

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Методические указания
по выполнению расчетно- лабораторных работ
по теоретической электротехнике
Часть I
(для студентов специальностей АТ, ТКС, ПЭ, ВТ, СПО)

Утверждено на заседании кафедры
«Электромеханика и ТОЭ».
Протокол № 8 от 23 марта 2002 г.

Утверждено на учебно-издательском
совете ДонНТУ.
Протокол № 4 от 30.05.2002.

Методические указания по выполнению расчетно-лабораторных работ по теоретической электротехнике. Часть I / Под общей редакцией проф. В.Ф. Денника. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 72 с.

Настоящие методические указания предназначены для студентов факультетов КИТА, ВТ 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.), и выполняющих лабораторные работы по этим дисциплинам на стендах типа УИЛС. 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 одиннадцати расчетно-лабораторных работ по исследованию стационарных режимов в электрических цепях постоянного, однофазного и трехфазного токов.

Составители: В.Ф. Денник, проф.
В.А. Эсауленко, проф.
В.Х. Антамонов, доц.
А.В. Корощенко, доц.
Э.С. Мерзликин, доц.
В.Е. Михайлов, доц.
М.М. Федоров, доц.

Отв. за выпуск В.Ф. Денник, проф.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие указания по выполнению расчетно-лабораторных работ	4
Общие сведения о стенде УИЛС-2	6
Порядок составления отчета	8
Лабораторная работа № 1	9
Лабораторная работа № 2	15
Лабораторная работа № 3	23
Лабораторная работа № 4	30
Лабораторная работа № 5	38
Лабораторная работа № 6	46
Лабораторная работа № 7	52
Лабораторная работа № 8	56
Лабораторная работа № 9	60
Лабораторная работа № 10	64
Лабораторная работа № 11	67
Литература	72

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-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 наименьшим.

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 незащищенным частям установки, находящейся под напряжением.

5.3. Производить пересоединения в электрической цепи, находящейся под напряжением. Все 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 I и II частям курсов, которые могут быть объединены понятием «Теоретическая электротехника» (ТОЭ, теория электрических и магнитных цепей, электротехнические основы устройств вычислительной техники и др.), расчетно-лабораторных заданий и учебно-исследовательских работ студентов.

Общий вид стенда УИЛС-2 приведен на рис.1.

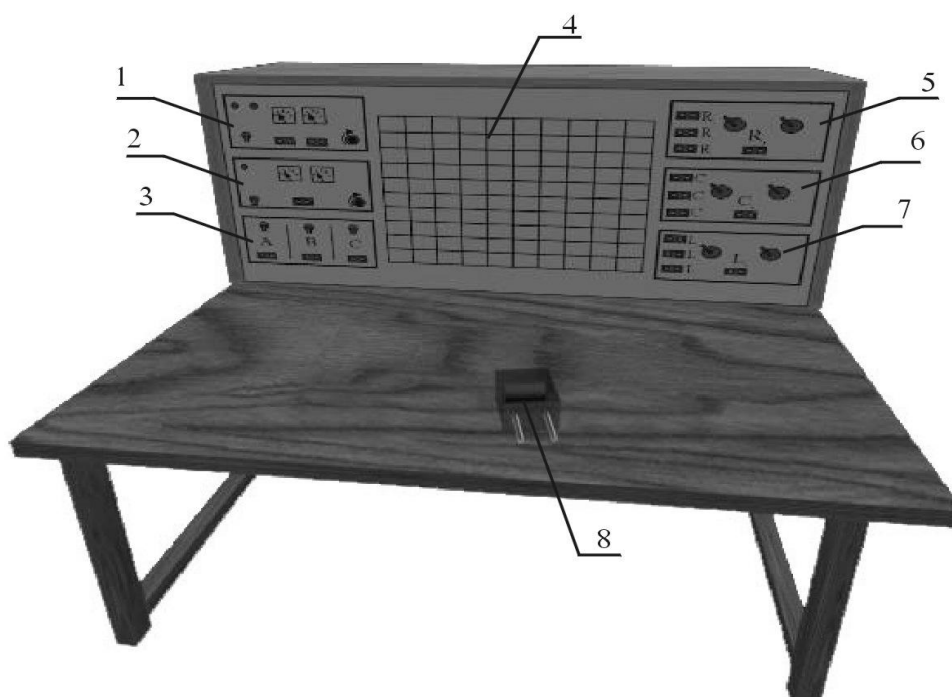


Рис.1

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

Питание стенда осуществляется от трёхфазной сети с напряжением 380, 220, 127 В. Потребляемая мощность не более 500 ВА. Стенд имеет блоки питания постоянного, однофазного и трёхфазного переменного токов, блоки пассивных 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 измерительных приборов.

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

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СТЕНДА УИЛС-2

1. Блоки источников энергии

№ пп	Источник	U, В	I, А	f	R _в , 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	0-40	1	50 Гц	-

2. Блоки пассивных элементов

R	R ₁ =100 Ом, P _{доп} =10 Вт	R ₂ =200 Ом, P _{доп} =10 Вт	R ₃ =400 Ом, P _{доп} =7.5-15 Вт	R ₄ =0-1000 Ом, P _{доп} =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				

3. Комплект-набор съёмных элементов

Резисторы		Конденсаторы		Индуктивности			
№ элемента	P _{доп} =2 Вт; R, Ом	№ элемента	U _{доп} =160 В; C, мкФ	№ элемента	L, мГн	r _L , Ом	I _{доп} , мА
01	51			20	2	0.35	220
02	75	11	0.1	21	3	0.64	190
03	100	12	0.25	22	5	0.78	150
04	150	13	0.5	23	7	0.9	125
05	200	14	0.75	24	10	0.9	100
06	300	15	1.0	25	15	1.18	85
07	510	16	1.25	26	20	1.38	75
08	700	17	1.5	27	30	1.63	60
09	800	18	1.75	28	50	2.05	50
10	1000	19	2.0	29	70	2.5	40
Разброс параметров указанных элементов составляет ±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 ученических тетрадей в клетку.

Отчет должен содержать:

- Титульный лист (см. образец);
- Изложение цели работы и её реализации в данной лабораторной работе, включая исследуемые схемы, таблицы результатов экспериментов, требуемые расчеты, графики и диаграммы;
- 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.

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*10 см, т.е. в

<p>МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ</p> <p>Донецкий национальный технический университет</p> <p>Кафедра электромеханики и ТОО</p> <p>ОТЧЕТ о лабораторной работе № 2 «Исследование сложной цепи постоянного тока»</p> <p>Выполнил ст. гр АТ-00-3 Аникев С.</p> <p>Принял _____</p> <p>Донецк - 2002</p>
--

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 вольт-амперных 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, так и пассивные, характеризуются номинальными параметрами и зависимостью между током в элементе и напряжением на нем, которая называется вольт-амперной характеристикой элемента $I(U)$. Параметрами пассивных элементов являются сопротивление R , индуктивность L или емкость C элемента. Для активных элементов цепи, например для источников энергии постоянного тока, - это либо ЭДС E и внутреннее сопротивление $r_в$, включенные последовательно, либо ток короткого замыкания $J_к$ и внутреннее сопротивление $r_в$, включенные параллельно.

Параметры элементов можно получить аналитически на основе законов Ома и Кирхгофа по экспериментально полученным вольт-амперным характеристикам этих элементов. Так, вольт-амперная характеристика источника энергии постоянного тока (она называется еще внешней или нагрузочной характеристикой источника)

$$U_{вых}(I) = E - Ir_в \quad (1.1)$$

может быть снята экспериментально по схеме рис.1.1. Здесь ток I изменяют с помощью переменного резистора $R_д$. Значения тока I и напряжения на зажимах источника $U_{вых}$ измеряют с помощью амперметра и вольтметра. Параметры источника определяют по выражениям

$$E = U_{xx}, \quad r_в = (E - U_{вых})/I, \quad (1.2)$$

где U_{xx} - напряжение холостого хода на зажимах источника.

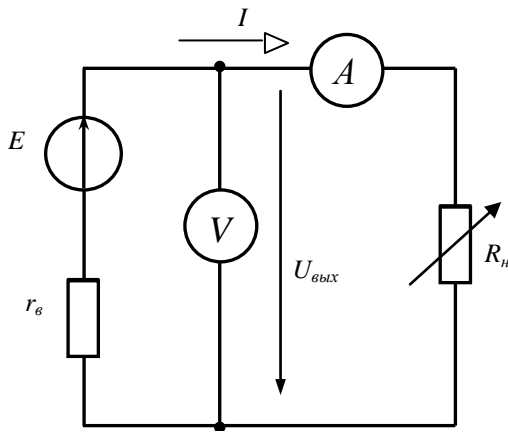


Рис.1.1. Схема для снятия ВАХ источника

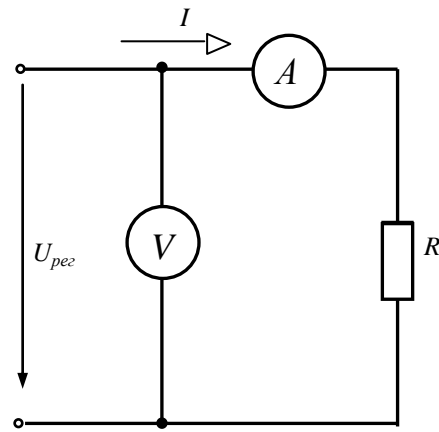


Рис.1.2. Схема для снятия ВАХ резисторов и определения их сопротивлений

Вольт-амперные характеристики пассивных элементов снимают по схеме рис.1.2, в которой используется источник с регулируемым выходным напряжением. Здесь ток I и напряжение U измеряют непосредственно на исследуемом резисторе. Тогда, согласно закону Ома

$$R=U/I.$$

Приведенный способ определения сопротивления элементов называется методом амперметра-вольтметра. Кроме этого, сопротивление линейного резистивного элемента можно непосредственно измерить омметром, который часто имеется в составе комбинированных измерительных приборов. На корпусе резистора в качестве его параметров указывают номинальное сопротивление $R_{ном}$ и допустимую мощность рассеивания $P_{дон}$, при которой резистор может работать длительное время. Это позволяет определить допустимый ток и допустимое напряжение на резисторе:

$$I_{дон} \leq \sqrt{\frac{P_{дон}}{R_{ном}}}, \quad U_{дон} \leq I_{дон} \cdot R_{ном}. \quad (1.3)$$

С точки зрения расчета электрические цепи подразделяют на простые и сложные. К простым относят цепи с одним источником энергии и последовательно-параллельным включением сопротивлений. Для расчета таких цепей достаточно знания закона Ома и законов Кирхгофа.

В качестве примера на рис.1.3 приведена схема простой электрической цепи. Пусть $U=18$ В, $r_1=50$ Ом, $r_2=300$ Ом, $r_3=100$ Ом, $r_4=200$ Ом, $r_5=300$ Ом, $r_6=75$ Ом, допустимая мощность рассеивания у всех резисторов $P_{дон}=2$ Вт. Требуется определить в цепи все токи, рассчитать фактические мощности, выделяющиеся на резисторах, убедиться в выполнении первого и второго законов Кирхгофа.

Поскольку задано входное напряжение, то чтобы воспользоваться законом Ома, необходимо рассчитать входное сопротивление всей цепи r_{ex} . Тогда

$$I_1 = \frac{U_{ex}}{r_{ex}}.$$

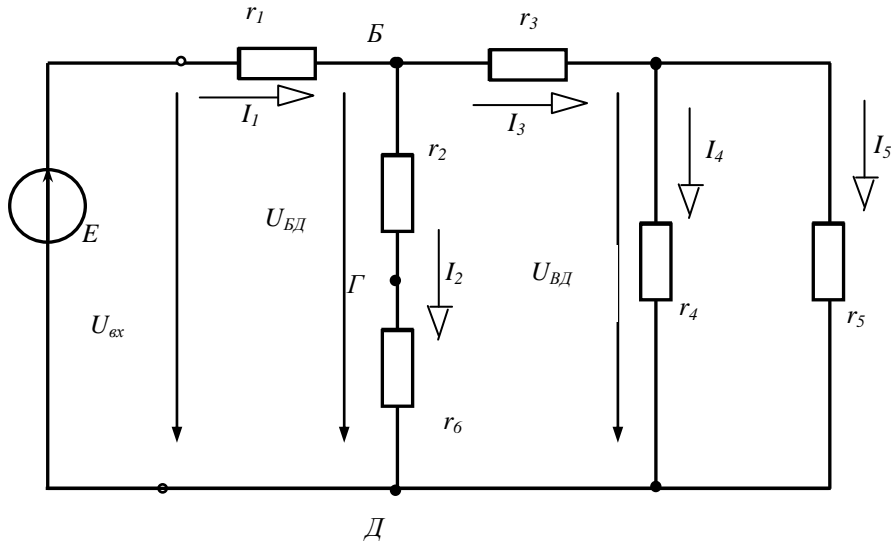


Рис.1.3. Расчетная схема простой электрической цепи

Известно, что при последовательном включении резисторов их общее (эквивалентное) сопротивление определяется по формуле

$$r_{\Sigma} = r_1 + r_2 + r_3 + \dots = \sum_{i=1}^{i=n} r_i, \quad (1.4)$$

а при параллельном

$$r_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} g_i}, \quad (1.5)$$

где $g_i = 1/r_i$ – проводимость i -й ветви; в случае двух сопротивлений

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Применяя эти соотношения в заданной схеме цепи, постепенно заменяем параллельно и последовательно включенные сопротивления, сводя цепь к одноконтурной:

$$r_{45} = \frac{r_4 r_5}{r_4 + r_5} = \frac{200 \cdot 300}{200 + 300} = 120 \text{ Ом}, \quad r_{345} = r_3 + r_{45} = 100 + 120 = 220 \text{ Ом},$$

$$r_{БД} = \frac{(r_2 + r_6) r_{345}}{r_2 + r_6 + r_{345}} = \frac{(500 + 75) \cdot 220}{500 + 75 + 220} = 159,1 \text{ Ом},$$

$$r_{ex} = r_1 + r_{БД} = 50 + 159,1 = 209,1 \text{ Ом}.$$

После этого находим ток $I_1 = \frac{U_{ex}}{r_{ex}} = \frac{18}{209,1} = 0,08607 \text{ А} = 86,1 \text{ мА}.$

Напряжение на участке «БД» и токи I_2 и I_3 , определяем по закону Ома:

$$U_{БД} = I_1 \cdot r_{БД} = 0,0861 \cdot 159,1 = 13,695 \text{ В},$$

$$I_2 = \frac{U_{БД}}{r_2 + r_6} = \frac{13,695}{500 + 75} = 0,0238 \text{ А}, \quad I_3 = \frac{U_{БД}}{r_{345}} = \frac{13,695}{220} = 0,0623 \text{ А}.$$

Ток I_3 далее разветвляется на токи I_4 и I_5 . Их можно найти в два действия так же, как были определены токи I_2 и I_3 , но можно и объединить эти два действия в одно:

$$I_4 = \frac{U_{БД}}{r_4} = \frac{I_3 \cdot r_{45}}{r_4} = \frac{I_3 \cdot \frac{r_4 r_5}{r_4 + r_5}}{r_4} = I_3 \frac{r_5}{r_4 + r_5} = 0,0623 \cdot \frac{300}{200 + 300} = 0,0374 \text{ А}.$$

$$I_5 = I_3 \frac{r_4}{r_4 + r_5} = 0,0623 \cdot \frac{200}{200 + 300} = 0,0249 \text{ А}.$$

Последние выражения, полученные для токов I_4 и I_5 , называют формулой или правилом разброса тока в две параллельные ветви.

Вычисляем фактические мощности резисторов:

$$P_1 = I_1^2 \cdot r_1 = 0,086^2 \cdot 50 = 0,37 \text{ Вт}, \quad P_2 = I_2^2 \cdot r_2 = 0,0238^2 \cdot 500 = 0,283 \text{ Вт},$$

$$P_3 = 0,388 \text{ Вт}, \quad P_4 = 0,28 \text{ Вт}, \quad P_5 = 0,186 \text{ Вт}, \quad P_6 = 0,042 \text{ Вт}.$$

Выполним проверку правильности вычислений с помощью первого и второго законов Кирхгофа.

Для узла «Б» по первому закону Кирхгофа

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0,0861 - 0,0238 - 0,0623 = 0.$$

Для контура «А-Б-В- r_5 -Д-А» по второму закону Кирхгофа

$$I_1 r_1 + I_3 r_3 + I_5 r_5 - U_{\text{ex}} = 0,0861 \cdot 50 + 0,0623 \cdot 100 + 0,0249 \cdot 300 - 18 = 0.$$

Домашняя подготовка к работе

1. Изучить вопрос о схемах замещения реальных источников энергии в расчетных схемах и подготовить табл.1.1 и табл.1.2 для занесения результатов измерений при снятии вольт-амперных характеристик элементов цепи.

Вычертить схемы рис.1.1 и рис.1.2.

Таблица 1.1. Нагрузочные характеристики и параметры источников

Нерегулируемый источник постоянного напряжения			Регулируемый источник при $U_{\text{вых}} = 15 \text{ В}$		
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	Параметры источника	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	Параметры источника
	0	$E_1 =$ $r_{\text{в1}} =$	15	0	$E_2 =$ $r_{\text{в2}} =$
	0.1			0.1	
	0.2			0.2	
	0.3			0.3	
	0.4			0.4	
	0.5			0.5	

Таблица 1.2. Вольт-амперные характеристики резистивных элементов

Резистор 01			Резистор 02		
$U, В$	$I, А$	$R, Ом$	$U, В$	$I, А$	$R, Ом$

2. Изучить основные законы и расчетные соотношения для простых электрических цепей: закон Ома, первый и второй законы Кирхгофа, формулы расчета сопротивления цепи при последовательном и параллельном включении элементов, формулы расчета мощности и разброса тока в параллельные ветви.

3. Подготовить табл.1.3 для определения фактических сопротивлений пассивных резистивных элементов стенда.

Таблица 1.3. Результаты измерений сопротивлений резисторов

Номера элементов	Номинальное сопротивление элемента $R_{ном}, Ом$	Допустимый ток элемента $I_{доп}, А$	Измеренный ток элемента $I, А$	Измеренное напряжение на элементе $U, В$	Сопротивление элемента $R, Ом$	Относительная погрешность сопротивления $\gamma, \%$
01	51	0,198				
02	75	0,163				
03	100	0,141				
04	150	0,115				
05	200	0,1				
06	300	0,082				
07	510	0,063				
08	700	0,053				
09	800	0,05				
10	1000	0,045				

$$\text{Относительная погрешность } \gamma = \frac{|R_{ном} - R|}{R_{ном}} \cdot 100\%.$$

4. В соответствии с номером варианта (номер варианта соответствует номеру бригады студентов) выбрать на рис.1.4 и вычертить свою схему для исследований. В этой схеме в качестве сопротивления r_1 принят элемент 01 с сопротивлением 51 Ом, в качестве r_2 - элемент 02 с сопротивлением 75 Ом и т.д. (см. табл.1.3).

Указать на схеме положительные направления токов в резисторах и напряжений на отдельных участках. Выполнить расчет схемы при напряжении источника $U_{ex}=18 В$. Результаты расчета занести в табл.1.4.

Таблица 1.4. Результаты расчетов и измерений в исследуемой электрической цепи рис.1.4

Исследуемые величины	U_{ex} , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	I_4 , мА	I_5 , мА	I_6 , мА
Расчет	18						
Эксперимент	18						

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

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис.1.1 сначала с источником нерегулируемого, а затем с источником регулируемого постоянного напряжения при $U=15В$ и снять нагрузочные характеристики этих источников. В качестве переменного сопротивления R_n принять резистор R_4 в блоке резисторов стенда. Ток следует изменять в пределах 0-500 мА с шагом 100 мА. Холостой ход источника ($I=0$, $U_{xx}=E$) обеспечивается отключением резистора R_n . Результаты измерений внести в табл.1.1, по данным которой определить параметры E и r_e источников и в общей системе координат построить графики характеристик $U_{вых}=f(I)$.

2. Собрать схему рис.1.2 с источником регулируемого напряжения и исследуемыми резисторами 01 и 02. Изменяя напряжение источника от нуля до максимально допустимого, произвести измерения напряжений и токов, результаты которых внести в табл.1.2. Необходимо следить за тем, чтобы токи в резисторах не превосходили максимально допустимых значений. В общей системе координат построить вольт-амперные характеристики резистивных элементов $U=f(I)$.

3. По схеме рис.1.2 выполнить исследования для определения фактических сопротивлений резисторов стенда при токах, близких к их максимально допустимым значениям. Результаты измерений напряжений на резисторах и токов в цепи внести в табл.1.3. Вычислить сопротивления резисторов и сравнить их с номинальными значениями, определить относительную погрешность величины номинального сопротивления резистивных элементов.

4. Собрать схему рис.1.4 согласно номеру варианта электрической цепи, предусмотрев в ней возможность измерения токов во всех ветвях (в ветвях должны быть перемычки, вместо которых подключается прибор для измерения тока этих ветвей). В качестве источника использовать источник регулируемого напряжения с $U_{ex}=18 В$. Результаты измерений напряжения и токов в схеме рис.1.4 внести в табл.1.4.

6. Для схемы рис.1.4 составить уравнения по первому и второму законам Кирхгофа и убедиться в их выполнении, используя при этом экспериментальные значения напряжений, токов и сопротивлений. Сделать выводы по результатам лабораторной работы.

