответствии с (14.3) и (14.4) занести в табл. 14.1. Сравнить результаты расчетов и экспериментов по определению входных комплексных сопротивлений.

4. При питании четырехполюсника со стороны первичных зажимов установить требуемые  $U_1$  и  $R_n$  (табл. 14.2). Измерить первичный ток и сравнить его с расчетным значением.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Что называется четырехполюсником?
2. Напишите основные уравнения четырехполюсника в форме  $A$  как при питании со стороны первичных зажимов, так и со стороны вторичных зажимов.
3. Сколько опытов и каких именно достаточно сделать для определения коэффициентов четырехполюсника?
4. Как связаны между собой коэффициенты четырехполюсника?
5. Как можно определить параметры T- и П-образных схем замещения четырехполюсника, если известны его коэффициенты?
6. Как определяется величина и знак угла сдвига фаз между входным напряжением и током в опытах холостого хода и короткого замыкания?
7. Приведите формулы расчета характеристических параметров четырехполюсника?

#### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

##### *Исследование электрических фильтров*

Цель работы: исследование основных свойств электрических фильтров низких и высоких частот типа К.

#### Пояснения к работе

Любой фильтр характеризуется следующими параметрами: характеристическим сопротивлением  $\underline{Z}_C$  и постоянной передачи  $\underline{\Gamma} = a + jb$  ( $a$  – коэффициент затухания фильтра,  $b$  – его коэффициент фазы). Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются параметрами фильтра и не зависят от величины сопротивления нагрузки, но экспериментально они могут быть определены только при согласованной нагрузке, т.е. когда сопротивление нагрузки  $\underline{Z}_2$  равно характеристическому сопротивлению фильтра  $\underline{Z}_C$ .

При согласованной нагрузке фильтра

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = e^{\Gamma} = e^a \cdot e^{jb}, \quad (15.1)$$

поэтому, зная комплексы напряжений или токов, легко определить коэффициенты  $a$  и  $b$ .

Из выражений (15.1) следует, что

$$a = \ln \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}, \quad b = \psi_1 - \psi_2.$$

Коэффициент  $a$  измеряется в Неперах ( $Hn$ ) ( $a = \ln \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}$ ,  $Hn$ ) или децибелах

(дБ) ( $a = 20 \cdot \lg \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2}$ , дБ), а коэффициент  $b$  измеряется в градусах или радианах.

Угол  $b$  является положительным, если напряжение на входе фильтра  $\underline{U}_1$  опережает напряжение на выходе  $\underline{U}_2$ , в противном случае угол  $b$  считается отрицательным.

Определение фильтрующих свойств тех или иных фильтров сводится к исследованию зависимости их коэффициентов  $a$ ,  $b$  и характеристического сопротивления  $\underline{Z}_C$  от частоты  $\omega$ .

Для низкочастотного (НЧ) П-образного фильтра примерный вид этих зависимостей приведен на рис. 15.1а,б. Угловая частота  $\omega_0 = 2/\sqrt{LC}$  называется угловой частотой среза; она является границей между зонами затухания и пропускания (прозрачности).

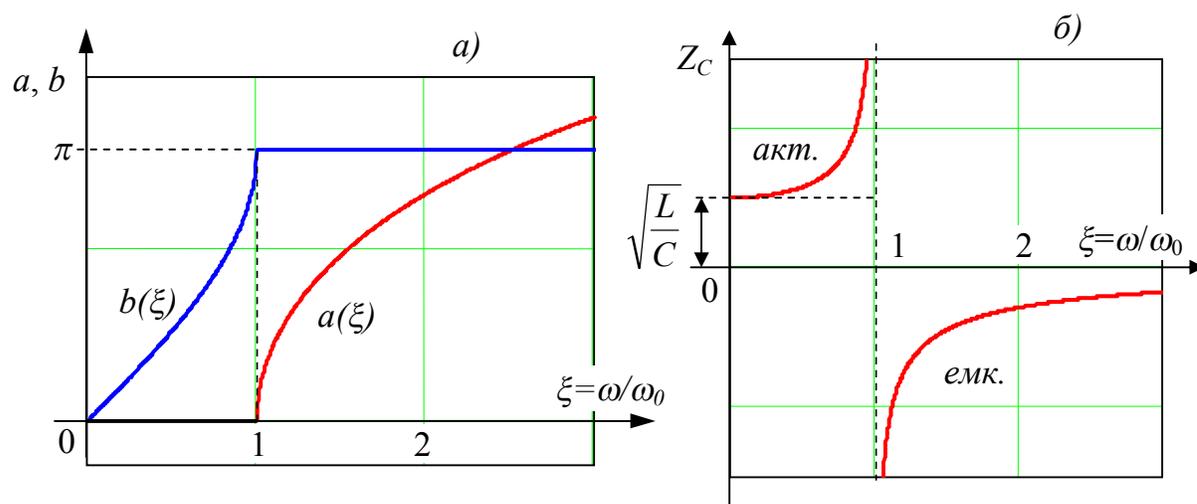


Рис. 15.1. Зависимости коэффициента затухания  $a$ , коэффициента фазы  $b$  и характеристического сопротивления  $Z_C$  от относительной частоты  $\xi$  для низкочастотного П-образного фильтра

Для высокочастотного (ВЧ) Т-образного фильтра  $\omega_0 = 1/(2\sqrt{LC})$  зависимости  $a(\xi)$ ,  $b(\xi)$ ,  $Z_C(\xi)$  приведены на рис. 15.2а,б.