Вопросы для самоконтроля

1. Запишите уравнение внешней характеристики реальных источников энергии и представьте ее график.
2. Каким образом экспериментально определяют параметры E и r_0 источника энергии?
3. Каким образом реальные источники энергии представляют в расчетных схемах и можно ли исследованные в работе источники представить в расчетных схемах идеальными источниками ЭДС?
4. Известны параметры E и r_0 реального источника энергии. Составьте его эквивалентную схему замещения с источником тока и определите ее параметры.
5. Параллельно включены 4 резистора с сопротивлениями: 2, 2, 8, 8 Ом. Определите входное сопротивление такой цепи.
6. Сформулируйте закон Ома и законы Кирхгофа для электрических цепей постоянного тока.
7. Общий ток в цепи, состоящей из двух параллельно включенных резисторов $R_1 = 3$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, равен 10 А. Пользуясь правилом разброса тока в параллельные ветви, определите токи в каждом из сопротивлений.
8. Последовательно включено 4 резистора: 2, 8, 6, 4 Ом. Определите напряжение источника, если напряжение на последнем резисторе равно 16 В.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование сложной электрической цепи постоянного тока

Цель работы: экспериментально проверить основные методы расчета линейных электрических цепей постоянного тока: принцип наложения, метод узловых потенциалов, метод эквивалентного генератора, а также построить потенциальную диаграмму для одного из контуров цепи.

Пояснения к работе

Принцип наложения присущ только линейным цепям. Он заключается в том, что ток любой ветви линейной цепи с несколькими источниками определяется алгебраической суммой частичных токов, создаваемых в этой ветви под действием каждого источника энергии в отдельности. В схеме оставляется только один источник энергии, а все остальные исключаются из цепи (заменяются их внутренними сопротивлениями).

В качестве примера рассмотрим электрическую цепь, представленную на рис.2.1. Параметры элементов цепи известны: $E_1 = 20$ В, $E_2 = 10$ В, $r_1 = 50$ Ом, $r_3 = 100$ Ом, $r_4 = 150$ Ом, $r_5 = 200$ Ом, $r_6 = 75$ Ом.

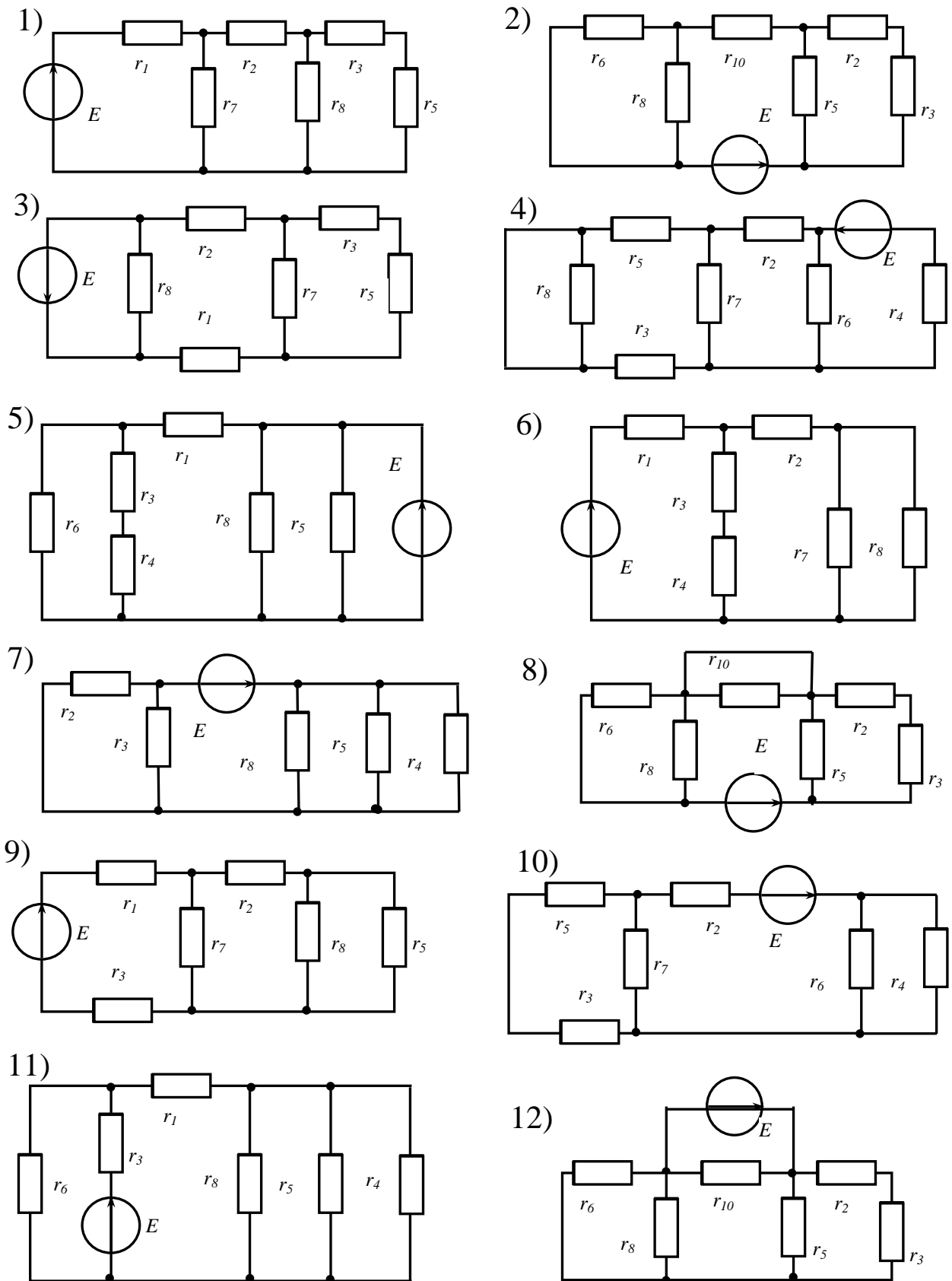


Рис.1.4. Варианты схем для исследований

Требуется определить токи в ветвях схемы с помощью метода наложения.

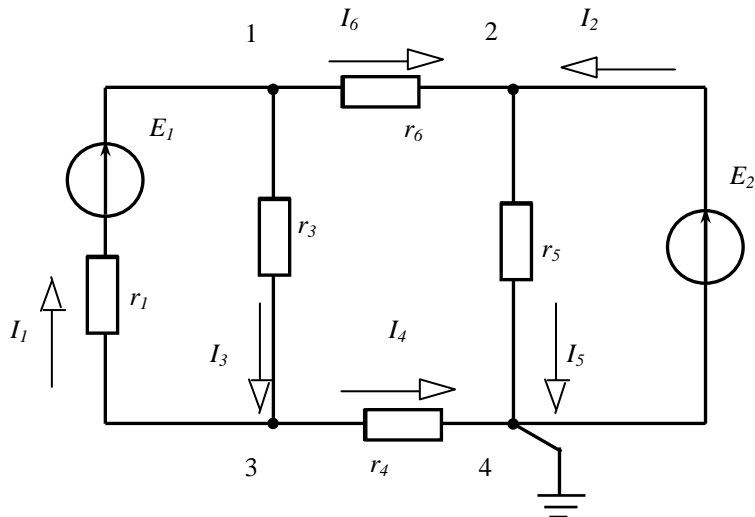


Рис.2.1. Исходная схема электрической цепи

Сначала определим частичные токи в ветвях схемы при действии только ЭДС E_1 (рис.2.2,а):

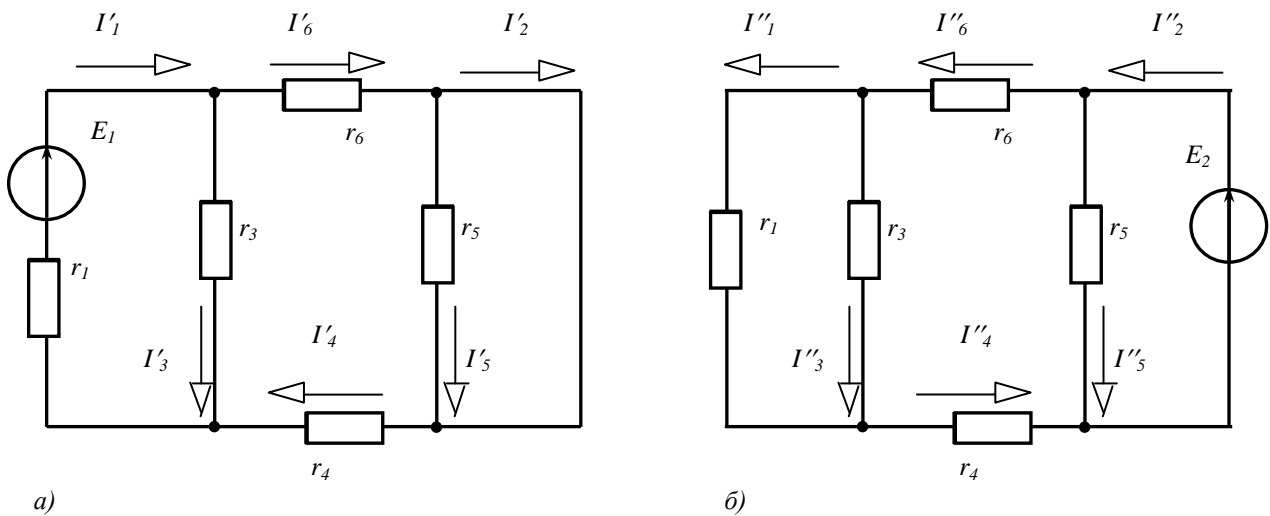


Рис.2.2. Расчетные схемы электрической цепи для метода наложения

$$I'_1 = \frac{E_1}{r_1 + \frac{r_3(r_4 + r_6)}{r_3 + r_4 + r_6}} = \frac{20}{50 + \frac{100 \cdot (150 + 75)}{100 + 150 + 75}} = 0,168 \text{ А.}$$

$$I'_3 = I'_1 \frac{(r_4 + r_6)}{r_3 + r_4 + r_6} = 0,168 \cdot \frac{150 + 75}{100 + 150 + 75} = 0,116 \text{ А,}$$

$$I'_6 = I'_1 \frac{r_3}{r_3 + r_4 + r_6} = 0,168 \cdot \frac{100}{100 + 150 + 75} = 0,052 \text{ А.}$$

$$I'_4 = I'_2 = I'_6 = 0,052 \text{ А,} \quad I'_5 = 0 \text{ А.}$$

Затем находим частичные токи в ветвях схемы при действии только ЭДС E_2 (рис.2.2,б):

$$I''_5 = \frac{E_2}{r_5} = \frac{10}{200} = 0,05 \text{ А,}$$

$$I''_6 = \frac{E_2}{r_6 + \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3} + r_4} = \frac{10}{75 + \frac{50 \cdot 100}{50 + 100} + 150} = 0,0387 \text{ А,}$$

$$I''_1 = I''_6 \cdot \frac{r_3}{r_1 + r_3} = 0,0387 \cdot \frac{100}{50 + 100} = 0,0258 \text{ А,}$$

$$I''_3 = I''_6 \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_3} = 0,0387 \cdot \frac{50}{50 + 100} = 0,0129 \text{ А,}$$

$$I''_4 = I''_6 = 0,0387 \text{ А,}$$

$$I''_2 = I''_5 + I''_6 = 0,05 + 0,0387 = 0,0887 \text{ А.}$$

Токи в исходной схеме рис.2.1 определяем согласно методу наложения в виде алгебраической суммы соответствующих частичных токов:

$$I_1 = I'_1 - I''_1 = 0,168 - 0,0258 = 0,142 \text{ А,} \quad I_2 = -I'_2 + I''_2 = -0,052 + 0,0887 = 0,037 \text{ А,}$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3 = 0,116 + 0,0129 = 0,129 \text{ А,} \quad I_4 = -I'_4 + I''_4 = -0,052 + 0,0387 = -0,013 \text{ А,}$$

$$I_5 = I'_5 + I''_5 = 0 + 0,05 = 0,05 \text{ А,} \quad I_6 = I'_6 - I''_6 = 0,052 - 0,0387 = 0,013 \text{ А,}$$

Метод узловых потенциалов основан на применении первого закона Кирхгофа и закона Ома. При этом потенциал одного из узлов электрической цепи принимают равным нулю (узел заземляют), а для определения потенциалов остальных узлов схемы составляют и решают систему линейных алгебраических уравнений, полученных на основании первого закона Кирхгофа. Затем, используя закон Ома, рассчитывают токи в ветвях схемы.

В качестве примера определим токи в ветвях схемы рис.2.1 методом узловых потенциалов.

Принимаем $\varphi_4 = 0$, тогда $\varphi_2 = E_2 = 10 \text{ В.}$

Составляем систему уравнений для определения потенциалов оставшихся узлов:

$$\varphi_1(g_1 + g_3 + g_6) - \varphi_2 g_6 - \varphi_3(g_1 + g_3) = E_1 g_1,$$

$$-\varphi_1(g_1 + g_3) + \varphi_3(g_1 + g_3 + g_4) = -E_1 g_1.$$

Принимая во внимание, что

$$g_1 = \frac{1}{r_1} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ 1/Ом,} \quad g_3 = \frac{1}{r_3} = \frac{1}{100} = 0,01 \text{ 1/Ом,}$$

$$g_4 = \frac{1}{r_{4l}} = \frac{1}{150} = 0,0067 \text{ 1/Ом}, \quad g_6 = \frac{1}{r_6} = \frac{1}{75} = 0,0133 \text{ 1/Ом},$$

получим

$$\begin{aligned} \varphi_1 \cdot 0,0433 - \varphi_3 \cdot 0,03 &= 0,533, \\ -\varphi_1 \cdot 0,03 + \varphi_3 \cdot 0,0367 &= -0,4, \end{aligned}$$

или

$$\varphi_1 = 10,97 \text{ В}, \quad \varphi_3 = -1,93 \text{ В}.$$

Токи в ветвях вычисляем с помощью закона Ома:

$$\begin{aligned} I_1 &= (\varphi_3 - \varphi_1 + E_1) \cdot g_1 = (-1,93 - 10,97 + 20) \cdot 0,02 = 0,142 \text{ А}, \\ I_3 &= (\varphi_1 - \varphi_3) \cdot g_3 = (-10,97 + 1,93) \cdot 0,01 = 0,129 \text{ А}, \\ I_4 &= (\varphi_3 - \varphi_4) \cdot g_4 = (-1,93 - 0) \cdot 0,0067 = -0,013 \text{ А}, \\ I_5 &= (\varphi_2 - \varphi_4) \cdot g_5 = (10 - 0) \cdot (1/200) = 0,05 \text{ А}, \\ I_6 &= (\varphi_1 - \varphi_2) \cdot g_6 = (10,97 - 10) \cdot 0,0133 = 0,013 \text{ А}, \\ I_2 &= I_4 + I_5 = -0,013 + 0,05 = 0,037 \text{ А}. \end{aligned}$$

Метод эквивалентного генератора. Метод применяется в том случае, когда требуется определить ток в одной ветви схемы. При этом из схемы выделяют искомую ветвь с сопротивлением r , а остальную часть схемы представляют в виде активного двухполюсника, который в свою очередь заменяют эквивалентным генератором. ЭДС E эквивалентного генератора равна напряжению холостого хода U_{xx} двухполюсника, а внутреннее сопротивление генератора r_{ex} – входному сопротивлению R_{ex} пассивного двухполюсника.

Тогда ток в выделенной ветви

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

В качестве примера определим ток I_6 в схеме рис.2.1. Сначала удалим из схемы сопротивление r_6 и вычислим напряжение U_{xx} (рис.2.3,а).

Согласно второму закону Кирхгофа

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

откуда

$$U_{xx} = I_{4x} r_4 + I_{3x} r_3 - E_2 = 0 + 0,133 \cdot 100 - 10 = 3,33 \text{ В},$$

где

$$I_{3x} = \frac{E_1}{r_1 + r_3} = \frac{20}{50 + 100} = 0,133 \text{ А}, \quad I_{4x} = 0 \text{ А}.$$

Для определения входного сопротивления пассивного двухполюсника все источники из схемы удаляем, оставляя в ней их внутренние сопротивления (рис.2.3,б):

$$R_{ex} = \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3} + r_4 + 0 = \frac{50 \cdot 100}{50 + 100} + 150 + 0 = 183,3 \text{ Ом}.$$

Искомый ток находим согласно закону Ома (рис.2.3,в)

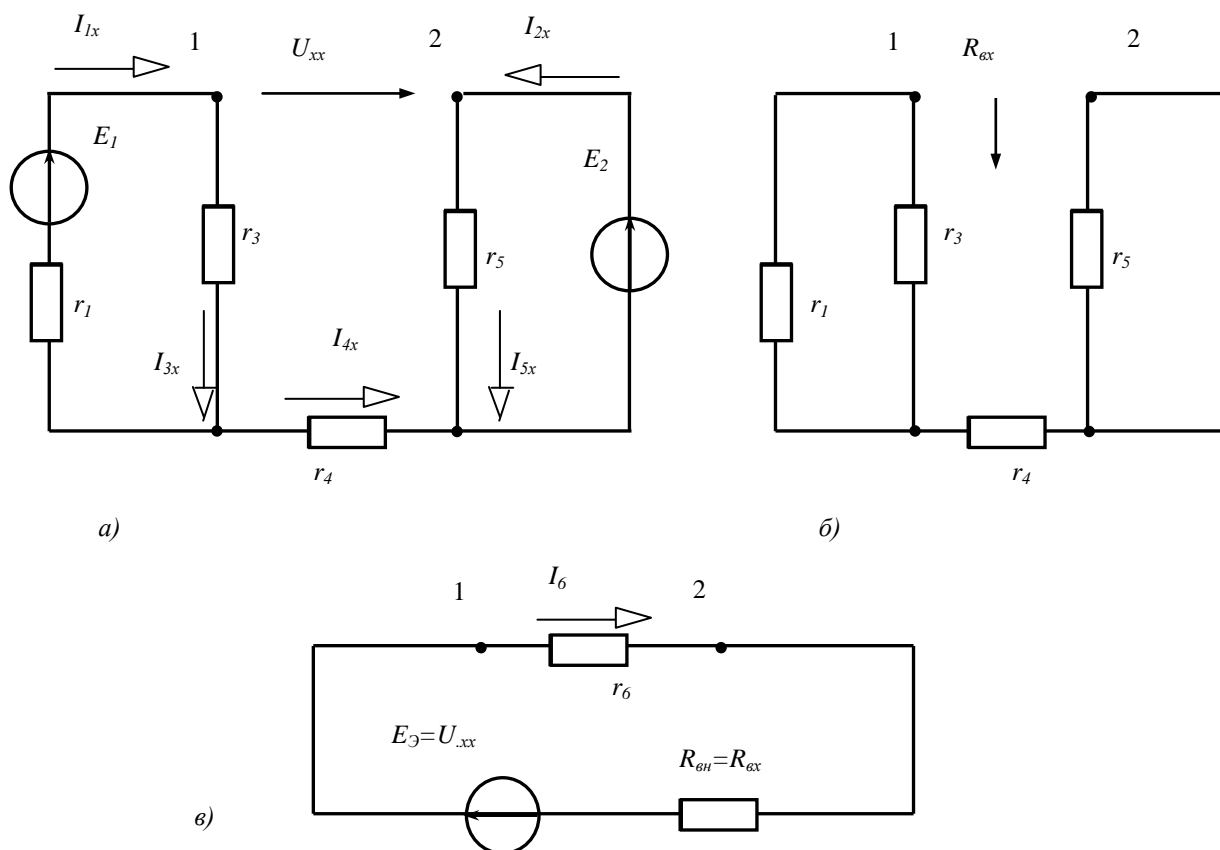


Рис.2.3. Расчетные схемы электрической цепи для метода эквивалентного генератора

$$I_6 = \frac{U_{xx}}{R_{Эк} + r_6} = \frac{3,33}{183,3 + 75} = 0,0129 \text{ А.}$$

Домашняя подготовка к работе

1. В соответствии с номером варианта вычертить схему рис.2.4, обозначив сопротивления ветвей и произвольно выбрав положительные направления токов в ветвях.
2. Используя метод наложения, рассчитать токи в ветвях схемы рис.2.4 при $E_1=19 \text{ В}$, $E_2=15 \text{ В}$ и результаты расчета занести в табл.2.1. Сопротивления схемы принять равными их номинальным значениям согласно табл.1.3 (номер сопротивления ветви равен номеру резистивного элемента стенда).
3. Используя метод узловых потенциалов, рассчитать схему рис.2.4 при $E_1=19 \text{ В}$, $E_2=15 \text{ В}$ и результаты расчета занести в табл.2.2 (на схеме обозначить потенциалы узлов).
4. Используя метод эквивалентного генератора, при $E_1=19 \text{ В}$, $E_2=15 \text{ В}$ рассчитать ток I в ветви с элементом 02 схемы рис.2.4 и результаты расчета занести в табл.2.3.

Таблица 2.1. Результаты расчетов и экспериментов по методу наложения

Режимы цепи		I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	I_4 , мА	I_5 , мА	I_6 , мА
В схеме включен только источник E_1	Расчет						
	Эксперимент						
В схеме включен только источник E_2	Расчет						
	Эксперимент						
В схеме включены два источника	Расчет						
	Эксперимент						

Таблица 2.2. Результаты расчетов и экспериментов по методу узловых потенциалов

Исследуемые величины	φ_1 , В	φ_2 , В	φ_3 , В	φ_4 , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	I_4 , мА	I_5 , мА	I_6 , мА
Расчет										
Эксперимент										

Таблица 2.3. Результаты расчетов и экспериментов по методу эквивалентного генератора

Исследуемые величины	$U_{кз}$, В	$I_{кз}$, мА	$R_{вх}$, Ом	I , мА
Расчет		-		
Эксперимент				

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему цепи рис.2.4, с помощью перемычек предусмотрев возможность измерения токов во всех ветвях. Проверить полярность и установить величины ЭДС источников $E_1=19$ В, $E_2=15$ В.

2. Применительно к схеме рис.2.4 проверить экспериментально выполнение принципа наложения. Сначала измерить частичные токи в ветвях схемы только при действии источника $E_1=20$ В (источник E_2 удален, а вместо него включена перемычка), затем выполнить измерения частичных токов только при источнике E_2 . Наконец, включив оба источника, измерить полные токи ветвей. Результаты измерений записать в табл.2.1. Сделать вывод о точности выполнения принципа наложения в исследуемой цепи.

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, измерить величину и знак потенциалов остальных узлов цепи. Результаты

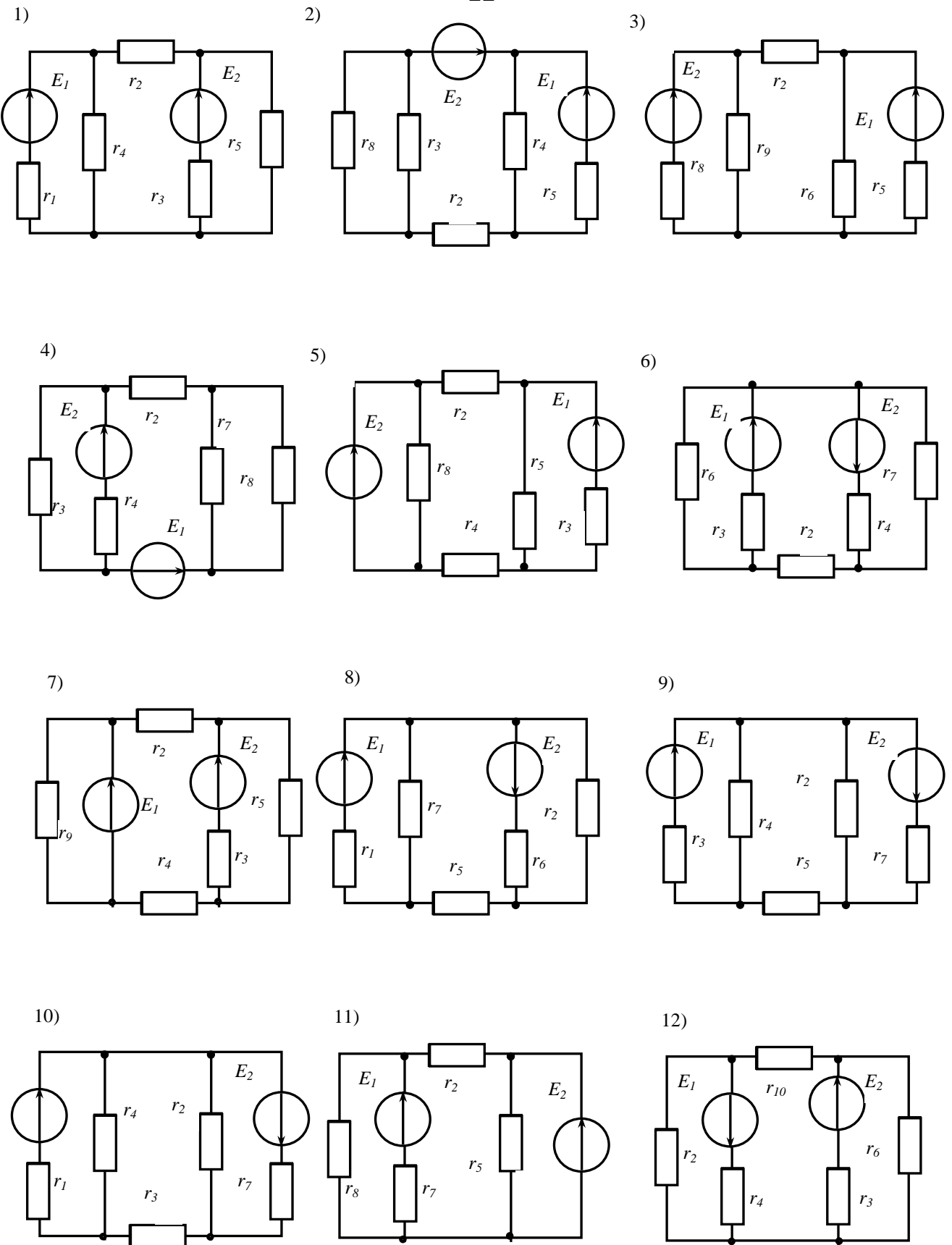


Рис.2.4. Варианты схем для исследований

измерений занести в табл.2.2. Сделать вывод о точности совпадения расчетных и экспериментальных значений потенциалов узлов схемы.

4. Измерить токи в ветвях схемы рис.2.4 и результаты измерений занести в табл.2.2. Сравнить расчетные (по методу узловых потенциалов) и экспериментальные значения токов.

5. Осуществить экспериментальную проверку метода эквивалентного генератора. Для этого при включенных источниках ЭДС E_1 и E_2 необходимо удалить исследуемую ветвь с элементом 02 (сопротивление r_2) в схеме рис.2.4 и, подключая к соответствующим узлам сначала вольтметр, а затем амперметр, измерить напряжение холостого хода U_{xx} и ток короткого замыкания $I_{кз}$. По данным измерений рассчитать входное сопротивление пассивного двухполюсника $R_{вх} = U_{xx} / I_{кз}$, а затем ток I в удаленной ветви. Результаты исследований внести в табл.2.3.

Сравнить расчетные и экспериментальные значения исследуемых величин.

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

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте принцип наложения.
2. В чем заключается сущность метода эквивалентного генератора?
3. Приведите порядок расчета электрической цепи с помощью метода узловых потенциалов.
4. Запишите систему уравнений для определения потенциалов двух узлов электрической цепи (третий узел заземлен).
5. Какие существуют способы экспериментального определения входного сопротивления относительно любой пары зажимов сложной электрической цепи?
6. В исследуемой схеме рис.2.4 определите величину входного сопротивления $R_{вх}$ относительно ветви с источником ЭДС E_1 .
7. Укажите порядок построения потенциальной диаграммы для замкнутого контура электрической цепи.
8. Запишите в общем виде формулу определения тока в ветви с несколькими ЭДС и несколькими сопротивлениями через потенциалы узлов, к которым она подключена.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Определение условий оптимальной передачи электрической энергии от источника к приёмнику

Цель работы: экспериментальная проверка теоретических положений об оптимальной передаче энергии от активного двухполюсника (источника) к

пассивному двухполюснику (нагрузке) через промежуточное звено (линию передачи).

Пояснения к работе

Двухполюсник - это обобщённое название схемы или её части, рассматриваемой относительно пары зажимов. Если внутри двухполюсника есть источники ЭДС или тока, то двухполюсник называется активным. В противном случае двухполюсник называется пассивным.

Активный двухполюсник по отношению к пассивному выступает в роли источника, а пассивный по отношению к активному – в роли приёмника (нагрузки). Активный двухполюсник характеризуется:

- максимально возможным напряжением U_{xx} , которое определяется как напряжение холостого хода;
- максимально возможным током $I_{кз}$, который определяется как ток короткого замыкания;
- отношение U_{xx} к $I_{кз}$ определяет так называемое внутреннее (входное) сопротивление двухполюсника $r_{вх}$.

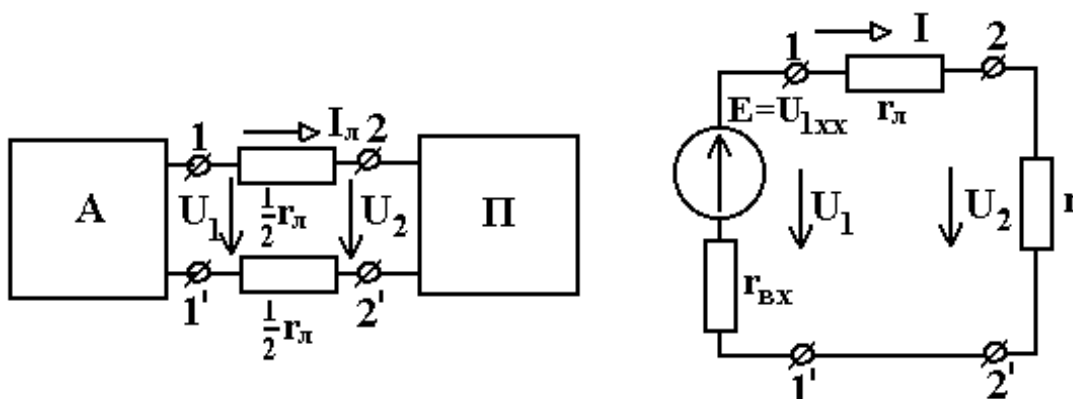


Рис.3.1. Соединение активного А и пассивного В двухполюсников через промежуточный элемент – линию связи с собственным сопротивлением r_n

Пассивный двухполюсник характеризуется только входным (внутренним) сопротивлением r . Схема связи между активным А и пассивным В

двухполюсниками может содержать дополнительные элементы, например, линию связи (рис.3.1), характеризуемую сопротивлением r_n

Если $r_n = 0$, то имеет место непосредственная связь двухполюсников (рис. 3.2). Активная мощность P_2 , расходуемая в пассивном двухполюснике, может быть рассчитана по формуле

$$P_2 = I^2 \cdot r$$

где I - ток в цепи – то есть и в нагрузке (см.рис.3.1 и 3.2).

Ток в цепи можно рассчитать либо по формуле

$$I = \frac{U_{1xx}}{(r_{ex} + r_l + r)} \quad (\text{для схемы рис.3.1})$$

либо по формуле

$$I = \frac{U_{abxx}}{(r_{ex} + r)} \quad (\text{для схемы рис.3.2}),$$

поэтому выражения для мощности нагрузки P_2 приобретают следующий вид:

$$P_2 = I^2 \cdot r = \frac{U_{1xx}^2 \cdot r}{(r_{ex} + r_l + r)^2} - (\text{для схемы рис.3.1}) \quad \text{и}$$

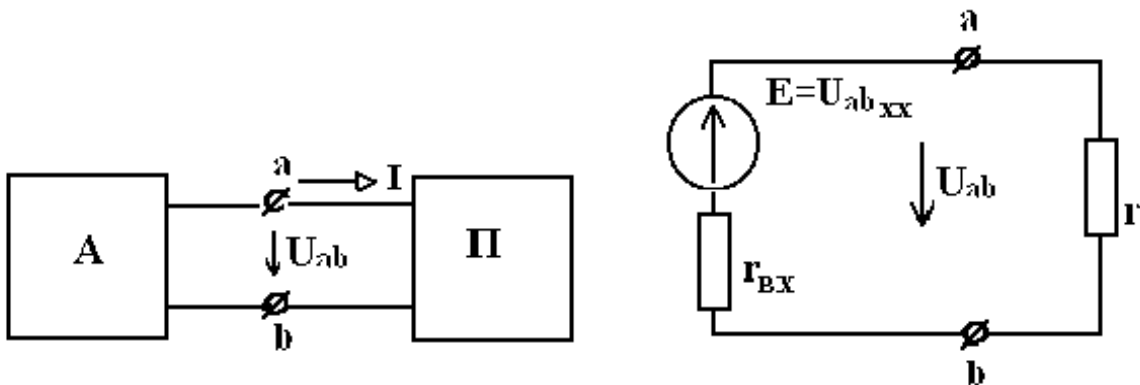


Рис.3.2. Непосредственная связь активного А и пассивного II двухполюсников.

$$P_2 = I^2 \cdot r = \frac{U_{abxx}^2 \cdot r}{(r_{ex} + r)^2} - (\text{для схемы рис.3.2}).$$

где U_{1xx} и U_{abxx} - напряжения на выходных зажимах активного двухполюсника в соответствующих схемах рис.3.1 и рис.3.2.

Чтобы определить, при каком сопротивлении r пассивного двухполюсника его потребляемая мощность P_2 будет максимальной, необходимо исследовать функцию $P_2 = f(r)$ на экстремум. Для этого следует взять производную $\frac{dP_2(r)}{dr}$ и приравнять её к нулю.

$$\frac{dP_2(r)}{dr} = \frac{U_{1xx}^2 \cdot [(r_{ex} + r_l + r)^2 - 2 \cdot r \cdot (r_{ex} + r_l + r)]}{(r_{ex} + r_l + r)^4} = 0.$$

Отсюда $r = r_{ex} + r_l$. Для случая отсутствия линии ($r_l = 0$) $r = r_{ex}$.

Можно убедиться в том, что при $r = r_{\text{ex}} + r_l$, $P_{2\text{max}} = \frac{U_{1\text{xx}}^2}{4 \cdot (r_{\text{ex}} + r)}$.

Равенства $r = r_{\text{ex}} + r_l$ можно достичь или путём подбора r_l при заданных r и r_{ex} , или путём подбора r при заданных r_l и r_{ex} , или путём подбора r_{ex} при фиксированных (заданных) r и r_l . В последнем случае будут меняться также $U_{1\text{xx}}$ и ток $I_{\text{кз}}$ активного двухполюсника. Операция подбора соответствующих сопротивлений для обеспечения указанного равенства, определяющего максимум мощности P_2 , называется согласованием нагрузки.

При $r_l = 0$ условия $r = r_{\text{ex}}$ можно достичь за счёт изменения величины сопротивления нагрузки r .

КПД (коэффициент полезного действия) источника (активного двухполюсника) $\eta_{\text{ист}}$ в схеме рис.3.1 определяется из выражения

$$\eta_{\text{ист}} = \frac{P_1}{P_{\text{ист}}} = \frac{I^2 \cdot (r_l + r)}{U_{1\text{xx}} \cdot I} = \frac{I \cdot (r_l + r)}{U_{1\text{xx}}} = \frac{I \cdot (r_l + r)}{I \cdot (r_{\text{ex}} + r_l + r)} = \frac{(r_l + r)}{(r_{\text{ex}} + r_l + r)} = \frac{1}{\frac{r_{\text{ex}}}{r_l + r} + 1}.$$

При этом $\eta_{\text{ист}} = 0.5$, если $(r_l + r) = r_{\text{ex}}$. Аналогично, для схемы рис.3.2 $\eta_{\text{ист}} = 0.5$ при $r = r_{\text{ex}}$, то есть, если сопротивление нагрузки r (для случая рис.3.1 $(r_l + r)$ – есть сопротивление нагрузки) равно внутреннему сопротивлению источника, то коэффициент полезного действия источника $\eta_{\text{ист}}$ равен 0.5 (или 50%).

Из формулы видно, что КПД источника возрастает при увеличении сопротивления нагрузки r . (Говорят, что если сопротивление нагрузки линии r возрастает, то нагрузка линии (её нагрузка) убывает, то-есть линия разгружается!). КПД источника достигает максимального значения (равного 1) при его работе в режиме холостого хода (то есть, когда ток через линию равен нулю). Мощность P_2 в нагрузке при этом равна нулю. При уменьшении r до

нуля $\eta_{\text{ист}}$ стремится к пределу $\frac{1}{\frac{r_{\text{ex}}}{r_l} + 1}$. В случае $r_l = 0$ $\eta_{\text{ист}} \Rightarrow 0$ при $r \Rightarrow 0$.

По отношению к схеме рис.3.1 можно говорить о КПД η линии передачи:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{r}{r + r_l} = \frac{1}{1 + \frac{r_l}{r}}.$$

Домашняя подготовка к работе

1. В соответствии с номером варианта табл. 3.1 нарисовать схему исследуемого активного двухполюсника (см. рис.3.3 и рис.3.4).
2. Рассчитать напряжение холостого хода U_{xx} , ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$

и входное сопротивление $r_{\text{вх}}$ активного двухполюсника (рис.3.4). Данные вычислений свести в табл.3.2.

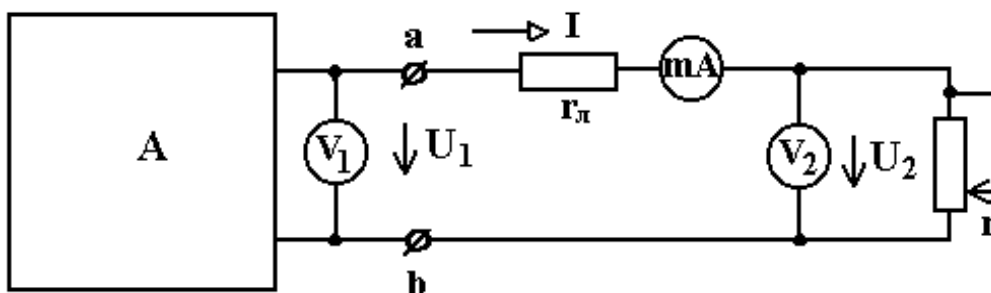


Рис.3.3. Рабочая схема для проведения исследований.

3. Нарисовать эквивалентную расчётную схему исследований цепи

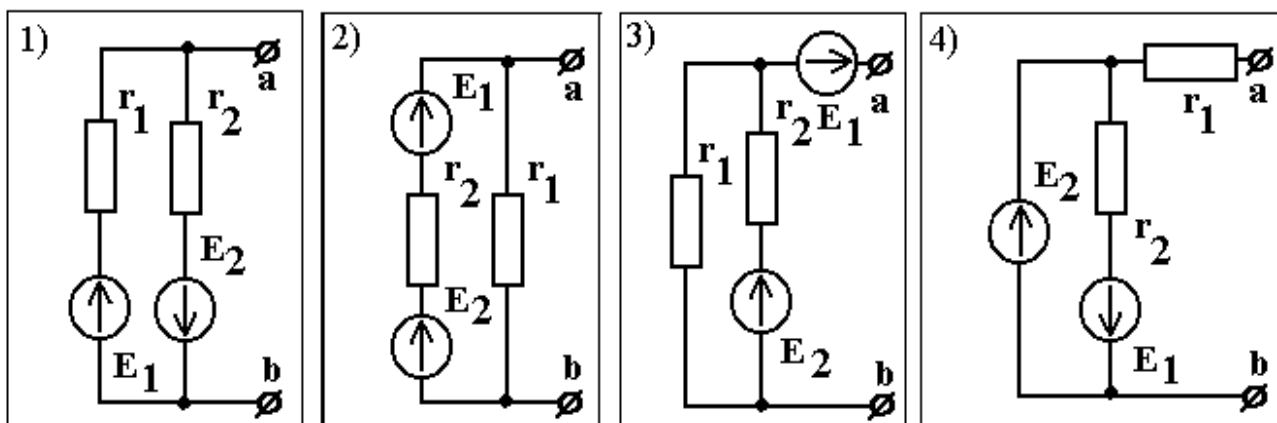


Рис.3.4. Схемы активных двухполюсников для различных вариантов лабораторной работы

(подобную рис.3.1) с указанием в ней значений $U_{\text{вх}}$, $r_{\text{вх}}$ и r (табл.3.1).

4. Вычислить значение сопротивления r пассивного двухполюсника, при котором в нём будет выделяться максимальная мощность $P_{2\text{max}}$.

5. Считая, что входное сопротивление пассивного двухполюсника может изменяться от нуля (режим короткого замыкания) до бесконечности (режим холостого хода двухполюсника), рассчитать и построить в масштабе начальную часть графиков зависимостей $I(r)$, $U_2(r)$, $P_2(r)$, (то есть при изменении r , например, в пределах от нуля до $10 \cdot r_{\text{вх}}$), а также зависимостей $U_1(I)$, $U_2(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $P_{\text{всн}}(I)$ и $\Delta U_{\text{л}}(I)$. Здесь $\Delta U_{\text{л}}$ - падение напряжения на линии. Указанные функции от тока I построить для всего интервала определения (задания) тока. (Ток в линии не может быть больше значения тока короткого замыкания нагрузки). Отметить на графиках значения величин, соответствующих согласованному режиму работы цепи.

6. Уяснить, какие изменения графиков произойдут (см. п.6 следующего раздела), если вместо схемы рис.3.1 будет рассматриваться схема рис.3.2.

Таблица 3.1. Характеристики элементов схемы для исследований активного двухполюсника (рис.3.3 и рис.3.4).

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Номер схемы активного двухполюсника (рис.3.4)	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Номер элемента r_1	09	08	10	08	07	09	08	08	09	09	10	09
Номер элемента r_2	05	09	09	06	06	08	09	07	06	05	06	10
Номер резистора, моделирующего линию r_n	01	02	03	03	01	01	02	02	01	02	01	02
$E_2, В$	10	20	24	12	16	18	22	14	8	15	19	21

Таблица 3.2. Параметры активного двухполюсника

Исследуемые величины	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$E_1, В$	$E_2, В$	$U_{xx}, В$	$I_{кз}, мА$	$r_{вх}, Ом$
Расчёт (номиналы)							
Эксперимент							

Порядок выполнения работы

1. Не подключая источники E_1 и E_2 к схеме, измерить ЭДС E_1 (нерегулируемый источник постоянного напряжения) и установить заданное по варианту табл.3.1 значение E_2 (регулируемый источник постоянного напряжения). Данные измерений и установки ЭДС занести в табл.3.2.

2. Выбрать из лабораторного комплекта пассивных элементов сопротивления r_1 и r_2 в соответствии с табл.3.1. Данные занести в табл.3.2.

3. Собрать сначала рабочую схему рис.3.3 с активным двухполюсником по рис.3.4 (смотри при этом табл. 3.1). В качестве нагрузки r использовать комбинацию из последовательно включённых сопротивлений блока резисторов и регулируемого от 0 до 1000 Ом сопротивления R_4 блока регулируемых сопротивлений стенда.

4. Изменяя с помощью R_4 величину сопротивления r пассивного двухполюсника П от минимально возможного $r=0$ до максимально возможного $r=(6 \div 8) \cdot r_{вх}$, измерить несколько (не менее 10÷15) значений тока I , напряжения на входе линии U_1 и напряжения на выходе линии U_2 . Данные установки сопротивления и измеренных значений тока и напряжений занести в табл.3.3.

5. Для каждого значения r вычислить мощность P_1 на входе линии, мощность P_2 на выходе линии (на нагрузке), мощность $P_{вст}$, развиваемую

активным двухполюсником, КПД источника $\eta_{уст}$ и линии η . Расчётные данные занести в табл.3.3.