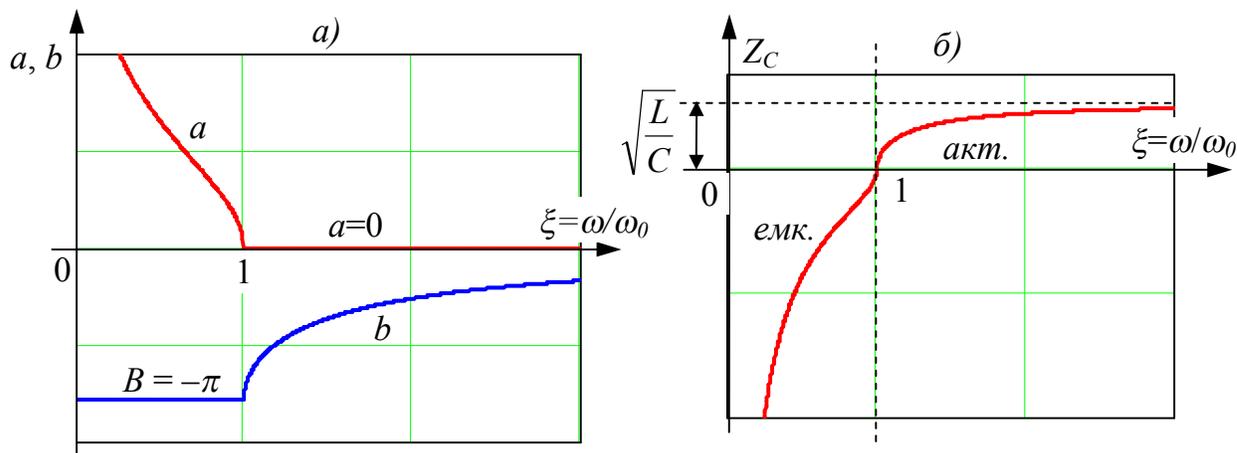


Рис. 15.2. Зависимости  $a(\xi)$ ,  $b(\xi)$  и  $Z_c(\xi)$  для высокочастотного Т-образного фильтра

Так как при практическом использовании фильтра невозможно осуществить его согласование с нагрузкой во всем диапазоне частот, то при несогласованных режимах по кривым  $a(\xi)$  и  $b(\xi)$  уже нельзя судить о величине и фазе напряжения  $\underline{U}_2$  при заданном напряжении  $\underline{U}_1$ .

Для оценки затухания фильтра в таких рабочих условиях, кроме собственного затухания, вводят еще понятие затухания вследствие несогласованности (вносимое затухание четырехполюсника), которое включает в себя собственное затухание  $a$ . Но чаще всего для оценки фильтров в рабочих условиях используют амплитудно-фазовые характеристики, которые представляют собой отношения  $\underline{U}_2/\underline{U}_1$  или  $\underline{I}_2/\underline{I}_1$  в функции частоты. Модули этих отношений являются амплитудно-частотными характеристиками, а их аргументы – фазо-частотными характеристиками.

Возможности стендов УИЛС позволяют исследовать свойства фильтров в основном качественно. С этой целью на их вход подается напряжение прямоугольной формы, для которого ряд Фурье имеет вид

$$u = \frac{4U_o}{\pi} \sin \omega t + \frac{4U_o}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{4U_o}{5\pi} \sin 5\omega t + \dots,$$

где  $U_o$  – максимальное значение прямоугольного напряжения.

Если частота среза ФНЧ будет лежать между  $\omega$  и  $3\omega$ , то первую гармонику он пропустит, причем при согласованной нагрузке без затухания, а остальные не пропустит. Если частота среза ВЧФ будет больше  $\omega$ , то первую гармонику он не пропустит, а 3-ю и остальные высшие пропустит, причем при согласованной нагрузке без затухания.

#### Домашняя подготовка к работе

1. При  $U_o = 10 \text{ В}$  рассчитать действующие значения напряжений 1-й, 3-й, 5-й и 7-й гармоник кривой прямоугольной формы.
2. Вычертить схему П-образного низкочастотного фильтра (ФНЧ).