Таблица 3.3. Результаты исследований передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке.

№№ п/п	Эксперимент				Расчёт				
	r , Ом	I , мА	U_1 , В	U_2 , В	$P_{уст}$, Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	$\eta_{уст}$	η
1									
2									
-									
-									
n									

6. По данным табл.3.3 построить графики зависимостей $P_{уст}(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\eta_{уст}(I)$ и $\eta(I)$.

7. Сравнить графики п.4.6 с графиками, построенными по п.3.5 домашней подготовки и сделать вывод об эффективности передачи мощности от источника к приёмнику через линию передачи с точки зрения согласованного режима работы цепи.

8. Произвести исследование режима передачи мощности от активного двухполюсника А к пассивному П при непосредственной связи (то есть при $r_d = 0$). Выполнить исследования п. 4÷7 для схемы рис.3.3 с активным двухполюсником по схеме рис.3.4 (согласно варианту лабораторной работы) без сопротивления r_d . Результаты исследований занести в таблицу, подобную табл. 3.3.

9. Построить графики $P_{уст}(I)$, $P_1(I)$, $P_2(I)$, $\eta_{уст}(I)$ и $\eta(I)$ для данного исследования. Сделать выводы об отличии этих графиков от графиков, построенных по пункту 6.

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется активным двухполюсником?
2. Что называется пассивным двухполюсником?
3. Назвать основные параметры активного двухполюсника.
4. Каковы основные параметры пассивного двухполюсника?
5. Как, зная схему активного двухполюсника, вычислить его основные параметры?
6. Какие схемы замещения активного двухполюсника Вы знаете?
7. Как определяются параметры активного двухполюсника (источника) экспериментально?
8. При каком значении сопротивления пассивного двухполюсника, подключённого к активному, в нём будет выделяться максимальная мощность?

9. Каково значение коэффициента полезного действия активного двухполюсника (источника) в условиях передачи максимальной мощности нагрузке?

10. Построить и проанализировать графики зависимости выходной мощности и КПД линии связи между источником и приёмником электрической энергии от величины сопротивления нагрузки для двух случаев: а) источник идеальный ($r_{\text{ex}} = 0$); в) источник реальный (то есть $r_{\text{ex}} \neq 0$).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Исследование цепей синусоидального тока при последовательном и параллельном соединении элементов

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

Пояснения к работе

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

В активном элементе происходит необратимое преобразование электрической энергии в тепловую. Мгновенные значения тока $i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$ и напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \Psi_u) = I_m r \sin(\omega t + \Psi_i)$ связаны законом Ома: $u = i r$ и совпадают по фазе: $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$. (рис.4.1а). Последнее означает, что векторы напряжения и тока совпадают по направлению на векторной диаграмме (рис.4.1б), а закон Ома также справедлив для амплитудных и действующих значений тока и напряжения:

$$U_m = I_m r, \quad U = I r \quad (4.1).$$

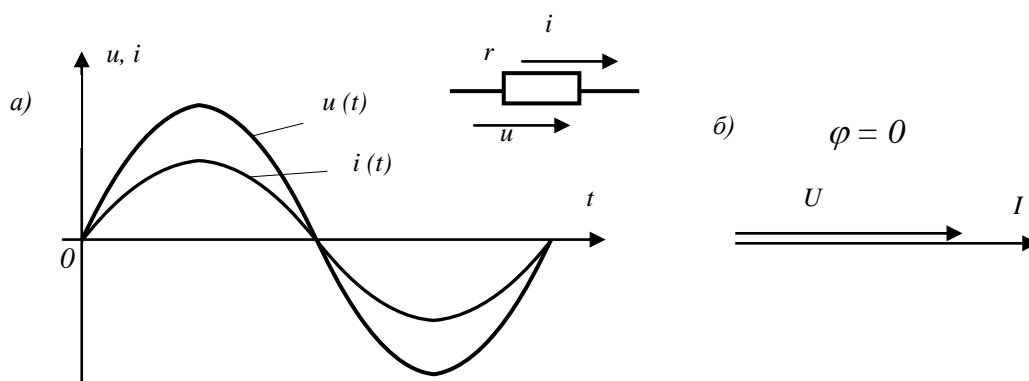


Рис. 4.1. Временная и векторная диаграммы тока и напряжения на активном элементе

В индуктивном элементе электрическая энергия источника преобразовывается в энергию магнитного поля катушки. Связь между мгновенными значениями тока $i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$ и напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \Psi_u) = I_m x_L \sin(\omega t + \Psi_i + \pi/2)$ определяется законом электромагнитной индукции: $u_L = L \cdot di/dt$, а напряжение на индуктивном элементе опережает ток по фазе на $\pi/2$: $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$ (рис.4.2а). Последнее означает, что вектор напряжения опережает вектор тока на $\pi/2$ (рис.4.2б).

Амплитудные и действующие значения тока и напряжения на индуктивности связаны законом Ома: $U_m = I_m x_L$, $U = I x_L$, (4.2)

где: $x_L = \omega L = 2\pi fL$ - индуктивное сопротивление элемента.

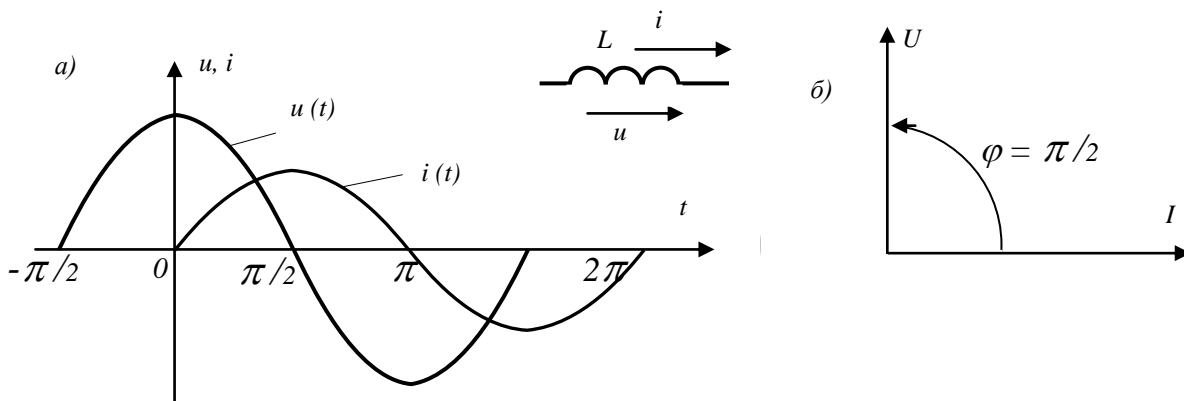


Рис. 4.2. Временная и векторная диаграммы тока и напряжения на индуктивном элементе

В ёмкостном элементе происходит преобразование электрической энергии источника в энергию электрического поля конденсатора. Связь между мгновенными значениями тока $i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i)$ и напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \Psi_u) = I_m x_c \sin(\omega t + \Psi_i - \pi/2)$ определяется выражением $i = C \cdot du/dt$, а напряжение на ёмкостном элементе отстает от тока по фазе на $\pi/2$: $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$. (рис.4.3а). Последнее означает, что вектор напряжения

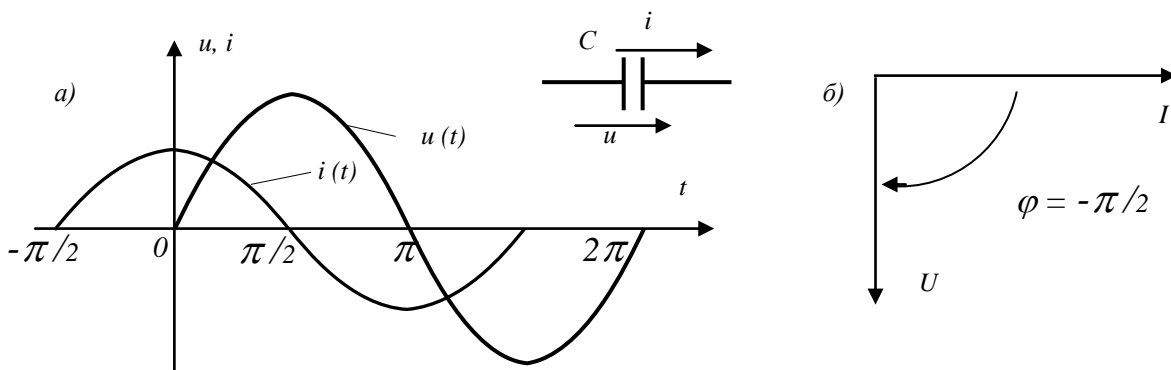


Рис. 4.3. Временная и векторная диаграммы тока и напряжения на ёмкостном элементе

отстает от вектора тока на $\pi/2$ (рис.4.3б).

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

$$U_m = I_m x_c, \quad U = I x_c, \quad (4.3)$$

где : $x_c = 1/\omega C = 1/2\pi fC$ - емкостное сопротивление элемента.

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.4.4,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.4.4,б) и может быть рассчитано по формуле :

$$U = \sqrt{U_r^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{(I r)^2 + (I x_L - I x_C)^2} = I Z \quad (4.4)$$

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

В общем случае при наличии в схеме нескольких однородных элементов их эквивалентные величины определяются по формулам :

$$r = \sum_{k=1}^n r_k = r_1 + r_2 + \dots + r_n;$$

$$x_L = \sum_{k=1}^n x_{Lk} = x_{L1} + x_{L2} + \dots + x_{Ln};$$

$$x_C = \sum_{k=1}^n x_{Ck} = x_{C1} + x_{C2} + \dots + x_{Cn}.$$

Полное сопротивление цепи Z , активное r и реактивное $x = x_L - x_C$ образуют треугольник сопротивлений (рис.4.4.в), для которого справедливы следующие соотношения:

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2}, \quad r = Z \cos \varphi, \quad x = Z \sin \varphi, \quad \varphi = \arctg x/r \quad (4.5)$$

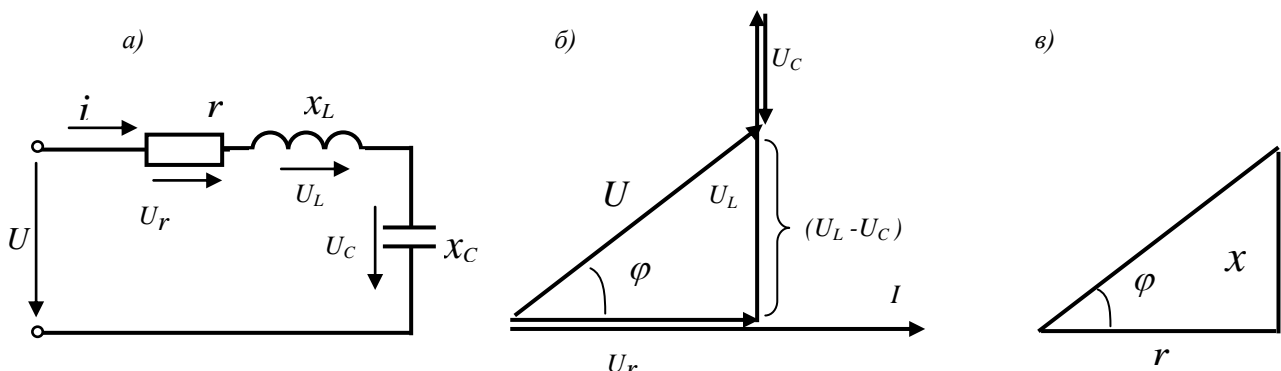


Рис. 4.4

При параллельном соединении активного r , индуктивного x_L и ёмкостного x_C сопротивлений (рис.4.5,а) мгновенное значение тока источника согласно первому закону Кирхгофа равно алгебраической сумме мгновенных значений токов, протекающих через отдельные элементы:

$$i = i_r + i_L + i_C$$

а действующее значение тока источника – векторной сумме действующих значений токов в отдельных элементах (рис.4.5б) и определяется формулой:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_r^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{(U \cdot g)^2 + (U \cdot b_L - U \cdot b_C)^2} = \\ &= U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = U \cdot Y, \end{aligned} \quad (4.6)$$

где : $g = 1/r$ – активная проводимость ;
 $b_L = 1/x_L$ – индуктивная проводимость ;
 $b_C = 1/x_C$ – ёмкостная проводимость ;
 $b = b_L - b_C$ – реактивная проводимость ;
 Y – полная проводимость цепи.

В общем случае при параллельном соединении нескольких однородных элементов их эквивалентные величины определяются по формулам:

$$\begin{aligned} g &= \sum_{k=1}^n g_k = g_1 + g_2 + \dots + g_n; \\ b_L &= \sum_{k=1}^n g_{Lk} = b_{L1} + b_{L2} + \dots + b_{Ln}; \\ b_C &= \sum_{k=1}^n g_{Ck} = b_{C1} + b_{C2} + \dots + b_{Cn}. \end{aligned}$$

Полная проводимость цепи Y , активная g и реактивная b проводимости составляют прямоугольный треугольник (треугольник проводимостей рис.4.5,в), для которого справедливы следующие соотношения:

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad g = Y \cos \varphi, \quad b = Y \sin \varphi, \quad \varphi = \arctg b/g \quad (4.7)$$

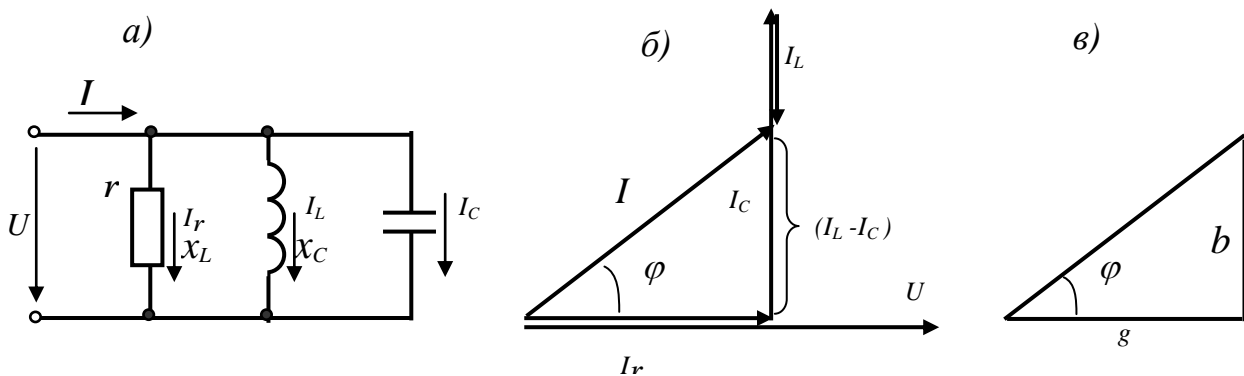


Рис. 4.5

Домашняя подготовка к работе

1. В соответствии с номером варианта выбрать рабочую схему с последовательным соединением элементов (рис.4.6). Из табл.4.1 согласно варианту выбрать элементы рабочей схемы.

Таблица 4.1. Номера элементов схемы

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Номер элемента									
r_1	01	02	03	01	02	01	02	03	03	04
r_2	02	03	04	03	04	04	01	02	01	03
L_1	23	24	25	27	23	24	26	27	26	25
L_2	24	25	26	26	25	26	23	25	25	24
C_1	15	16	17	15	16	16	18	17	18	19
C_2	16	17	18	17	18	15	16	16	17	17

2. Рассчитать сопротивления выбранных элементов при частоте 1 кГц, результаты расчета занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Расчетные сопротивления элементов

Обозначение элемента в схеме	r_1	r_2	L_1	L_2	C_1	C_2
Номер элемента						
Сопротивление элемента, Ом						

3. Для рабочей схемы с последовательным соединением рассчитать полное сопротивление цепи, ток и напряжения на участках цепи. Напряжение источника принять равным 20 В ($f=1$ кГц). Выполнить построение векторной диаграммы напряжений. Результаты расчёта занести в табл.4.3.

Таблица 4.3. Результаты для схемы с последовательным соединением.

	I , мА	U_{12} , В	U_{13} , В	U_{14} , В	U_{15} , В	U_{34} , В	U_{46} , В
Вычислено							
Измерено							

4. В соответствии с номером варианта выбрать рабочую схему с параллельным соединением элементов (рис.4.7). Из табл. 4.4 согласно варианту выбрать элементы рабочей схемы.

5. Рассчитать проводимости выбранных элементов при частоте 1 кГц, результаты расчета занести в табл. 4.5.

Таблица 4.4. Номера элементов схемы

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Номер элемента									
r_1	04	05	06	04	04	05	05	07	06	06
r_2	05	06	07	06	07	04	07	05	05	04
L_1	27	28	27	28	27	29	29	28	27	29
L_2	28	29	29	27	26	28	27	29	29	27
C_1	12	12	12	13	13	14	13	14	14	15
C_2	13	14	15	14	15	15	12	12	13	14

Таблица 4.5. Расчетные проводимости элементов

Обозначение элемента в схеме	r_1	r_2	L_1	L_2	C_1	C_2
Номер элемента						
Проводимость элемента, 1/Ом						

6. Для рабочей схемы с параллельным соединением рассчитать полную проводимость цепи и токи на участках цепи. Напряжение источника принять равным 5 В ($f=1$ кГц). Выполнить построение векторной диаграммы токов. Результаты расчёта занести в табл.4.6.

Таблица 4.6. Результаты для схемы с параллельным соединением.

	I , мА	I_{25} , мА	I_{35} , мА	I_3 , мА	I_{45} , мА	I_4 , мА	I_5 , мА
Вычислено							
Измерено							

Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему с последовательным соединением элементов. Установить напряжение $U = 20$ В при частоте $f=1$ кГц (использовать блок источников переменного напряжения).

2. Выполнить измерения напряжений и тока. Результаты измерений занести в табл.4.3. Сопоставить расчётные и экспериментальные значения величин и сделать выводы.

3. Собрать рабочую схему с параллельным соединением элементов. Установить напряжение $U = 5$ В при частоте $f=1$ кГц (использовать блок источников переменного напряжения).

4. Выполнить измерения токов различных участков цепи. Результаты измерений занести в табл.4.6. Сопоставить расчётные и экспериментальные значения величин и сделать выводы.

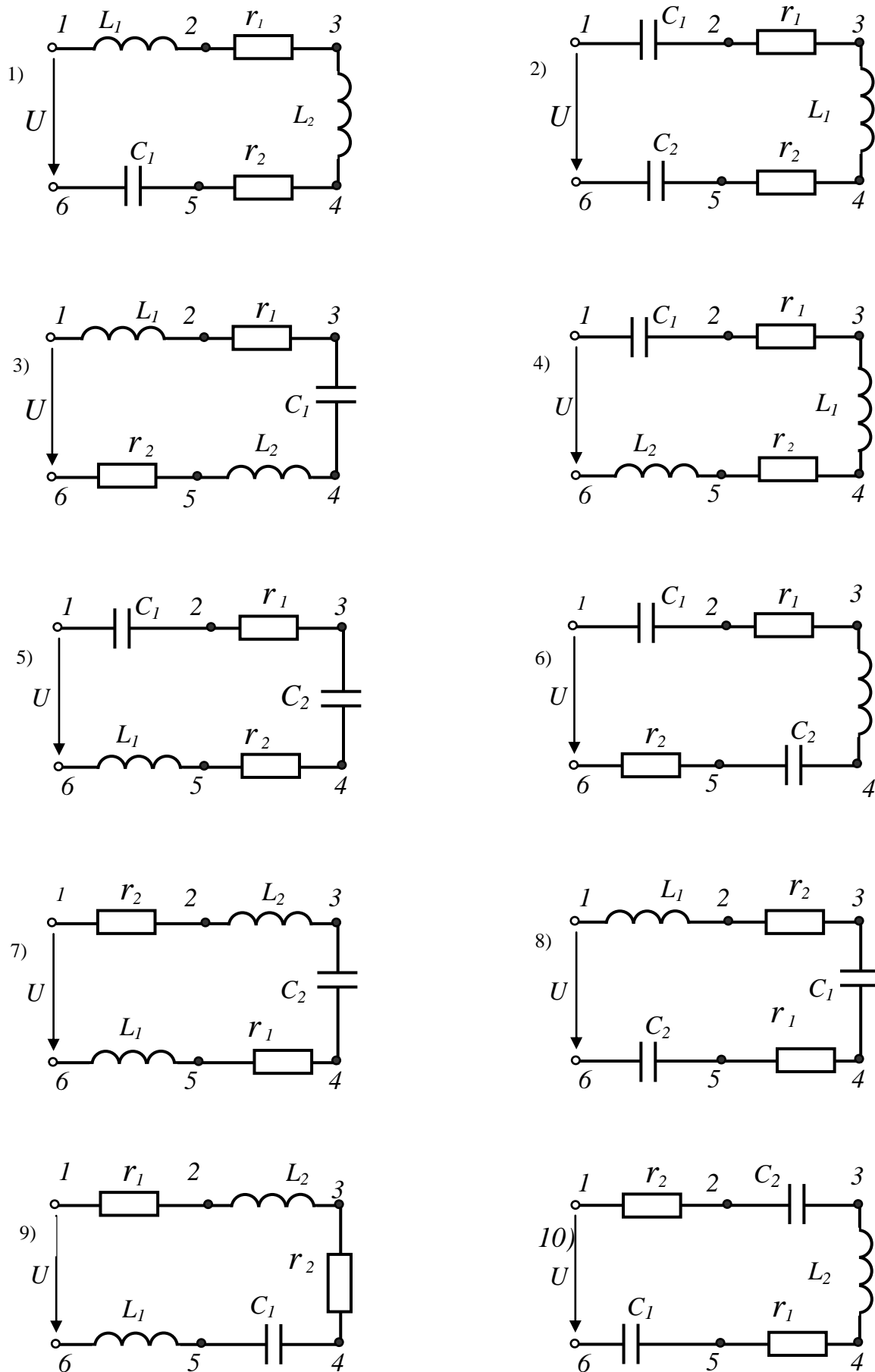


Рис.4.6. Схемы для исследований последовательного соединения

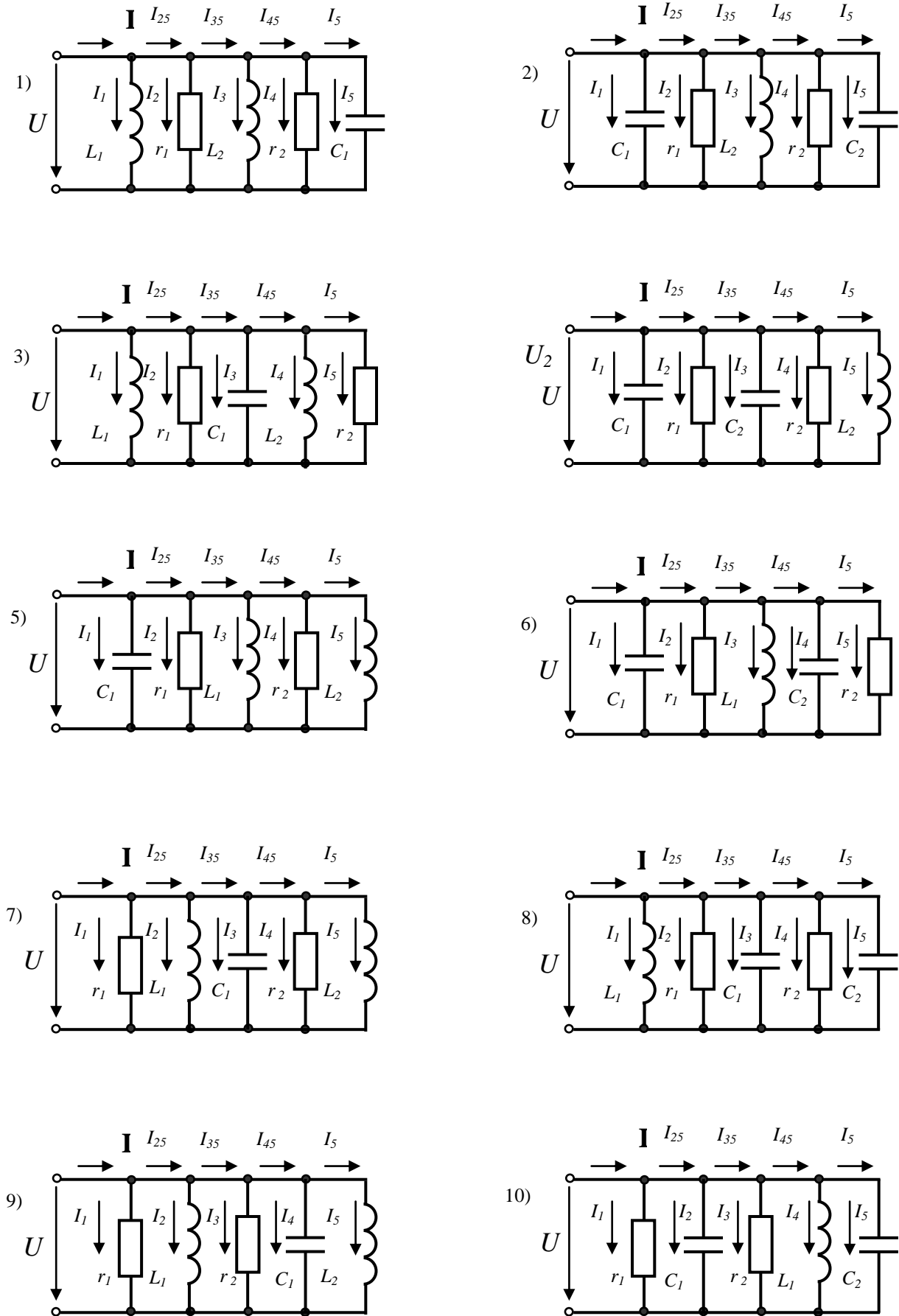


Рис.4.7. Схемы для исследований параллельного соединения

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 изменяется ток в схеме при последовательном соединении цепи r, L, C , если уменьшать ёмкость конденсатора?
5. Как изменится ток в общей части цепи при параллельном соединении r, L, C , если увеличить индуктивность катушки?
6. Каков порядок построения векторной диаграммы цепи при последовательном соединении элементов?
7. Каков порядок построения векторной диаграммы цепи при параллельном соединении элементов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Исследование разветвленных цепей синусоидального тока

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

Пояснения к работе

Состояние электрической цепи определяется различными факторами: активной и реактивной мощностями, токами в ветвях, напряжениями на элементах цепи и пр. Ответы на эти вопросы можно получить по результатам расчета и по результатам экспериментальных исследований.

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 метод комплексных амплитуд, который иначе называется символическим.

Метод проводимостей основан на эквивалентных преобразованиях электрических цепей при последовательном и параллельном соединениях: преобразовании последовательно соединённых активного и реактивного элементов в параллельное и наоборот.

При расчёте используют соотношения, вытекающие из векторной диаграммы, 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, комплексы напряжений, комплексы токов, комплексы 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 фигурировать в комплексной форме:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}, \quad \sum \underline{I} = 0, \quad \sum \underline{I} \cdot \underline{Z} = \sum \underline{E}. \quad (5.1)$$

В качестве примера рассмотрим расчёт токов в схеме рис.5.1 при напряжении источника $U=15$ В и частоте 1 кГц. Параметры схемы представлены в табл.5.1.

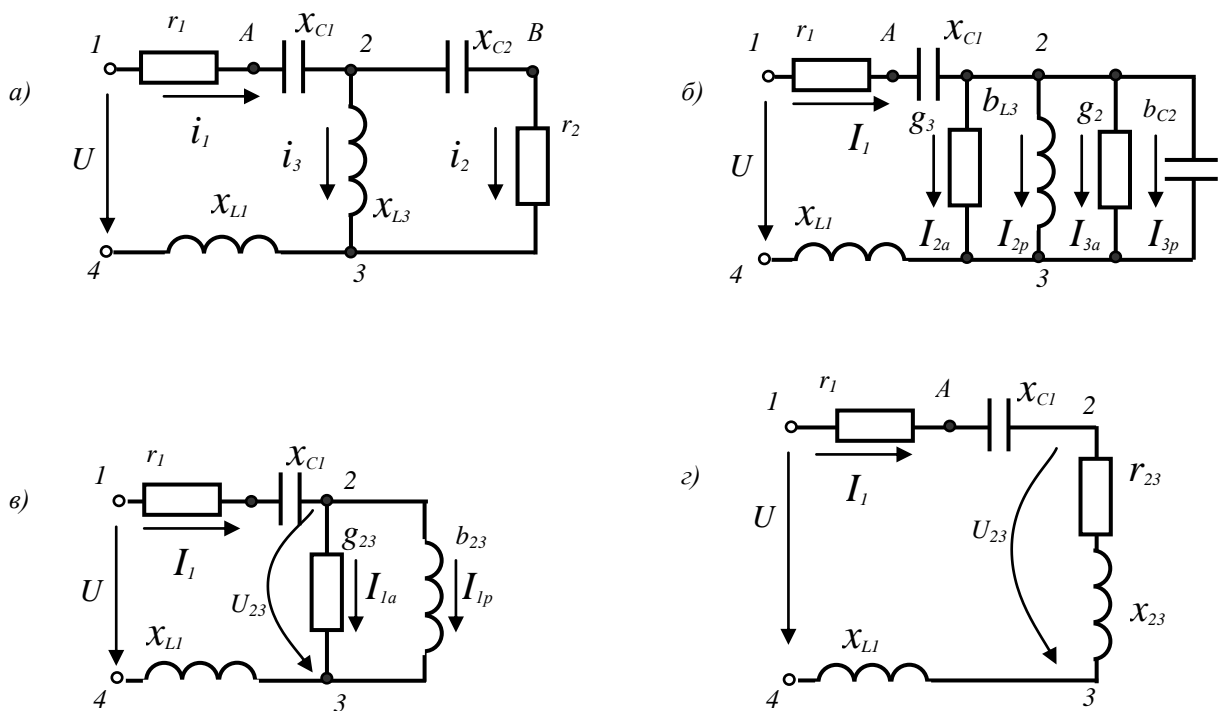


Рис. 5.1.

Таблица 5.1. Характеристика элементов схемы рис.5.1

Обозначения в схеме	r_1	x_{C1}	x_{L1}	$r_2, Ом$	x_{C2}	x_{L3}
Номер элемента	06	16	28	05	15	27
Номинальная величина	300 Ом	1,25 мкФ	50 мГн	200 Ом	1,0 мкФ	30 мГн
Сопротивление при $f=1кГц$, Ом	300	127	314	200	159	188

Расчёт с использованием метода проводимостей выполняем в следующем порядке:

1. В параллельно включённых ветвях исходной схемы заменим последовательные соединения элементов эквивалентными параллельными ветвями (рис.5.1б) :

$$g_2 = \frac{r_2}{z_2^2} = \frac{r_2}{r_2^2 + x_{C2}^2} = \frac{200}{200^2 + 159^2} = 0,00306 \text{ См} ,$$

$$b_{C2} = \frac{x_{C2}}{z_2^2} = \frac{x_{C2}}{r_2^2 + x_{C2}^2} = \frac{159}{200^2 + 159^2} = 0,00244 \text{ См} ,$$

$$g_3 = 0, \quad b_{L3} = \frac{x_{L3}}{z_3^2} = \frac{I}{x_{L3}} = \frac{1}{188} = 0,00532 \text{ См} .$$

2. Объединим параллельно включенные ветви, имеющие однородный характер (активные и реактивные), и получим схему рис.5.1в

$$g_{23} = g_2 + g_3 = 0,00306 + 0 = 0,00306 \text{ См} ;$$

$$b_{23} = b_{L3} - b_{C2} = 0,00532 - 0,00244 = 0,00288 \text{ См} ; \text{ (индуктивный характер)}$$

$$y_{23} = \sqrt{g_{23}^2 + b_{23}^2} = \sqrt{0,00306^2 + 0,00288^2} = 0,00420 \text{ См} .$$

3. Выполним эквивалентную замену параллельных ветвей последовательной ветвью (рис.5.1г)

$$r_{23} = g_{23} / y_{23}^2 = 0,00306 \cdot 238^2 = 173 \text{ Ом}, \quad x_{23} = b_{23} / y_{23}^2 = 0,00288 \cdot 238^2 = 163 \text{ Ом}$$

(x_{23} имеет индуктивный характер, так как $b_{L3} > b_{C2}$)

$$z_{23} = 1 / y_{23} = 1 / 0,0042 = 238 \text{ Ом}.$$

4. Определяем полное сопротивление цепи (рис.5.1г):

$$z = \sqrt{(r_1 + r_{23})^2 + (x_{L1} + x_{23} - x_{C1})^2} = \sqrt{(300 + 173)^2 + (314 + 163 - 127)^2} = 588 \text{ Ом}.$$

5. Вычисляем ток в неразветвлённой части цепи:

$$I_1 = \frac{U}{Z} = \frac{15}{588} = 0,0255 \text{ A} = 25,5 \text{ mA.}$$

Или иначе : $I_{1a} = U \cdot g_{23}$, $I_{1p} = U \cdot b_{23}$, $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$

6. Находим напряжения на отдельных участках электрической цепи:

$$U_{1A} = I_1 \cdot r_1 = 0,0255 \cdot 300 = 7,65 \text{ В}, \quad U_{A2} = I_1 \cdot x_{C1} = 0,0255 \cdot 127 = 3,24 \text{ В},$$

$$U_{23} = I_1 \cdot Z_{23} = 0,0255 \cdot 238 = 6,07 \text{ В}, \quad U_{34} = I_1 \cdot x_{L1} = 0,0255 \cdot 314 = 8,01 \text{ В}.$$

7. Определяем активные, реактивные и полные токи в ветвях:

$$I_{2a} = U_{23} \cdot g_2 = 6,07 \cdot 0,00306 = 0,0186 \text{ A}, \quad I_{2p} = U_{23} \cdot b_{C2} = 6,07 \cdot 0,00244 = 0,0148 \text{ A},$$

$$I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2p}^2} = \sqrt{0,0186^2 + 0,0148^2} = 0,0238 \text{ A},$$

$$I_3 = I_{3p} = U_{23} \cdot b_{L3} = 6,07 \cdot 0,00532 = 0,00323 \text{ A}.$$

На рис.5.2 представлена векторная диаграмма электрической цепи рис.5.1. Построение векторной диаграммы начинаем с вектора напряжения U_{23} , положение которого может быть произвольным. Остальные векторы напряжений и токов имеют строго определённые положения относительно

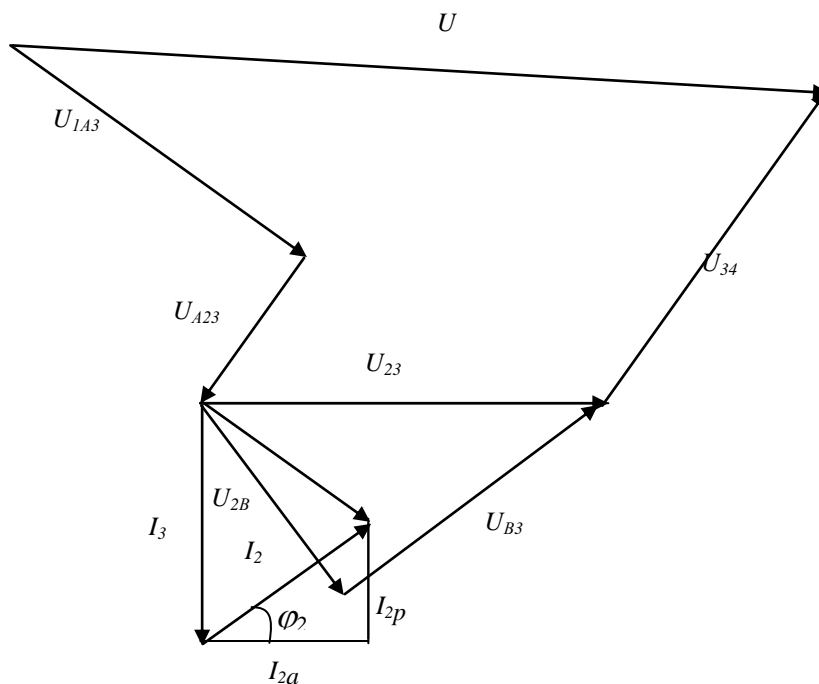


Рис. 5.2. Векторная диаграмма цепи

выбранного вектора U_{23} .

Далее выполняется построение векторной диаграммы токов. Вектор тока I_3 отстаёт по фазе (повернут по часовой стрелке) на 90° от вектора напряжения U_{23} вследствие индуктивного характера сопротивления третьей ветви. Ток I_2 имеет активно-емкостный характер, поэтому его вектор опережает (повернут против часовой стрелки) на угол $\varphi_2 = \arctg x_{C2}/r_2$ вектор напряжения U_{23} . Построение вектора тока I_2 может быть выполнено по составляющим: активная составляющая I_{2a} совпадает с напряжением U_{23} , реактивная (емкостная) составляющая I_{2p} опережает U_{23} на 90° .

Ток в неразветвлённой части цепи согласно первому закону Кирхгофа равен векторной сумме токов в параллельно включённых ветвях: $\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3$.

Построение векторов напряжения U_{A2} , U_{1A} , U_{34} осуществляем относительно вектора тока I_1 . По отношению к току I_1 вектор $U_{A2} = I_1 x_{C1}$ (напряжение на емкости) отстаёт на 90° , $U_{1A} = I_1 r$ (напряжение на активном сопротивлении) совпадает, а U_{34} (напряжение на индуктивном элементе) опережает на 90° . Согласно второму закону Кирхгофа в комплексной форме: $\underline{U} = \underline{U}_{34} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{A2} + \underline{U}_{1A}$, а $\underline{U}_{23} = \underline{U}_{B3} + \underline{U}_{2B}$, причем $U_{B3} = I_2 r_2$ совпадает с током I_2 , а $U_{2B} = I_2 x_{C2}$ отстаёт от этого тока на 90° .

При построении векторных диаграмм сложение векторов токов и напряжений согласно законам Кирхгофа производим в любой последовательности, однако, если требуется совместить векторную и топографическую диаграммы, то сложение векторов напряжений производится строго в той же последовательности, в которой они находятся на схеме. И каждый вектор напряжения на диаграмме определяет положение комплексных потенциалов соответствующих узлов схемы, причём конец вектора указывает положение той точки, которая в индексации напряжения стоит первой.

Расчёт схемы рис.5.1 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

$\underline{U} = U = 15$ В (напряжение источника направляем по вещественной оси),

$$\underline{z}_1 = \underline{z}_1^I + \underline{z}_1^{II} = r_1 - j x_{C1} + j x_{L1} = 300 - j127 + j314 = 300 + j187 \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_2 = r_2 - j x_{C2} = 200 - j159 \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_3 = j x_3 = j188 \text{ Ом}.$$

Схема имеет вид, представленный на рис. 5.3.

2. Определяем комплекс входного сопротивления :

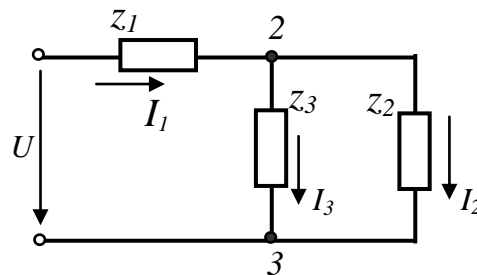


Рис. 5.3.

$$\underline{z}_{23} = \frac{\underline{z}_2 \cdot \underline{z}_3}{\underline{z}_2 + \underline{z}_3} = \frac{(200 - j159) \cdot j188}{200 - j159 + j188} = 173 + j163 = 238 e^{j43^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{z}_{\text{ex}} = \underline{z}_1 + \underline{z}_{23} = 300 + j187 + 173 + j163 = 473 + j350 = 588 e^{j36,6^\circ} \text{ Ом}$$

3. Согласно закону Ома в комплексной форме определяем ток в общей части цепи :

$$\underline{I}_1 = \frac{U}{\underline{Z}_{\text{ex}}} = 0,0205 - j0,0152 = 0,0255 e^{-j36,6^\circ} \text{ А.}$$

4. Определяем комплекс напряжения на участке 2-3 и токи в параллельных включённых ветвях:

$$\underline{U}_{23} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{23} = (0,0205 - j0,0152)(173 + j163) = 6,03 + j0,71 = 6,07 e^{j6,7^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_2} = \frac{6,03 + j0,71}{200 - j159} = 0,0168 + j0,0169 = 0,0238 e^{j45,2^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_3} = \frac{6,03 + j0,71}{j188} = 0,0038 - j0,0321 = 0,0323 e^{-j83,3^\circ} \text{ А.}$$

5. Напряжения на различных участках цепи :

$$\underline{U}_{1A} = \underline{I}_1 \cdot r_1 = (0,0205 - j0,0152) \cdot 300 = 6,15 - j4,56 = 7,66 e^{-j36,6^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_{A2} = \underline{I}_1 (-j x_{C1}) = (0,0205 - j0,0152)(-j127) = -1,93 - j2,6 = 3,24 e^{-j126,6^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_{23} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{23} = (0,0205 - j0,0152)(173 + j163) = 6,03 + j0,71 = 6,07 e^{j6,7^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_{34} = \underline{I}_1 j x_{L1} = (0,0205 - j0,0152) \cdot j314 = 4,77 + j6,44 = 8,02 e^{j53,4^\circ} \text{ В}$$

6. Напряжение между точками А и В :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_{A2} + \underline{I}_2 (-j x_{C2}) = -1,93 - j2,6 + (0,0168 + j0,0169)(-j159) = \\ &= -1,93 - j2,6 - j2,67 + 2,69 = 0,76 - j5,27 = 5,32 e^{-j81,8^\circ} \text{ В} \end{aligned}$$

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.5.3 выбрать рабочую схему (номер варианта соответствует номеру схемы) и по табл.5.2 выбрать номера элементов, используемых в схеме. Рассчитать сопротивления элементов при частоте $f=1$ кГц. Данные занести в таблицу 5.3.

3. Используя метод проводимостей, рассчитать напряжения и токи в схеме рис.5.3 при напряжении источника $U=15$ В. Результаты расчёта занести в табл.5.4.