3. По заданным конструктивным параметрам (табл. 15.1) рассчитать частоту среза  $f_0$  и номинальное сопротивление нагрузки  $R_n$  ФНЧ.

4. Рассчитать характеристическое сопротивление фильтра при  $f = 1 \text{ кГц}$ .

5. Вычертить схему Т-образного высокочастотного фильтра (ФВЧ).

6. По заданным конструктивным параметрам (табл. 15.1) рассчитать частоту среза  $f_0$  и номинальное сопротивление нагрузки  $R_n$  ФВЧ.

7. Рассчитать характеристическое сопротивление фильтра при  $f = 5 \text{ кГц}$ .

Таблица 15.1. Конструктивные параметры фильтров

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ФНЧ	$L, \text{ мГн}$	20	30	50	70	15	15	20	30	50	70
	$C, \text{ мкФ}$	1.5	1	0.5	0.25	2	1.5	1	0.75	0.25	0.25
ФВЧ	$L, \text{ мГн}$	50	20	10	10	5	70	20	30	10	15
	$C, \text{ мкФ}$	0.1	0.25	0.5	0.75	1	0.1	0.25	0.25	0.75	0.5

### Порядок выполнения работы

1. В соответствии с номером варианта собрать П-схему ФНЧ, используя съемные и стационарные элементы стенда. На вход фильтра подать напряжение прямоугольной формы величиной  $10 \text{ В}$  и частотой  $3 \text{ кГц}$ , а на выход включить сопротивление, рассчитанное в п.4 домашней подготовки. Измерить напряжение на выходе фильтра и сравнить его со значением, полученным в п.1 домашней подготовки для 1-й гармоники. С экрана осциллографа снять кривые напряжения на входе и выходе фильтра с обязательным указанием масштабов по напряжению и по току.

2. В соответствии с номером варианта собрать Т-схему ФВЧ, используя съемные и стационарные элементы стенда. На вход фильтра подать напряжение прямоугольной формы величиной  $10 \text{ В}$  и частотой  $3 \text{ кГц}$ , а на выход включить сопротивление, рассчитанное в п.7 домашней подготовки. Измерить напряжение на выходе фильтра и сравнить его со значением, полученным в п.1 домашней подготовки с учётом 3-й, 5-й и 7-й гармоник. С экрана осциллографа снять кривые напряжения на входе и выходе фильтра с обязательным указанием масштабов по напряжению и по току.

3. Проанализировав осциллограммы сделать выводы о выполнении фильтрами их фильтрующих свойств.

### Вопросы для самоконтроля

1. Какие четырехполюсники называются фильтрами?
2. Какими параметрами характеризуется четырехполюсник именно как фильтр?
3. Какой интервал частот называется полосой пропускания фильтра, а какой полосой затухания?
4. Почему на практике нельзя осуществить согласование фильтра с нагрузкой во всем диапазоне частот?

5. Как с помощью векторной диаграммы для исследуемого фильтра можно определить знак угла  $b$ ?

6. На чем основан принцип работы фильтров типа  $K$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

### *Исследование свойств электрических цепей со взаимной индуктивностью*

Цель работы: исследование явления взаимной индукции. Опытное определение взаимной индуктивности и изучение свойств индуктивно связанных катушек при последовательном и параллельном соединениях.

#### Пояснения к работе

Элементы электрической цепи называют индуктивно связанными, когда при протекании тока в одной катушке в других наводится ЭДС взаимной индукции.

Ток  $I_1$  первой катушки создает поток магнитной индукции  $\Phi_{11}$ , часть которого  $\Phi_{12}$ , называемая потоком взаимной индукции, охватывает не только витки первой катушки, но и второй. Если потоки переменные (например, синусоидальные), то в первой катушке наводится ЭДС самоиндукции  $e_{L1}$ , а во второй – ЭДС взаимоиндукции  $e_{M2}$ , равные:

$$e_{L1} = -w_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt}, \quad e_{M2} = -w_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_1}{dt},$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – числа витков первой и второй катушек, соответственно;

$L_1$  – индуктивность первой катушки,  $Гн$ ;

$M_{12}$  – взаимоиндуктивность,  $Гн$ .

При синусоидальных токах и магнитных потоках действующие значения напряжений, обусловленные явлением самоиндукции  $U_{L1}$  и взаимоиндукции  $U_{M2}$ , соответственно, равны:

$$U_{L1} = x_{L1} \cdot I_1, \quad U_{M2} = x_{M12} \cdot I_1,$$

где  $x_{L1} = \omega L_1$  – индуктивное сопротивление первой катушки;

$x_{M12} = \omega M_{12}$  – сопротивление взаимоиндукции,  $Ом$ .

Аналогичные явления имеют место и при протекании тока  $I_2$  по второй катушке. В этом случае во второй катушке создается поток  $\Phi_{22}$ , а его часть  $\Phi_{21}$  охватывает и витки первой катушки. Соответственно, во второй катушке наводится ЭДС самоиндукции  $e_{L2}$ , а в первой – ЭДС взаимоиндукции  $e_{M1}$ :

$$e_{L2} = -w_2 \frac{d\Phi_{22}}{dt} = -L_2 \frac{di_2}{dt}, \quad e_{M1} = -w_1 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_2}{dt},$$

где:  $L_2$  – индуктивность второй катушки,  $Гн$ ;

$M_{21}$  – взаимоиндуктивность,  $Гн$ .

Необходимо отметить, что  $M_{12} = M_{21} = M$ .

При синусоидальном токе действующие значения напряжений на зажимах первой и второй катушек равны:

$$U_{L2} = \omega L_2 \cdot I_2 = x_{L2} \cdot I_2, \quad U_{M1} = \omega M_{21} \cdot I_2 = \omega M \cdot I_2 = x_M \cdot I_2,$$

Взаимную индуктивность и индуктивность катушек можно определить экспериментальным путем. Для этого индуктивно связанные катушки включаем по схеме, приведенной на рис. 16.1. Вольтметры позволяют измерить

$$U_V = U, \quad U_{V1} = U_1, \quad U_{V2} = U_2 = U_M.$$

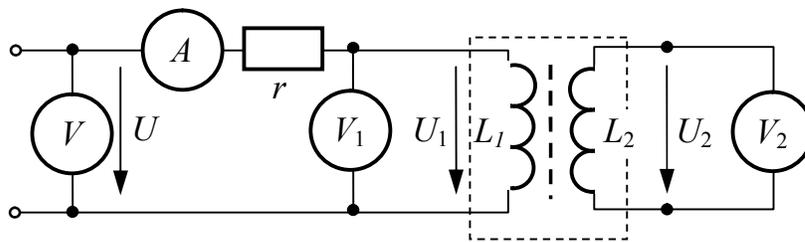


Рис. 16.1 Схема для определения фактических параметров катушек.

Сопротивление  $x_M$  и взаимную индуктивность  $M$  можно определить, измерив величину тока первой катушки и напряжение на второй катушке, индуктивно связанной с первой. Они, соответственно, равны:

$$x_M = \frac{U_M}{I}, \quad M = \frac{x_M}{\omega}.$$

В табл. 2 (см. технические данные стенда УИЛС-2) приведены паспортные параметры катушек  $L_1$  и  $L_2$  и их взаимной индуктивности (именно они используются в данной лабораторной работе). Однако на разных стендах их фактические параметры могут несколько отличаться от паспортных. Особенно это касается активных сопротивлений катушек.

Для определения фактических сопротивлений катушек в схему рис. 16.1 включен резистивный элемент  $r$  с известным сопротивлением и катушки  $L_1$  и  $L_2$ . Тогда фактические параметры катушки  $L_1$  и величины взаимной индуктивности  $M$  можно рассчитать, используя показания амперметра и вольтметров.

Они равны:

$$z = \frac{U}{I}, \quad z_1 = \frac{U_1}{I}, \quad z_M = \frac{U_2}{I}.$$

Принимая во внимание, что

$$z = \sqrt{(r + r_1)^2 + x_1^2}, \quad z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}, \quad (16.1)$$

имеем систему из двух уравнений с неизвестными фактическими сопротивлениями катушки  $L_1$ . Решая систему уравнений (16.1), определим  $r_1$  и  $x_1$ :

$$r_1 = \frac{z^2 - z_1^2 - r^2}{r}, \quad x_1 = \sqrt{z^2 - r_1^2}, \quad (16.2)$$

Если в схеме рис. 16.1 поменять местами катушки  $L_1$  и  $L_2$ , то аналогично можно определить фактические параметры катушки  $L_2$ .

При последовательном соединении индуктивно связанных катушек и протекании тока по ним напряжения на зажимах катушек будут определяться влиянием явлений самоиндукции и взаимной индукции. Комплексы напряжений на зажимах первой  $U_1$  и второй  $U_2$  катушек, соответственно, равны:

$$\underline{U}_1 = (r_1 + jx_1) \cdot \underline{I} \pm jx_M \underline{I},$$

$$\underline{U}_2 = (r_2 + jx_2) \cdot \underline{I} \pm jx_M \underline{I}.$$

Знак плюс соответствует согласному включению катушек, минус – встречному.

Для определения знака напряжения взаимной индукции вводят понятие одноимённых зажимов. Два зажима, принадлежащие двум индуктивно связанным катушкам, называются одноимёнными и обозначаются одинаковыми знаками, если при одинаковом направлении токов относительно этих зажимов магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции складываются.