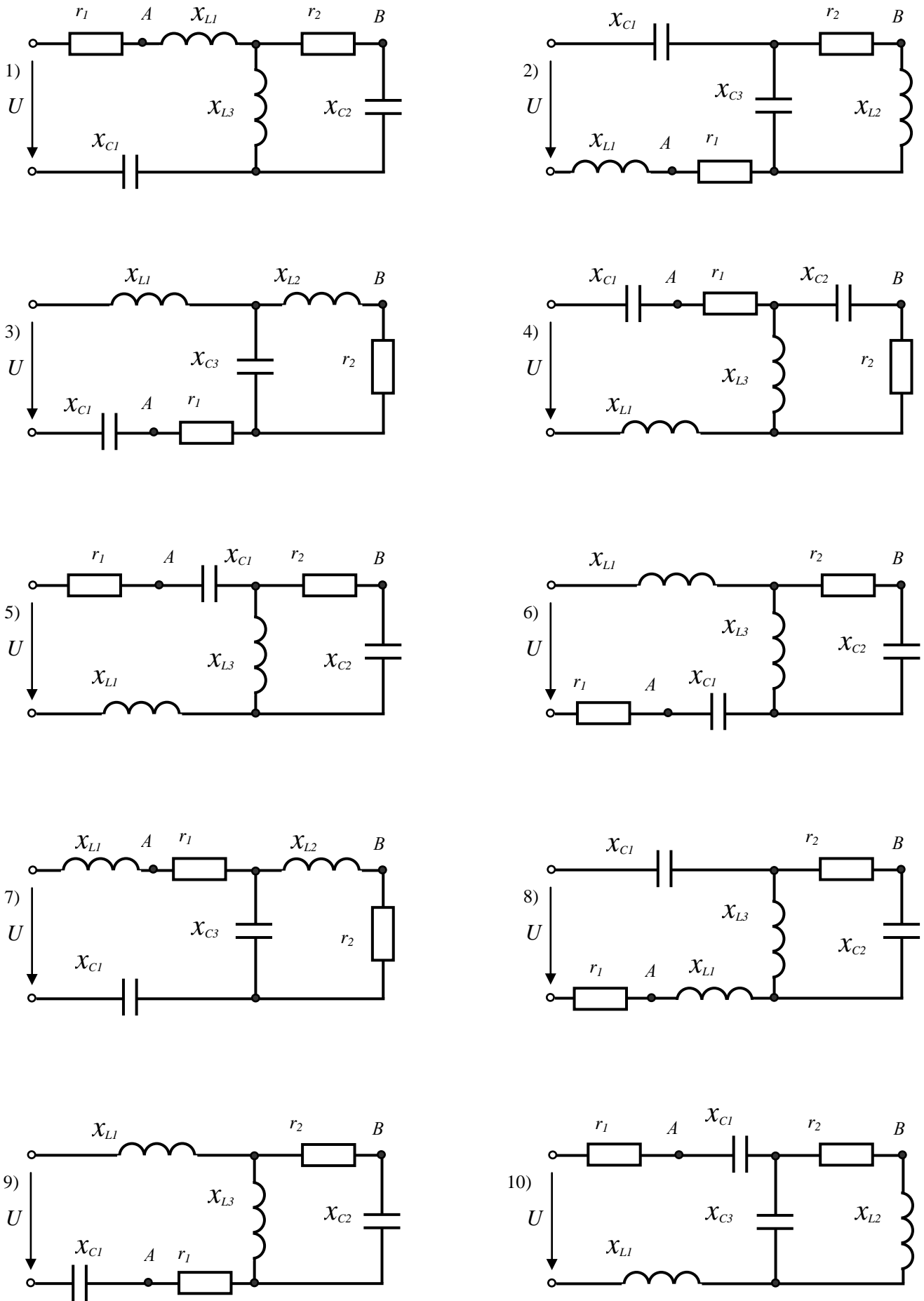


Рис. 5.3. Схемы для исследований

Порядок выполнения работы

1. Собрать рабочую схему рис.5.3 и установить напряжение источника $U=15$ В.

2. Измерить напряжения и токи в рабочей схеме, результаты измерений занести в табл.5.4. Сравнить экспериментальные величины с расчётными, полученными согласно методу проводимостей и символическому методу и сделать выводы.

3. Собрать эквивалентную схему с последовательным включением элементов r_{23} , x_{23} (L_{23} или C_{23} , использовать блоки переменных активных, индуктивных или ёмкостных элементов). При напряжении источника $U=15$ В измерить напряжения и токи в этой схеме. Результаты измерений занести в табл.5.5. Сделать выводы.

Таблица 5.5. Результаты экспериментальных исследований.

U , В	I_1 , мА	U_{1A} , В	U_{A2} , В	U_{23} , В	U_{34} , В

Вопросы для самоконтроля

1. Какова последовательность расчёта цепей синусоидального тока методом проводимостей?

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

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

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

6. Как заменить в электрической цепи синусоидального тока параллельно включённые ветви одной эквивалентной ветвью?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

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 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. 6.1а) возникает резонанс напряжений. Этот режим цепи имеет место при условии:

$$x_L = x_C, \quad x = x_L - x_C = 0 \quad \text{или} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (6.1)$$

Напряжения на индуктивности и емкости при резонансе равны по величине и противоположны по фазе, а напряжение на резистивном элементе равно напряжению источника (рис. 6.1б) .

Из условия (6.1) следует, что резонанс достигается изменением

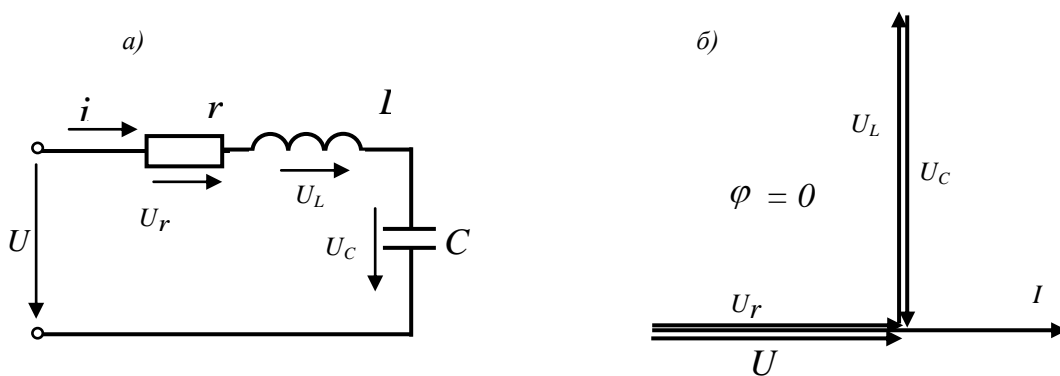


Рис.6.1. Схема (а) и векторная диаграмма (б) цепи при резонансе напряжения

параметров цепи: индуктивности или емкости, либо частоты напряжения источника питания. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной угловой частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (6.2)$$

Индуктивное и емкостное сопротивления при резонансе называются характеристическим сопротивлением:

$$\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (6.3)$$

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

$$U = I z = I r \quad (6.4)$$

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

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho I}{r I} = \frac{\rho}{r} \quad (6.5)$$

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

На рис.6.2 приведены частотные характеристики и резонансные кривые последовательного контура r , L , C . Для их построения использованы формулы:

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

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

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

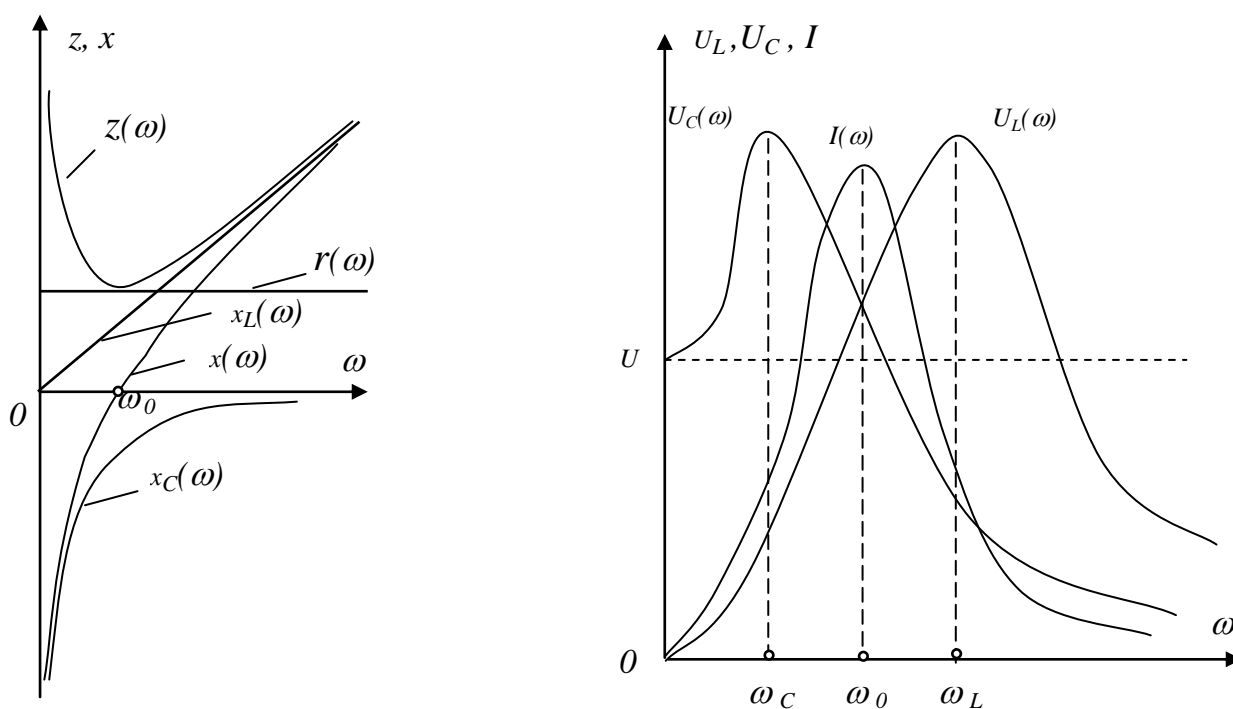


Рис. 6.2. Частотные характеристики и резонансные кривые цепи

Как следует из графиков (рис.6.2б), максимум тока наблюдается при резонансной частоте ω_0 , а максимумы напряжений U_L и U_C соответственно при частотах ω_L и ω_C :

$$\omega_L = \omega_0 \sqrt{\frac{2Q^2}{2Q^2 - 1}}, \quad \omega_C = \omega_0 \sqrt{\frac{2Q^2 - 1}{Q^2}} \quad (6.7)$$

В цепи с двумя параллельными ветвями, содержащими индуктивности и емкости (рис.6.3а), резонанс наступает при равенстве нулю входной проводимости :

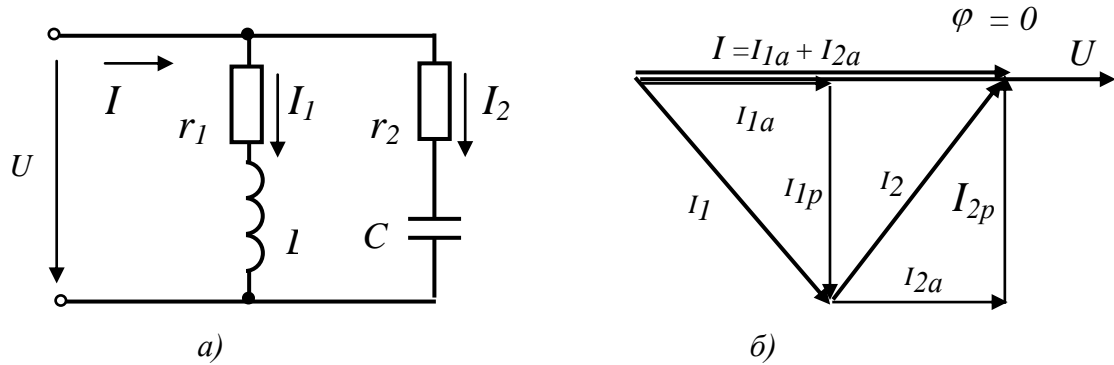


Рис.6.3 Схема (а) и векторная диаграмма (б) цепи при резонансе

$$b = b_{L1} - b_{C2} = 0, \quad b_{L1} = b_{C2}$$

$$\text{где } b_1 = \frac{\omega L}{r_1^2 + (\omega L)^2}, \quad b_2 = \frac{1}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (6.8)$$

В этом случае реактивные составляющие токов I_{1p} и I_{2p} равны по величине и противоположны по фазе (рис.6.3б). Величины токов в ветвях I_1 и I_2 могут значительно превысить ток в общей 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 ω .

Решение указанного соотношения относительно ω , дает значение для резонансной частоты:

$$\omega_0^I = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - r_1^2}{\frac{L}{C} - r_2^2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - r_1^2}{\rho^2 - r_2^2}} \quad (6.9)$$

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

При $r_1 = r_2 = 0$, получаем:

$$\omega_0^I = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

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.

Домашняя подготовка к работе

1. Используя данные табл.6.1, рассчитать индуктивность и емкость последовательного контура r , L , C . Данные расчета занести в табл.6.2.

Таблица 6.1. Исходные данные для расчета.

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

2. При напряжении сети $U = 5$ В, рассчитать ток I_0 , напряжения на индуктивности U_{L0} и емкости U_{C0} при резонансной частоте f_0 , а также определить частоты, при которых напряжения на индуктивности и емкости достигают максимальных величин. Полученные результаты занести в табл.6.3.

Таблица 6.2. Результаты расчета.

r , Ом	L , мГн	C , мкФ

Таблица 6.3. Результаты расчета и эксперимента.

Исследуемые величины	f_0 , кГц	I_0 , мА	U_{C0} , В	U_{L0} , В	f_L , кГц	f_C , кГц
Расчет						
Эксперимент						

3. Для параллельного контура рис.6.3, используя те же реактивные элементы L и C , что и в последовательном контуре, при $U = 5$ В и $r_1 = r_2 = 100$ Ом, рассчитать резонансную частоту и токи в ветвях при резонансе токов. Результаты расчета занести в табл.6.4.

Таблица 6.4. Результаты расчета и эксперимента.

Исследуемые величины	f_0 , кГц	I_1 , мА	I_2 , мА	I , мА
Расчет				
Эксперимент				

Порядок выполнения работы

1. В соответствии с номером варианта собрать схему рис.6.1а с последовательным соединением элементов r , L и C . Установить напряжение источника $U=5В$ и, изменяя частоту от 1 до 9 кГц, снять резонансные кривые $I(\omega)$, $U_L(\omega)$, $U_C(\omega)$. Результаты измерений занести в таблицу 6.5.

Таблица 6.5. Результаты измерений.

f , кГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I , мА									
U_L , В									
U_C , В									

2. По данным табл.6.5 построить графики зависимостей $I(\omega)$, $U_L(\omega)$, $U_C(\omega)$. Определить частоты, при которых ток и напряжение достигают максимальных величин, а также числовые значения этих максимумов. Данные экспериментальных исследований занести в табл.6.3. Сопоставить результаты расчета и эксперимента и сделать выводы.

3. Собрать схему рис.6.3а с параллельным резонансным контуром, используя те же реактивные элементы L и C , что и в последовательном контуре и $r_1 = r_2 = 100$ Ом. Установить напряжение источника $U=5В$ и, изменяя частоту от 1 до 9 кГц, снять резонансные кривые $I(\omega)$, $I_1(\omega)$, $I_2(\omega)$. Данные экспериментальных исследований занести в табл.6.6.

Таблица 6.6. Результаты измерений.

f , кГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I , мА									
I_1 , мА									
I_2 , 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.6.4. 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 № 7

Исследование явления взаимной индуктивности и неразветвленных цепей с индуктивно связанными элементами

Цель работы:

- экспериментальное определение параметров реальных катушек, имеющих индуктивную связь, нахождение их одноимённых зажимов и величины коэффициента связи;

- проверка расчетных соотношений, справедливых для последовательного и параллельного соединения элементов.

Пояснения к работе

Два элемента называют индуктивно связанными, если при изменении тока в одном элементе, в другом наводится ЭДС взаимной индукции. Можно дать и такое определение: два элемента называются индуктивно связанными, если у них весь магнитный поток или его часть являются общими.

В этом случае, кроме обычных r, x, z параметров, катушки характеризуют взаимной индуктивностью $M_{12} = M_{21} = M$ (сопротивлением $X_M = \omega M$), которая может быть рассчитана по данным первого или второго эксперимента лабораторной работы:

$$M = \frac{E_{2M} = U_{2x}}{\omega \cdot I_1}; \quad M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega}.$$

Взаимную индуктивную связь катушек можно характеризовать и коэффициентом связи, который определяется соотношениями:

$$K_{св} = \sqrt{\frac{\Phi_{1M}}{\Phi_{1M} + \Phi_{1S}} \cdot \frac{\Phi_{2M}}{\Phi_{2M} + \Phi_{2S}}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} = \frac{X_M}{\sqrt{X_1 \cdot X_2}} < 1.$$

В этой формуле Φ_{1M}, Φ_{2M} – основные магнитные потоки, созданные первым и вторым элементом, соответственно;

Φ_{1S}, Φ_{2S} – потоки рассеяния индуктивно-связанных элементов;

L_1 и L_2 – индуктивности самоиндукции элементов;

X_1, X_2, X_M – соответствующие реактивные сопротивления.

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

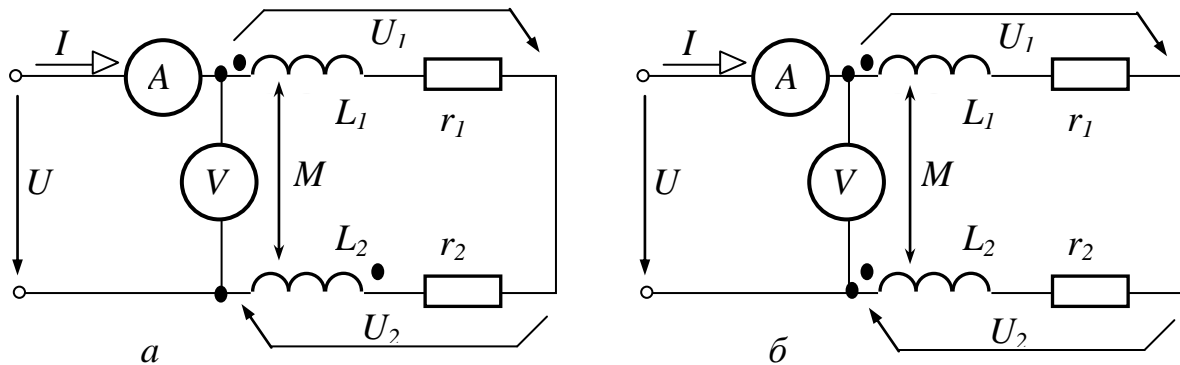


Рис. 7.1. Схемы согласного и встречного включения катушек

«концы» обмоток. Одноимённые зажимы определяются экспериментально для каждой пары катушек отдельно. В нашей лабораторной работе это можно сделать по результатам второго эксперимента, когда станут известны сопротивления при согласном $X_{\text{согл}}$ и при встречном $X_{\text{встр}}$ включении катушек.

Индуктивно связанные катушки при последовательном соединении могут быть включены согласно (рис. 7.1а) или встречно (рис. 7.1б). При согласном включении катушек ток относительно одноименных зажимов всегда 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.

Расчёт выполняется по закону Ома, с учётом знака сопротивления $\pm X_M$:

$$Z_{\text{ex}} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (X_1 + X_2 \pm 2X_M)^2}; \quad Z_{\text{согл}} > Z_{\text{встр}};$$

$$I = U/Z_{\text{ex}}; \quad U_{\text{кат}} = \sqrt{r_k^2 + (X_k \pm X_M)^2} \cdot I.$$

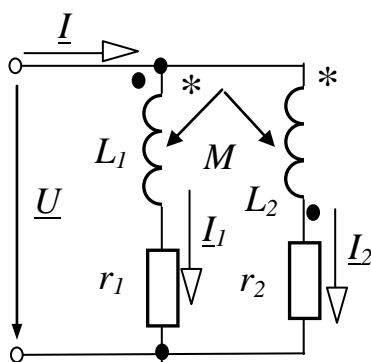


Рис. 7.2. Схема параллельного включения катушек

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

Расчёт сложных цепей, трансформаторных схем, цепей со смешанным соединением элементов при

наличии индуктивных связей удобнее выполнять в комплексной форме.

При параллельном включении катушек (рис. 7.2) составленная по законам Кирхгофа система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2, \\ \underline{Z}_1 \underline{I}_1 \pm \underline{Z}_M \underline{I}_2 = \underline{U}, \\ \pm \underline{Z}_M \underline{I}_1 + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 = \underline{U}. \end{cases}$$

Решение системы

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{Z}_2 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} \underline{U}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} \underline{U},$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} \underline{U}.$$

Таким образом, входное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}.$$

Здесь в формулах верхний знак для случая обозначения одноименных зажимов “*” (согласное включение) и нижний – для “•” (встречное включение). Как видно из полученной формулы, знаменатель при согласном включении меньше, следовательно, сопротивление цепи больше, а ток меньше, чем при встречном включении.

Домашняя подготовка к работе

1. Вычертить схемы рис. 7.1 – 7.3, таблицы для экспериментального

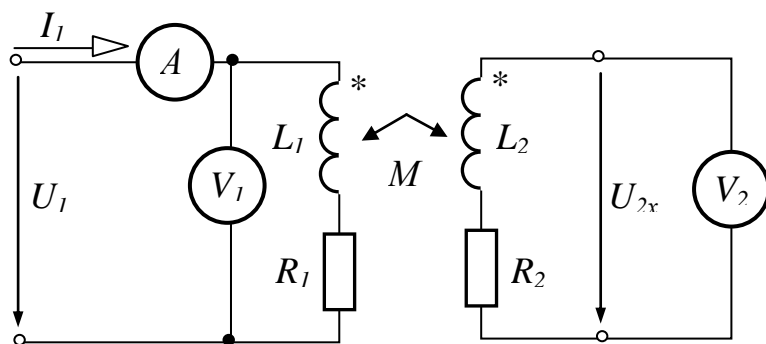


Рис. 7.3. Схема для определения параметров первой катушки и коэффициента взаимной индукции

определения параметров катушек и коэффициента взаимной индукции. Уяснить методики маркировки одноименных зажимов индуктивно связанных катушек и определения взаимной индуктивности M .

2. Изучить порядок построения векторных диаграмм цепи при

последовательном и параллельном включении катушек.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для определения параметров катушек – рис. 7.3.

Подключая каждую из катушек к регулируемому источнику постоянного напряжения $U_0 = 1-2$ В, а затем к источнику синусоидального напряжения $U_{\sim} = 10-20$ В частотой 50 Гц, произвести измерения и результаты занести в

табл. 7.1. По измеренным величинам рассчитать и также внести в таблицу сопротивления и индуктивности катушек, их взаимную индуктивность и коэффициент связи. Расчеты выполняются по формулам:

$$r = \frac{U_0}{I_0}; \quad Z = \frac{U}{I}; \quad X = \sqrt{Z^2 - r^2}; \quad L = \frac{X}{\omega}; \quad X_M = \frac{U_x}{I}; \quad M = \frac{X_M}{\omega};$$

$$K_{св} = \frac{X_M}{\sqrt{X_1 \cdot X_2}}.$$

Таблица 7.1. Экспериментальное определение параметров индуктивно связанных катушек.