При последовательном соединении индуктивно связанных катушек имеет место согласное включение, если ток направлен одинаково относительно одноимённых зажимов, в противном случае – встречное включение. Полное сопротивление цепи равно:

$$z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2 \pm 2x_M)^2}.$$

Наличие индуктивной связи приводит к тому, что при согласном включении реактивное сопротивление цепи  $x_{\text{согл}} = x_1 + x_2 + 2x_M$ , а при встречном включении –  $x_{\text{встр}} = x_1 + x_2 - 2x_M$ . Следовательно,  $z_{\text{согл}} > z_{\text{встр}}$ . Последнее означает, что при одинаковом напряжении питания ток в цепи при согласном включении будет меньше, чем при встречном. Это свойство можно использовать при опытном определении величин  $x_M$  и  $M$ , поочередно проделав опыты при согласном и встречном включениях:

$$x_M = \frac{x_{\text{согл}} - x_{\text{встр}}}{4}, \quad M = \frac{x_M}{\omega}.$$

При параллельном соединении индуктивно связанных катушек (рис. 16.3) расчет цепи выполняется в комплексной форме. Уравнения по законам Кирхгофа в комплексной форме имеют вид:

$$\underline{I} - \underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0,$$

$$\underline{I}_1 \underline{z}_1 \pm \underline{I}_2 \underline{z}_M = \underline{U},$$

$$\pm \underline{I}_1 \underline{z}_M + \underline{I}_2 \underline{z}_2 = \underline{U},$$

где  $\underline{z}_1 = r_1 + jx_1$  и  $\underline{z}_2 = r_2 + jx_2$  – комплексные сопротивления катушек  $L_1$  и  $L_2$ ,  $\underline{z}_M = j\omega M$  – комплексное сопротивление взаимной индукции.

### Домашняя подготовка к работе

1. При заданном напряжении питания  $U$  (табл. 16.1) рассчитать ток и напряжения  $U_1$  и  $U_2$  на катушках в схеме рис. 16.2 при согласном и встречном включениях.

Параметры катушек принять равными их паспортным значениям.

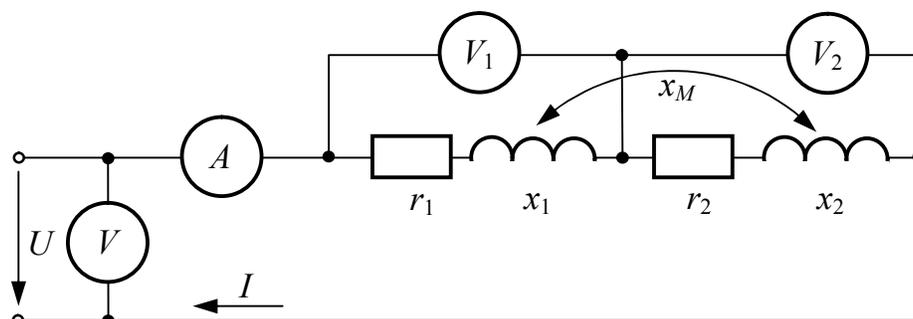


Рис. 16.2 Схема с последовательно включенными индуктивно связанными катушками

Таблица 16.1. Напряжение питания  $U$

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, B$ ( $f=50$ Гц)	16	18	20	22	24	23	17	19	21	25

Результаты расчетов записать в табл. 16.2.

Таблица 16.2. Результаты исследования цепи при последовательном соединении катушек

Исследуемые величины		$U, B$	$I, mA$	$U_1, B$	$U_2, B$	$Z, Ом$	$X, Ом$	$L, Гн$
Согласное включение	Расчет							
	Эксперимент							
Встречное включение	Расчет							
	Эксперимент							

По результатам расчета построить векторные диаграммы как при согласном, так и при встречном включении катушек, показав на них напряжения на всех элементах цепи (на  $r_1$ ,  $L_1$  и т.д.).

2. Как при согласном, так и при встречном включении катушек рассчитать показания амперметров в схеме рис. 16.3 при напряжении на входе, указанном в табл. 16.1. Результаты занести в табл. 16.3.

Таблица 16.3. Результаты исследования цепи при параллельном соединении катушек

Исследуемые величины	$U, B$	$I_1, mA$	$I_2, mA$	$I_3, mA$
Расчет				
Эксперимент				

По результатам расчета построить векторную диаграмму при согласном встречном включении катушек.