Экспериментальные и расчетные величины	U_0 , В	I_0 , мА	r , Ом	U , В	I , мА	U_x , В	Z , Ом	X , Ом	L , Ом	X_M , Ом	M , мГн	$K_{св}$
Первая катушка												
Вторая катушка												

2. Собрать схему рис. 7.1а, установить напряжение источника $U=20$ В при частоте $f=50$ Гц и измерить ток I и напряжения на катушках U_1 и U_2 . Вычислить полное сопротивление цепи $Z_{согл} = \frac{U}{I}$, индуктивное сопротивление цепи $X_{согл} = \sqrt{Z_{согл}^2 - r^2}$ и индуктивность $L_{согл} = \frac{X_{согл}}{\omega}$ (здесь $r = r_1 + r_2$). Выполнить также расчет указанных в табл. 7.2 величин, используя результаты экспериментов п.1. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Результаты исследования цепи при последовательном включении катушек.

Исследуемые величины		U , В	I , мА	U_1 , В	U_2 , В	Z , Ом	X , Ом	L , Гн
Согласное включение	Расчет							
	Эксперимент							
Встречное включение	Расчет							
	Эксперимент							

3. Собрать схему рис. 7.1б и выполнить те же исследования, что и в п. 2.

4. По данным табл. 7.2 вычислить значение взаимной индуктивности M катушек и сравнить его со значением, полученным в п. 1 исследований.

Сопоставить значения токов $I_{согл}$, $I_{встр}$ в табл. 2 и сформулировать порядок определения одноимённых зажимов различных обмоток.

5. На основании экспериментальных данных построить векторные диаграммы цепи при последовательном соединении катушек.

6. Собрать схему рис. 7.2. Измерения выполнить при напряжении $U \approx 10$ В, $f = 50$ Гц как для согласного, так и для встречного включения катушек. Амперметр поочерёдно включается в общую, затем в первую и во вторую ветви. По результатам измерений вычислить сопротивления цепи Z при согласном и при встречном включении элементов. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 7.3. Сравнить все расчётные и измеренные величины, сопоставить значения токов $I_{\text{согл}}$, $I_{\text{встр}}$ и сформулировать порядок определения одноимённых зажимов различных обмоток, сделать выводы.

7. На основании экспериментальных данных построить векторные диаграммы цепи при параллельном соединении катушек.

Таблица 7.3. Результаты исследования цепи при параллельном соединении катушек.

Исследуемые величины		U , В	I , мА	I_1 , мА	I_2 , мА	Z , Ом
Согласное включение	Расчет					
	Эксперимент					
Встречное включение	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?
3. Приведите схемы и формулы для определения взаимной индуктивности M катушек.
4. Какое соединение индуктивно связанных катушек носит название согласного (встречного)?
5. Что такое «ёмкостный эффект», в чём его проявление, и в каких цепях он возможен?
6. Постройте векторную диаграмму при согласном, а также при встречном включении двух индуктивно связанных катушек.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

Исследование трансформаторного включения индуктивно связанных катушек и разветвленных цепей с ними

Цель работы: проверка расчётных соотношений, относящихся к трансформаторной схеме включения элементов; проверка правила «развязки»

индуктивной связи и методики расчета разветвленной цепи с индуктивно связанными катушками.

Пояснения к работе

В трансформаторной схеме включения индуктивно связанных элементов первичная и вторичная сторона не имеют непосредственного электрического контакта (рис. 8.1). Поэтому трансформатор описывается двумя уравнениями по второму закону Кирхгофа. При направлениях токов I_1 , I_2 , указанных на рис. 8.1 эти уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} r_1 \cdot \underline{I}_1 + jX_{L1} \cdot \underline{I}_1 - jX_m \cdot \underline{I}_2 = \underline{U}_1, \\ r_2 \cdot \underline{I}_2 + jX_{L2} \cdot \underline{I}_2 + \underline{Z}_H \cdot \underline{I}_2 - jX_m \cdot \underline{I}_1 = 0. \end{cases}$$

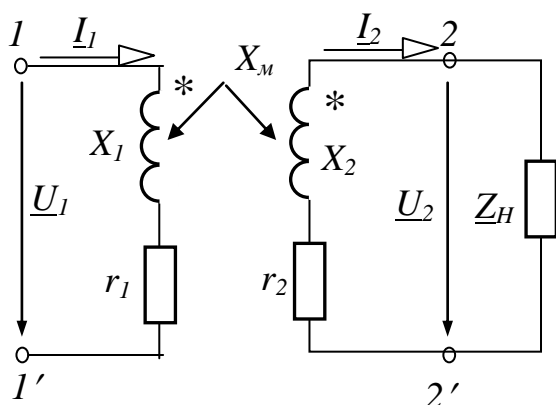


Рис. 8.1. Схема трансформаторного включения катушек

Совместно решая эту систему из двух уравнений, можно определить токи I_1 и I_2 трансформатора. В лабораторной работе предполагается исследовать трансформатор как с нагрузкой, так и в режиме короткого замыкания.

В разветвленной цепи, когда помимо катушек включены ещё другие элементы, расчёт можно выполнить методом законов Кирхгофа, методом контурных токов, а также другими методами после выполнения эквивалентной замены индуктивной связи, т.е. с применением так

называемой «развязки связи». Напомним правила развязки связи: *если индуктивно связанные элементы соединены в узел разноимёнными зажимами, то для эквивалентной замены связи в ветви с катушками необходимо ввести элемент $+X_m$, а в общую для них ветвь – элемент $-X_m$. Если катушки в узел соединены одноимёнными зажимами, то в их ветви добавляется элемент X_m со знаком минус, а в общую ветвь – элемент $+X_m$. И это не зависит от принятых направлений токов в ветвях.* В домашней подготовке к работе токи разветвленной цепи предлагается рассчитать именно с применением развязки связи. Это позволит убедиться в справедливости правил развязки связи.

Домашняя подготовка к работе

1. Вычертить схему рис. 8.1, а также в соответствии со своим вариантом схему рис. 8.2.

2. Выполнить расчет схемы рис. 8.1 при коротком замыкании вторичной обмотки и при нагрузке трансформатора на сопротивление \underline{Z}_H , взятое из табл.8.1 в соответствии со своим вариантом. Напряжение источника взять равным $U=10В$.

Таблица 8.1. Параметры нагрузки трансформатора.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ элемента r_H	02	02	03	03	04	04	05	05	02	02	03	03
№ элемента C_H	19	17	18	16	17	15	16	14	18	15	14	12

В данной лабораторной работе используются те же самые индуктивно связанные катушки, что и в лабораторной работе № 7. Поэтому при расчетах следует использовать полученные ранее параметры катушек.

3. Выполнить расчет схемы рис. 8.2, выбрав положительные направления токов. Напряжение источника взять равным $U=30$ В. Параметры используемых элементов следующие: $R_1=100$ Ом, $R_2=200$ Ом, $C_1=10$ мкФ, $C_2=20$ мкФ.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 8.1.

2. Измерить величины, указанные в табл. 8.2. Сравнить их с результатами расчета. Построить векторные диаграммы для случая короткого замыкания трансформатора и для работы под нагрузкой.

Таблица 8.2. Расчётные и измеренные значения величин в трансформаторной схеме.

Исследуемые величины		U_1 , В	I_1 , мА	U_2 , В	I_2 , мА	$P_{1 \rightarrow 2}$, Вт
Режим короткого замыкания	Расчет					
	Эксперимент					-
Режим нагрузки	Расчет					
	Эксперимент					-

3. В соответствии со своим вариантом собрать схему рис. 8.2, предусмотрев возможность измерения токов в ветвях схемы. Установить напряжение источника $U=30$ В, $f=50$ Гц. Измерить токи в ветвях схемы. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 8.3. Сравнить полученные результаты, сделать выводы. По результатам эксперимента построить векторную диаграмму цепи.

Таблица 8.3. Расчетные и экспериментальные значения токов в схеме рис. 8.2.

Исследуемые величины	U , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА
Расчет				
Эксперимент				

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте и покажите на небольшом примере правила «развязки»

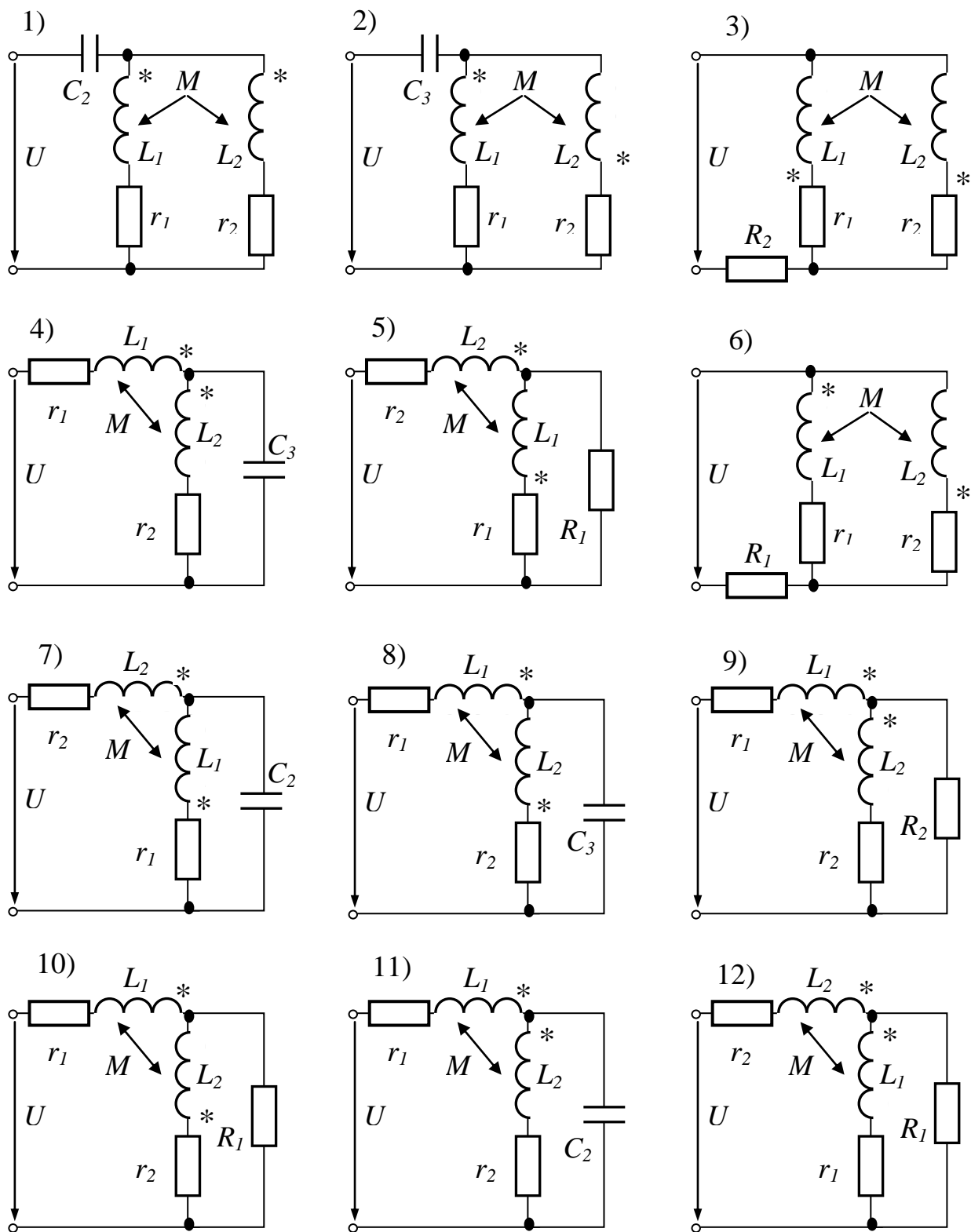


Рис. 8.2. Варианты схем для исследований

индуктивной связи.

2. Как рассчитать входное сопротивление цепи рис. 8.2 Вашего варианта?
3. Что называется трансформатором?
4. Постройте векторную диаграмму трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания.
5. Выполните «развязку» индуктивной связи в схеме Вашего варианта.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

Исследование трёхфазных цепей при соединении сопротивлений нагрузки в звезду

Цель работы: экспериментальная проверка соотношений между линейными и фазными величинами и уяснение назначения нулевого провода.

Пояснения к работе

В зависимости от номинального напряжения приёмника и от параметров сети в трёхфазных системах сопротивления нагрузки могут включаться либо в «звезду», либо в «треугольник». Это две основные схемы включения элементов в 3^x - фазных системах. Если комплексы сопротивлений фаз одинаковы: $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi$, то нагрузка называется симметричной, в противном случае – несимметричной. Для величин на зажимах генератора удобно употреблять в

качестве индексов большие буквы A, B, C . Для величин на зажимах нагрузки – малые буквы: ax, by, cz или a, b, c .

При соединении нагрузки в звезду и симметричном режиме работы цепи (рис. 9.1) линейные и фазные величины связаны между собой соотношениями:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}, \quad I_{\text{л}} = I_{\text{ф}},$$

или в комплексной форме:

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} \underline{U}_A \cdot e^{+j30^\circ}; \quad \underline{I}_A = \underline{I}_a.$$

При несимметричной нагрузке линейные напряжения определяются через фазные по II закону Кирхгофа:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b; \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c; \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a.$$

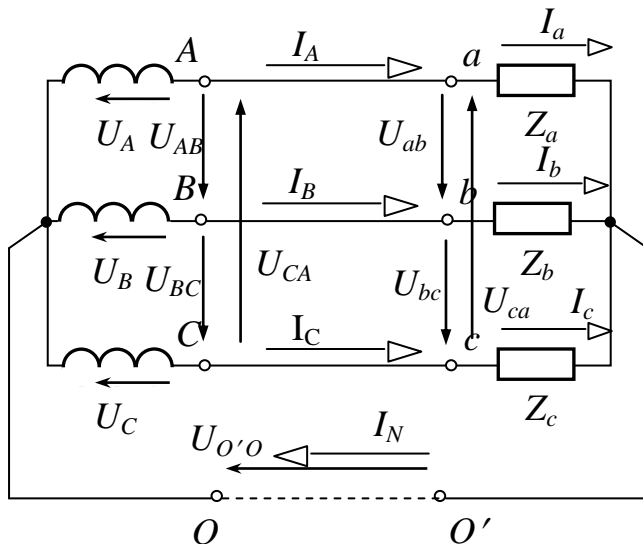


Рис. 9.1. Схема соединения «звездой»

Линейные и фазные токи при соединении «звезда» это одни и те же токи, только на разных участках своей фазы, т.е. :

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

Если нагрузка несимметрична, то между нейтральными точками нагрузки O' и источника O возникает узловое напряжение $U_{O'O}$, которое называют напряжением смещения нейтрали. В этом случае:

$$U_{O'O} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N};$$

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

Здесь Y_A, Y_B, Y_C, Y_N – проводимости фаз нагрузки и нулевого провода;

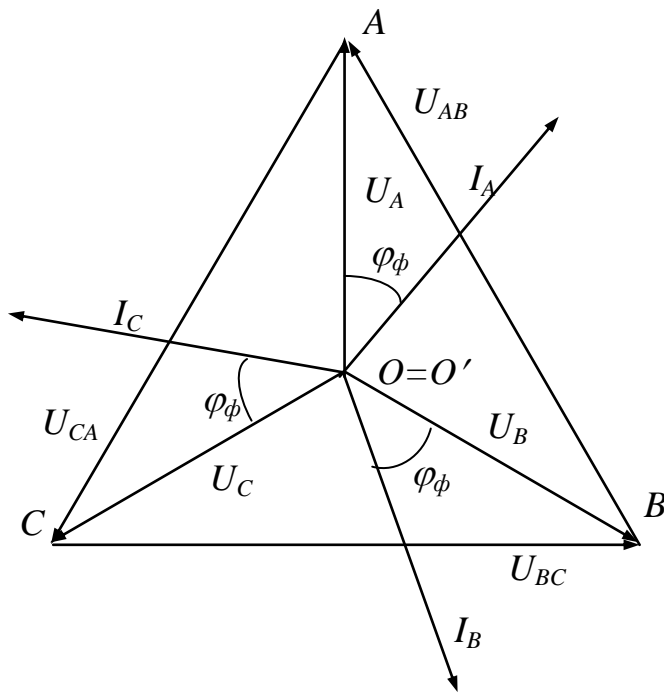


Рис. 9.2. Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной нагрузке, соединенной звездой

представлена на рис. 9.2.

$U_{A,B,C}$ – фазные напряжения генератора, $U_{a,b,c}$ – фазные напряжения нагрузки.

При несимметричной нагрузке для выравнивания фазных напряжений приёмника применяется нулевой провод (НП). При симметричной нагрузке ток в нулевом проводе равен нулю, и провод, собственно, не нужен. При несимметричной нагрузке ток в нулевом проводе определяется по I закону Кирхгофа:

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

Типовая векторная диаграмма для цепи при симметричной R,L-нагрузке, соединённой в звезду,

Домашняя подготовка к работе

1. Изучить тему «Трёхфазные цепи синусоидального тока», познакомиться с целью и пояснениями к данной лабораторной работе. Подготовить схему и таблицы, необходимые для проведения экспериментов.

2. Для Вашего варианта схемы трёхфазной цепи (см. табл. 8.1) рассчитать токи и напряжения нагрузки и построить векторные диаграммы для трёх случаев: нагрузка симметричная; обрыв сопротивления нагрузки по любой одной из фаз при отсутствии нулевого провода; короткое замыкание по любой другой фазе нагрузки при отсутствии нулевого провода.

Результаты расчётов внести в табл. 2 для сравнения с результатами измерений.

Порядок выполнения работы

1. Используя набор съёмных элементов и элементов на стенде, собрать схему Вашего варианта. Пояснения к формированию сопротивлений нагрузки приведены в примечаниях к таблице вариантов. Нанести общепринятые обозначения сопротивлений и напряжений. В качестве трёхфазного источника использовать источник синусоидального напряжения частотой 50 Гц, имеющийся на стенде.

2. Симметричный режим. Измерить токи I_{ϕ} , I_N , линейные U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} и фазные U_a , U_b , U_c напряжения на нагрузке при включенном и при отключенном нулевом проводе. Результаты измерений внести в табл. 2. Убедиться, что отношение $U_{л.ср}$ к $U_{ф.ср}$ действительно равно $\sqrt{3}$.

3. Режим обрыва фазы. Повторить измерения токов и напряжений при обрыве сопротивления нагрузки для случаев включенного и отключенного нулевого провода.

4. Режим короткого замыкания. При выполнении этого эксперимента необходимо пригласить преподавателя. Измерения выполнить только при отключенном нулевом проводе.

5. Сравнить измеренные и расчётные значения токов и напряжений по каждому из пунктов исследования. На векторные диаграммы, построенные при подготовке к работе, другим цветом нанести векторы, соответствующие экспериментальным данным.

Таблица 9.1. Варианты заданий к лабораторной работе № 9.

Вариант	U_{ϕ} , В	Z_{ax}	Z_{by}	Z_{cz}	Обрыв фазы	КЗ фазы
1	12.7	03	R_1	R_4	В	С
2	22	$03+j(26+28)$	R_4+jL_4	R_1+j29	С	В
3	33	$-j(13+19)$	$-j(13+19)$	$-jC_4$	А	А
4	12.7	$j(26+28)$	$j29$	$+jL_4$	В	А
5	33	03+06	R_4	R_3	С	В
6	38.1	$03+j(26+28)$	R_1+j29	R_4+jL_4	В	С
7	25.4	01+04	R_2	R_4	А	В
8	23.2	01+03+04	06	R_4	С	А
9	27.7	$03+06-jC_1$	R_3-jC_4	R_4- $j(13,15,17,19)$	В	С
10	38.1	03+06	R_3	R_4	А	В

Примечания. В таблице указаны номера элементов, из которых формируются сопротивления фаз нагрузки.

Например, для варианта 6 указано: $Z_{ax} = 03 + j(26+28)$, $Z_{by} = R1+j(29)$, $Z_{cz} = R_4+jL_4$. Это значит, что для фазы А необходимо использовать R-элемент 03 – 100 Ом, индуктивные элементы $26+28 = 20+50$ мГн, т.е. $X = \omega L = = 314 \cdot 0,07 = 22$ Ом. Таким образом, получаем: $Z_{ax} = 100 + j22$ Ом. Такое же сопротивление в фазе В формируется из элементов: $R_1 = 100$ Ом и индуктивного элемента $29 = 70$ мГн. В фазе С сопротивление формируется из регулируемого резистора $R_4 = 100$ Ом и из регулируемого индуктивного элемента $L_4 = 70$ мГн.

В случаях, когда используются ёмкостные элементы 11 – 19, их между собой необходимо включать параллельно.

Например, в варианте 9 указано: $Z_{cz} = R_4 - j(13,15,17,19)$. Это значит, что активное сопротивление, такое же как в фазах А и В, необходимо установить с помощью регулируемого резистора R_4 . Ёмкостные же элементы 13,15,17,19 необходимо соединить параллельно, прежде чем включить в фазу С.

6. Во всех случаях измерений при включенном нулевом проводе проверить соотношение напряжений U_n / U_ϕ и сделать вывод о роли нулевого провода. Сформулировать заключение по работе.

Таблица 9.2. Результаты исследования 3х-фазной цепи при соединении нагрузки в звезду.

Режим работы		Симметричный			Обрыв фазы			КЗ фазы	
		Без НП		С НП	Без НП		С НП	Без НП	
		Расчет	Опыт	Опыт	Расчет	Опыт	Опыт	Расчет	Опыт
Линейные напряжения	$U_{AB}, В$								
	$U_{BC}, В$								
	$U_{CA}, В$								
Фазные напряжения	$U_a, В$								
	$U_b, В$								
	$U_c, В$								
	$U_N, В$								
Токи	$I_A, А$								
	$I_B, А$								
	$I_C, А$								
	$I_N, А$								

Примечания.

В какой фазе производится обрыв или короткое замыкание сопротивления нагрузки – указано в таблице вариантов.

Опыт при коротком замыкании фазы выполняется обязательно в присутствии преподавателя.

Вопросы для самоконтроля

1. Напишите соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приемников в «звезду».
2. Почему при симметричной нагрузке в нулевом проводе отсутствует ток?
3. Какое назначение имеет нулевой провод в трехфазных цепях?
4. Что такое смещение нейтрали? Как его рассчитать и как измерить?
5. Почему короткое замыкание в одной из фаз приемника разрешается устраивать только при выключенном нулевом проводе?
6. Расскажите о порядке построения векторных диаграмм трехфазных цепей при соединении приемников в «звезду».

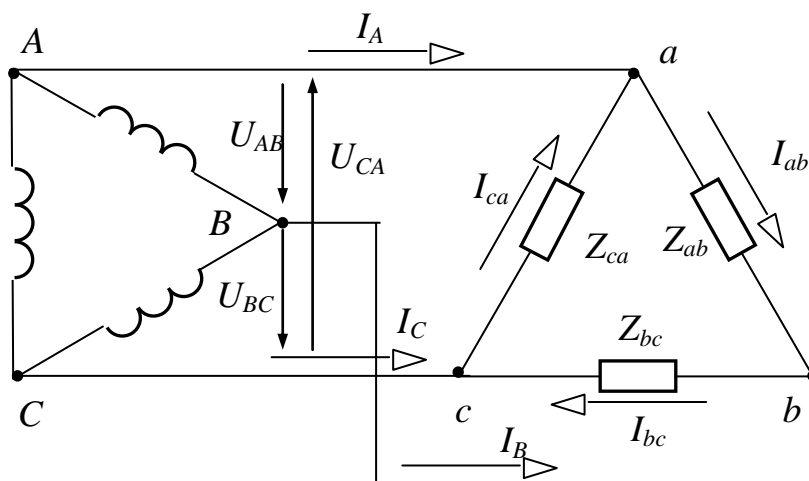
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

Исследование трёхфазных цепей при соединении сопротивлений нагрузки в треугольник

Цель работы: экспериментальная проверка соотношений между линейными и фазными величинами и построение векторных диаграмм трёхфазной цепи при соединении сопротивлений нагрузки в треугольник.

Пояснения к работе

В зависимости от номинального напряжения приёмника и от параметров сети в трёхфазных системах сопротивления нагрузки могут включаться либо в «звезду», либо в «треугольник». Это две основные схемы включения элементов в 3^x - фазных системах. Достоинством соединения в треугольник является то, что ему не страшна несимметричность нагрузки. Нагрузка называется симметричной, если комплексы сопротивлений фаз одинаковы, в противном случае – несимметричной. Но такое соединение (например, у источника) обеспечивает только одну величину рабочего напряжения: здесь фазные и



линейные напряжения равны. Для величин на зажимах генератора удобно употреблять в качестве индексов большие буквы A, B, C . Для величин на зажимах нагрузки – малые буквы: ax, by, cz или ab, bc, ca .

При соединении нагрузки в треугольник и симметричном режиме

Рис. 10.1. Схема соединения «треугольником»

работы цепи (рис. 10.1) линейные и фазные величины по модулю связаны между собой соотношениями:

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

или в комплексной форме:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab}$$

$$\underline{I}_A = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ab} \cdot e^{-j30^\circ}$$

При несимметричной нагрузке соотношение напряжений сохраняется. Линейные же токи через фазные в этом случае определяются по I закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca},$$

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

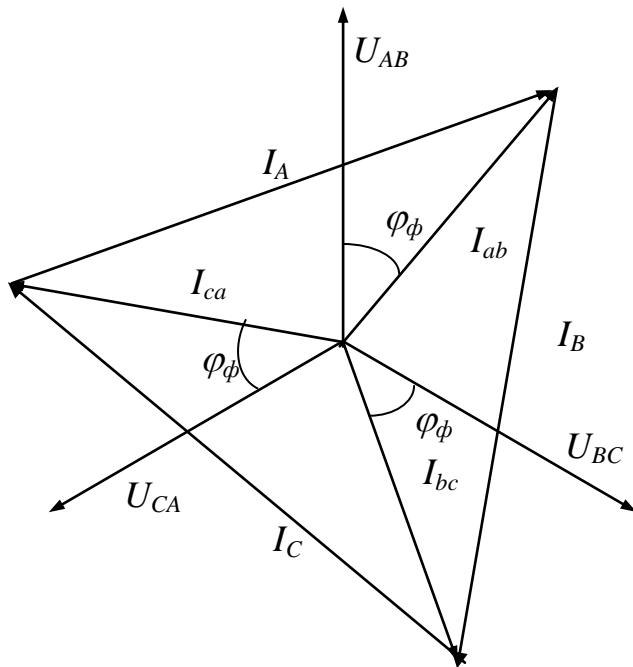


Рис. 10.2. Векторная диаграмма трехфазной цепи при симметричной нагрузке, соединенной треугольником

Нулевой провод при соединении в треугольник просто не имеет смысла, схема всегда трёхпроводная.

Типовая векторная диаграмма для цепи при симметричной R,L-нагрузке, соединённой в треугольник, представлена на рис.10.2.

Домашняя подготовка к работе

1. Изучить тему «Трёхфазные цепи синусоидального тока», познакомиться с целью и

пояснениями к данной лабораторной работе. Подготовить схему и таблицы, необходимые для проведения экспериментов.

2. Для Вашего варианта схемы трёхфазной цепи (см. табл. 1) рассчитать токи и напряжения нагрузки и построить векторные диаграммы для трёх случаев: нагрузка симметричная; обрыв сопротивления нагрузки по любой одной из фаз; обрыв линейного провода по любой другой фазе.

Результаты расчётов внести в табл. 10.2 для сравнения с результатами измерений.

Таблица 10.1. Варианты заданий к лабораторной работе № 10.

Вариант	$U_{\phi}, В$	Z_{ax}	Z_{by}	Z_{cz}	Обрыв фазы	Обрыв лин. пров
1	12.7	03	R_1	R_4	<i>bc</i>	С
2	22	$03+j(26+28)$	R_4+jL_4	R_1+j29	<i>ca</i>	В
3	33	$-j(13+19)$	$-j(13+19)$	$-jC_4$	<i>ab</i>	А
4	12.7	$j(26+28)$	$j29$	$+jL_4$	<i>bc</i>	А
5	33	03+06	R_4	R_3	<i>ca</i>	В
6	38.1	$03+j(26+28)$	R_1+j29	R_4+jL_4	<i>bc</i>	С
7	25.4	01+04	R_2	R_4	<i>ab</i>	В
8	232	01+03+04	06	R_4	<i>ca</i>	А
9	27.7	$03+06-jC_1$	R_3-jC_4	R_4- $j(13,15,17,19)$	<i>bc</i>	С
10	38.1	03+06	R_3	R_4	<i>ab</i>	В

Примечания. В таблице указаны номера элементов, из которых формируются сопротивления фаз нагрузки.

Например, для варианта 6 указано: $Z_{ax} = 03 + j(26+28)$, $Z_{by} = R_1 + j(29)$, $Z_{cz} = R_4 + jL_4$. Это значит, что для фазы А необходимо использовать R -элемент 03 – 100 Ом, индуктивные элементы $26+28 = 20+50$ мГн, т.е. $X = \omega L = = 314 \cdot 0,07 = 22$ Ом. Таким образом, получаем: $Z_{ax} = 100 + j22$ Ом. Такое же сопротивление в фазе В формируется из элементов: $R_1 = 100$ Ом и индуктивного элемента $29 = 70$ мГн. В фазе С сопротивление формируется из регулируемого резистора $R_4 = 100$ Ом и из регулируемого индуктивного элемента $L_4 = 70$ мГн.

В случаях, когда используются ёмкостные элементы 11 – 19, их между собой необходимо включать параллельно.

Например, в варианте 9 указано: $Z_{cz} = R_4 - j(13,15,17,19)$. Это значит, что активное сопротивление, такое же как в фазах А и В, необходимо установить с помощью регулируемого резистора R_4 . Ёмкостные же элементы 13,15,17,19 необходимо соединить параллельно, прежде чем включить в фазу С.

Короткое замыкание по любой фазе нагрузки в данном случае будет означать короткое замыкание генератора, что **н е б е з о п а с н о**.

Порядок выполнения работы

1. Используя набор съёмных элементов и элементов на стенде, собрать схему своего варианта. Предусмотреть возможность включения амперметра в любую ветвь. Пояснения к формированию сопротивлений нагрузки смотри в примечаниях к таблице вариантов. Нанести общепринятые обозначения токов, напряжений и сопротивлений. В качестве трёхфазного источника использовать источник синусоидального напряжения частотой 50 Гц, имеющийся на стенде.

2. Симметричный режим. Измерить линейные I_A, I_B, I_C и фазные I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} токи, а также напряжения на нагрузке. Результаты измерений внести в табл.10.2. Убедиться, что отношение $I_{л.ср}$ к $I_{ф.ср}$ действительно равно $\sqrt{3}$.

Таблица 10.2. Результаты исследования 3х-фазной цепи при соединении нагрузки в треугольник.

Режим работы цепи		Напряжения			Линейные токи			Фазные токи		
		$U_{ав}$ В	$U_{вс}$ В	$U_{са}$ В	I_A мА	I_B мА	I_C мА	$I_{ав}$ мА	$I_{вс}$ мА	$I_{са}$ мА
Симметричная нагрузка	Расчёт									
	Экспер									
Обрыв фазы	Расчёт									
	Экспер									
Обрыв линейного провода	Расчёт									
	Экспер									
<p><i>Примечание.</i> В какой фазе производится обрыв линейного провода или сопротивления нагрузки – указано в таблице вариантов.</p>										

3. Режимы обрыва фазы. Повторить измерения токов и напряжений при обрыве сопротивления нагрузки и линейного провода, сравнить их с параметрами симметричного режима и сделать выводы.

4. Сравнить измеренные значения токов и напряжений по каждому из пунктов исследования с расчётными. На векторные диаграммы, построенные при подготовке к работе, другим цветом нанести векторы, соответствующие экспериментальным данным.

5. Сформулировать заключение по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Напишите соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приемников в «треугольник».

2. Как изменяются линейные токи симметричного приемника при переключении его сопротивлений со «звезды» на «треугольник» и питания от одного и того же источника?

3. Как изменяются линейные токи симметричного приемника, соединенного «треугольником», при обрыве одной из его фаз?

4. Расскажите о порядке построения векторных диаграмм трехфазных цепей при соединении приемников в «треугольник».

5. Каковы преимущества и недостатки схемы соединения «треугольник» по сравнению со схемой соединения «звезда»?

6. Как изменяются линейные и фазные токи симметричного приемника, соединенного «треугольником», при обрыве одного из линейных проводов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

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

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \cdot \sin(\omega t + \psi_1) + A_2 \cdot \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + A_k \cdot \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots, \quad (11.1)$$

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 (частоту);

$A_k \cdot \sin(k\omega t + \psi_k)$ - 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.

При произвольной форме функции $f(\omega t)$ ее разложение в ряд Фурье осуществляется графоаналитическим методом. Этот метод основан на замене определенного интеграла суммой конечного числа слагаемых. С этой целью период несинусоидальной функции $f(\omega t)$ разбивают на n равных интервалов $\Delta\omega t = \frac{2\pi}{n}$ и интегралы заменяют алгебраической суммой n слагаемых.

Постоянную составляющую A_0 ряда Фурье, амплитуду синусоидальной составляющей A_k' k -ой гармоники ряда и амплитуду косинусоидальной составляющей A_k'' k -ой гармоники находят из выражений:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^{p=n} f\left(p \frac{2\pi}{n}\right) \frac{2\pi}{n} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^{p=n} f\left(p \frac{2\pi}{n}\right) \quad (11.2)$$

$$A_k' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(k\omega t) d(\omega t) \approx \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{p=n} f\left(p \frac{2\pi}{n}\right) \cdot \sin\left(k \cdot p \frac{2\pi}{n}\right) \quad (11.3)$$

$$A_k'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos(k\omega t) d(\omega t) \approx \frac{2}{n} \sum_{p=1}^{p=n} f\left(p \frac{2\pi}{n}\right) \cdot \cos\left(k \cdot p \frac{2\pi}{n}\right) \quad (11.4)$$

Где: $f\left(p \frac{2\pi}{n}\right)$ – значение несинусоидальной функции в конце p -го интервала (текущий индекс p принимает значения от 1 до n),
 $\sin\left(k \cdot p \frac{2\pi}{n}\right)$ ($\cos\left(k \cdot p \frac{2\pi}{n}\right)$) – значение синуса (косинуса) от аргумента в конце p -го интервала с учетом номера гармоники k .

Чем больше число интервалов, тем точнее результат разложения в ряд Фурье. На практике обычно достаточно разделить период на 24 или 18 интервалов.

Если несинусоидальная периодическая кривая симметрична относительно оси абсцисс, то на n равных интервалах разбивают полпериода и по формулам, аналогичным (11.2 – 11.4) находят гармонические составляющие ряда Фурье.

При замене синусного и косинусного рядов одинарным синусоидальным рядом Фурье (11.1) используют следующие формулы:

$$A_k = \sqrt{(A_k')^2 + (A_k'')^2}, \quad (11.5)$$

$$\psi_k = \arctg \frac{A_k''}{A_k'}, \text{ если } A_k' > 0; \quad \psi_k = 180^\circ + \arctg \frac{A_k''}{A_k'}, \text{ если } A_k' < 0, \quad (11.6)$$

где A_k и ψ_k – соответственно амплитуда и начальная фаза k -ой гармоники одинарного ряда.

При построении различных гармоник в одной системе координат необходимо учитывать то, 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. 11.1 и 11.2).

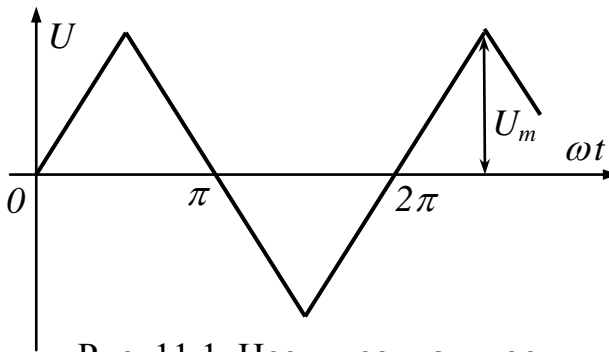


Рис. 11.1. Несинусоидальное напряжение треугольной формы

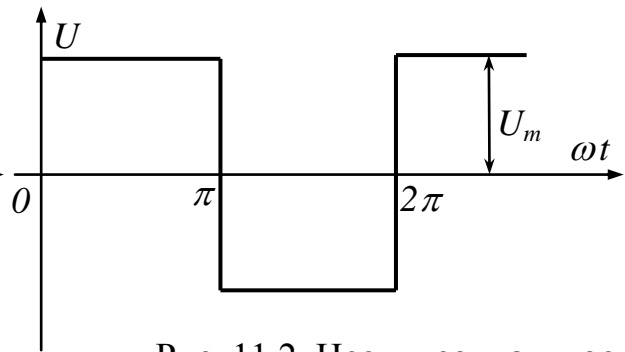


Рис. 11.2. Несинусоидальное напряжение прямоугольной формы

Ряд Фурье для напряжения треугольной формы имеет вид:

$$u(\omega t) = \frac{8U_{\text{макс}}}{\pi^2} \left[\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \dots \right], \quad (11.7)$$

а для напряжения прямоугольной формы:

$$u(\omega t) = \frac{4U_{\text{макс}}}{\pi} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \dots \right]. \quad (11.8)$$

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

$$X_L^{(k)} = k \cdot X_L^{(1)}, \quad X_L^{(0)} = 0; \quad X_C^{(k)} = X_C^{(1)} / k, \quad X_C^{(0)} = \infty. \quad (11.9)$$

Из приведенных соотношений следует, что индуктивность подавляет высшие гармоники в составе кривой тока, делая ее по форме близкой к виду первой гармоники подаваемого напряжения источника. 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:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2}, \quad (11.10)$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_k^2}. \quad (11.11)$$

Мгновенное значение несинусоидального тока равно сумме мгновенных значений токов всех гармоник:

$$i(\omega t) = I_0 + I_{1m} \cdot \sin(\omega t + \psi_1) + I_{2m} \cdot \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + I_{km} \cdot \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots \quad (11.12)$$

Домашняя подготовка к работе

1. Согласно номеру варианта (табл.11.1) вычертить график несинусоидального напряжения источника (рис. 11.1 или 11.2), электрическую цепь для проведения исследований (рис. 11.3) и выбрать их параметры (табл.1).

Таблица 11.1. Параметры электрической цепи для исследований.

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вид напряжения источника	Напряжения треугольной формы (рис. 11.1)						Напряжения прямоугольной формы (рис. 11.2)					
U_m , В	10	15	20	25	15	20	10	15	20	25	20	15
r_1 , Ом	75	75	51	75	100	100	100	51	51	51	75	100
r_2 , Ом	51	51	75	100	51	51	75	100	75	75	51	75
L , Гн	5	7	10	15	5	7	10	15	5	7	10	15
C , мкФ	5	5	2	2	5	5	2	2	5	5	2	2

2. Разложить несинусоидальное периодическое напряжение источника $u(\omega t)$ в ряд Фурье, выполнив расчет для трех гармоник – основной и двух высших. Вычислить действующее значение входного напряжения. Результаты расчета занести в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Амплитудные значения различных гармоник входного напряжения и действующие значения напряжения и токов в схеме рис. 11.3.

Исследуемые величины	U_{1m} В	U_{3m} В	U_{5m} В	U , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	U_{r1} , В
Расчет								
Эксперимент	-	-	-					

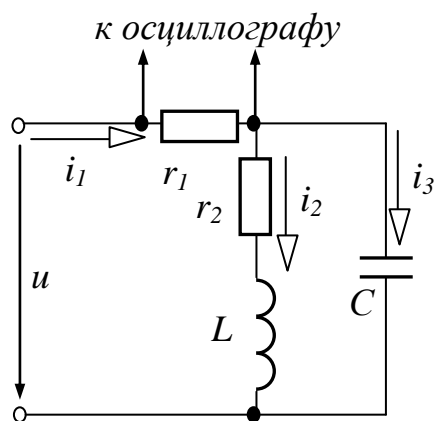


Рис. 11.3. Электрическая цепь для исследований

3. Для электрической цепи рис. 11.3 при напряжении источника $u(\omega t)$ частоты $f=1$ кГц рассчитать мгновенные и действующие значения токов в ветвях и напряжения на резисторе в неразветвленной части цепи. Результаты расчета занести в табл. 2.

4. Построить график мгновенного напряжения $u_{r1}(\omega t)$ на зажимах резистора в неразветвленной части цепи.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему рис. 11.3 с параметрами элементов, указанными в табл.11.1. Максимальное напряжение источника U_m и его частоту $f=1$ кГц установить по изображению $u(\omega t)$ на экране осциллографа. Предусмотреть в схеме перемычки для измерения токов в ветвях.

2. С помощью комбинированного прибора измерить действующие значения токов в ветвях, напряжения источника и напряжения на резисторе r_1 . Результаты измерений занести в табл.11.2. Сопоставить результаты расчета и эксперимента и сделать выводы.

3. Подключить осциллограф параллельно резистору r_1 и снять с экрана кривую $u_{r1}(\omega t)$. С учетом масштабов осциллографа и известного соотношения $u_{r1}=i_1 \cdot r_1$ выполнить графоаналитическим методом разложение графика $i_1(\omega t)$ в ряд Фурье, определив первые три гармоники. Сопоставить полученные результаты с расчетом мгновенного тока $i_1(\omega t)$, выполненным согласно п. 3 подготовки к работе.

4. Индуктивный элемент L (табл.11.1) включить последовательно с резистивным сопротивлением $r=10$ Ом (регулируемое сопротивление R_4 блока резисторов стенда) и при том же источнике питания ($f=1$ кГц, U_m – согласно табл.11.1) снять с экрана осциллографа график напряжения на резисторе,

который по форме соответствует графику кривой тока цепи. Сравнить форму кривых напряжения источника питания и тока.

5. Емкостный элемент C (табл.11.1) включить последовательно с резистивным сопротивлением $r=10$ Ом и при том же источнике питания снять с экрана осциллографа график напряжения на резисторе, который пропорционален току. Сравнить формы кривых напряжения источника питания и тока.

6. По результатам исследований п. 4 и 5 сделать выводы о влиянии индуктивности и емкости на форму кривой тока в этих элементах.

Вопросы для самоконтроля

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

2. Каков гармонический состав напряжения источника треугольной (прямоугольной) формы?

3. Как изменяются индуктивное и емкостное сопротивления приемников для токов различных гармоник?

4. Чему равны действующие значения несинусоидальных напряжений и токов?

5. Какие значения несинусоидальных функций измеряют приборы различных систем?

6. В каких случаях применяют графоаналитический метод разложения несинусоидальных периодических функций в ряд Фурье и каковы его особенности?

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

8. Назовите известные устройства, содержащие несинусоидальные напряжения и токи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов П.В. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1984. – 752 с.

2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1984. – 558 с.

3. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. В 3 ч.– М.: Энергия, 1978. – Ч.1. Линейные электрические цепи. - 792 с.