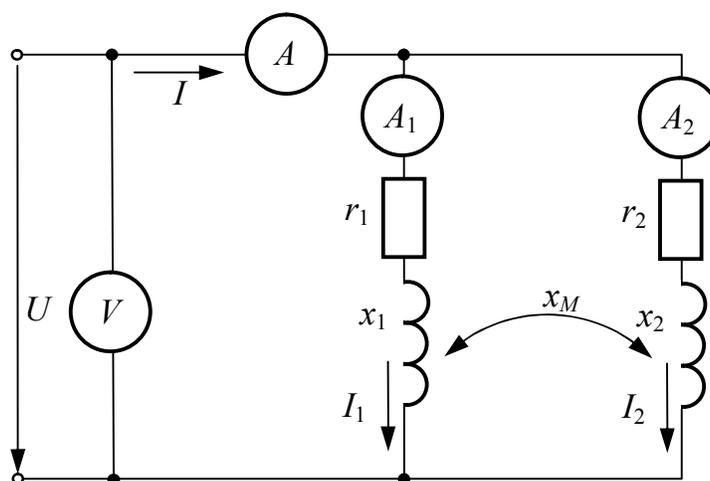


Рис. 16.3 Схема с параллельно включенными индуктивно связанными катушками

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 16.1. На вход подать напряжение  $U = 25 \text{ В}$  от одной из фаз трехфазного источника. Величину добавочного сопротивления принять равной  $r = 100 \text{ Ом}$ . Результаты измерений занести в табл. 16.4. По (16.2) рассчитать фактические параметры первой катушки и взаимную индуктивность.

Таблица 16.4. Фактические параметры катушек

Катушка	Измерено				Вычислено				
	$U, \text{ В}$	$I, \text{ mA}$	$U_k, \text{ В}$	$U_M, \text{ В}$	$r, \text{ Ом}$	$x, \text{ Ом}$	$x_M, \text{ Ом}$	$L, \text{ Гн}$	$M, \text{ Гн}$
$L_1$									
$L_2$									

2. В схеме рис 16.1 поменять местами катушки  $L_1$  и  $L_2$ . Результаты измерений занести в табл. 16.4. Рассчитать фактические параметры второй катушки и взаимную индуктивность.

3. Собрать схему рис. 16.2. На вход подать заданное напряжение (табл.16.1). Провести опыты при согласном и встречном включениях катушек. Результаты занести в табл.16.2. По результатам экспериментов, приведенным в табл. 16.2, рассчитать взаимную индуктивность  $M$ . Сравнить результаты расчетов и экспериментов.

4. Собрать схему рис. 16.3. На вход схемы подать напряжение  $U$ , заданное в табл.16.1. Провести опыты при согласном и встречном включении индуктивно связанных катушек. Показания приборов занести в табл. 16.3.

### Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается физическая сущность явления взаимной индуктивности ?

2. Как определить одноименные зажимы индуктивно связанных катушек?
3. Каковы существуют методы опытного определения взаимной индуктивности?
4. В чем различие согласного и встречного включения индуктивно связанных катушек? Способы их определения.
5. Как определяется напряжения на зажимах индуктивно связанных катушек?
6. Основные свойства индуктивно-связанных элементов при их последовательном соединении.
7. Свойства индуктивно связанных элементов при их параллельном соединении.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17

#### *Исследование свойств трехфазных цепей при несимметричной нагрузке*

**Цель работы:** исследование свойств трехфазных цепей с несимметричной нагрузкой при соединении звездой и треугольником.

#### Пояснения к работе

В трехфазных цепях основными схемами соединения сопротивлений нагрузки являются звезда и треугольник. На рис. 17.1 приведена трехфазная цепь при соединении нагрузки звездой.

Нулевой провод (ключ  $S$  замкнут) используется для выравнивания фазных напряжений нагрузки. При его наличии фазные напряжения на нагрузке равны фазным напряжениям источника.

Рекомендованный порядок расчета трехфазной цепи с нулевым проводом, приведенной на рис. 17.1, следующий:

1. Формируем комплексы фазных напряжений источника:

$$\underline{U}_A = U_\phi, \quad \underline{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_C = U_\phi \cdot e^{j120^\circ}.$$

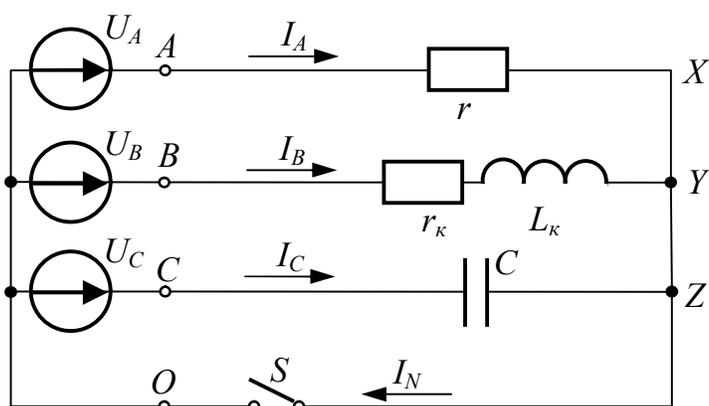


Рис. 17.1 Трехфазная цепь при соединении нагрузки звездой

## 2. Комплексные сопротивления

$\underline{Z}$  и проводимости фаз  $\underline{Y}$ :

$$\underline{Z}_A = r, \quad \underline{Z}_B = r_k + j\omega L_k,$$

$$\underline{Z}_C = -j \frac{1}{\omega C},$$

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}, \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B},$$

$$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}.$$

## 3. Комплексы токов

рассчитываем по формулам:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A \cdot \underline{Y}_A, \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B,$$

$$\underline{I}_C = \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_C.$$

## 4. Комплекс тока в нулевом проводе:

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

Векторная диаграмма приведена на рис. 17.2.

При отсутствии нулевого провода (ключ  $S$  разомкнут) между нулевыми точками звезд трехфазного источника и нагрузки появляется напряжение

нейтрали  $\underline{U}_N$ , равное

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}.$$

Комплексы фазных напряжений на нагрузке, соответственно, равны:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N,$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N,$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N.$$

Комплексы фазных токов рассчитываются по формулам

$$\underline{I}_A = \underline{U}_a \cdot \underline{Y}_A,$$

$$\underline{I}_B = \underline{U}_b \cdot \underline{Y}_B,$$

$$\underline{I}_C = \underline{U}_c \cdot \underline{Y}_C.$$

Векторная диаграмма в этом случае имеет вид рис. 17.3.

На рис. 17.4 приведена схема несимметричной трехфазной цепи,

сопротивления нагрузки которой соединены треугольником.

Фазные напряжения приемника равны линейным  $U_l$  напряжениям трехфазного источника. Рекомендуемый порядок расчета может быть следующий.

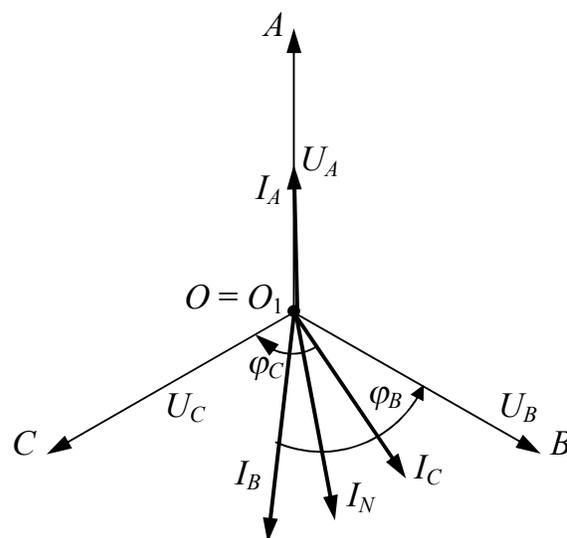


Рис. 17.2. Векторная диаграмма цепи при соединенной нагрузке звездой с нулевым проводом

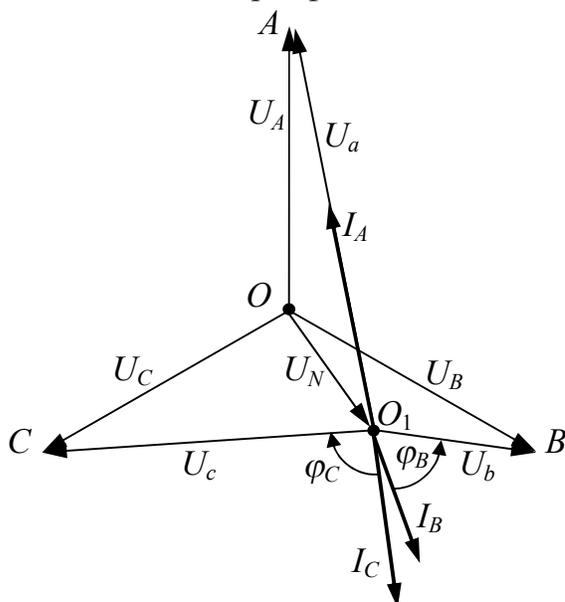


Рис. 17.3. Векторная диаграмма цепи при соединенной нагрузке звездой без нулевого провода

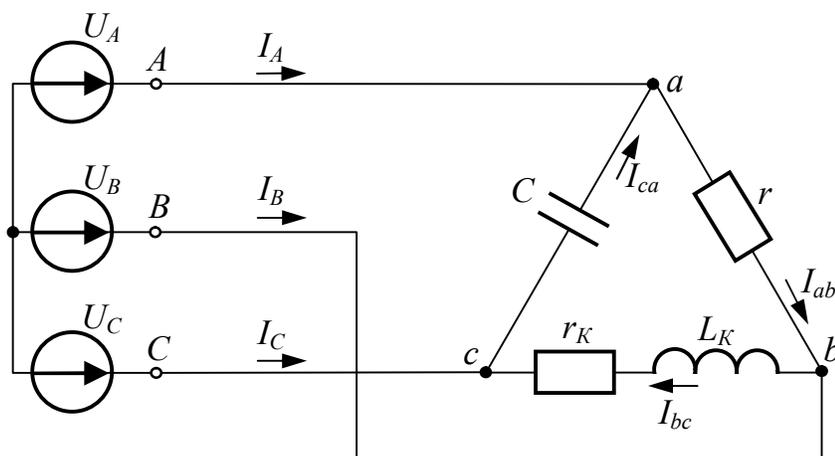


Рис. 17.4. Трехфазная цепь при соединении сопротивлений нагрузки треугольником

1. Формируем комплексы фазных напряжений приемника

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= U_{\text{л}}, \\ \underline{U}_{bc} &= U_{\text{л}} \cdot e^{-j120^\circ}, \\ \underline{U}_{ca} &= U_{\text{л}} \cdot e^{j120^\circ}. \end{aligned}$$

2. Формируем комплексные сопротивления фаз приемника

$$\underline{Z}_{ab} = r, \quad \underline{Z}_{bc} = r_k + j\omega L_k, \quad \underline{Z}_{ca} = -j \frac{1}{\omega C}.$$

3. Рассчитываем комплексы фазных ТОКОВ

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}, \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}, \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

4. Определяем комплексы линейных ТОКОВ

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}, & \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}, \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \end{aligned}$$

Векторная диаграмма трехфазной цепи при соединении сопротивлений нагрузки треугольником имеет вид.

Домашняя подготовка к работе

1. Изучить особенности режимов работы трехфазной цепи при соединении сопротивлений нагрузки звездой.

2. Согласно варианту выбрать величину фазного напряжения источника питания  $U_{\text{ф}}$ , резистивный элемент  $r$  и емкость  $C$  (табл. 17.1) для трехфазной цепи, сопротивления нагрузки которой соединены звездой (рис. 17.1).

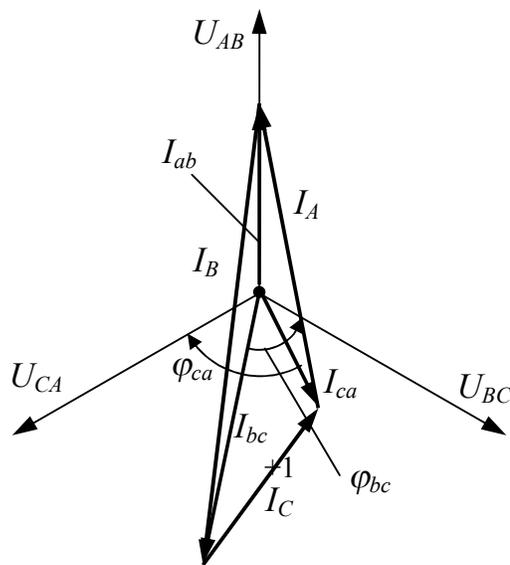


Рис. 17.5 Векторная диаграмма трехфазной цепи при соединении сопротивлений нагрузки треугольником



2. Отключить нейтральный провод (рис. 17.1). Измерить фазные напряжения и токи, а также напряжение смещения нейтрали. Результаты измерений занести в табл. 17.3. Сравнить результаты расчетов и эксперимента.

3. Собрать схему трехфазной цепи, сопротивления нагрузки которой включены треугольником. Измерить фазные напряжения и токи нагрузки, а также линейные токи. Результаты измерений занести в табл. 17.4. Сравнить результаты расчетов и эксперимента.

Таблица 17.4. Результаты исследований трехфазной цепи при соединении сопротивлений приемника треугольником

Исследуемые величины	$U_{ab},$ $B$	$U_{bc},$ $B$	$U_{ca},$ $B$	$I_{ab},$ $mA$	$I_{bc},$ $mA$	$I_{ca},$ $mA$	$I_A,$ $mA$	$I_B,$ $mA$	$I_C,$ $mA$
Расчет									
Эксперимент									

#### Вопросы для самоконтроля

1. Как определяются токи нагрузки трехфазной цепи при наличии нулевого провода?
2. Назначение нулевого провода.
3. Что такое смещение нейтрали и как его рассчитать?
4. Как определяются фазные напряжения и токи трехфазной цепи при соединении сопротивлений приемника звездой без нулевого провода?
5. Чему равны фазные напряжения на нагрузке трехфазной цепи, сопротивления которой включены треугольником?
6. Как рассчитываются фазные и линейные токи при включении сопротивлений приемника треугольником?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рибалко М.П., Есауленко В.О., Костенко В.І. Теоретичні основи електротехніки: Лінійні електричні кола: Підручник. – Донецьк: Новий світ, 2003. – 513 с.
2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи – М.:Гардарика, 1999. – 637 с.
4. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники: В 2 ч. - Л.: Энергоиздат. 1981. – Т.1 – 536 с.; Т.2 – 416 с.
5. Атабеков Г.И., Тимофеев А.В., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники: В 2 ч. – М.: Энергия, 1978. – Ч.1. Линейные электрические цепи. – 592 с.