



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Электротехника и электроника»

ПРАКТИКУМ

по дисциплине

«Общая электротехника и электроснабжение»

Авторы

Бондарь И.М.

Дударев К.Г.

Ананченко Л.Н.



Ростов-на-Дону, 2023

Аннотация

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения специальности 08.03.01 Строительство, может быть рекомендован при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электротехника, электроника и схемотехника», «Общая электротехника и радиоэлектроника».

Авторы:



доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Электротехника и электроника»
Бондарь И.М.;



доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Электротехника и электроника»
Дударев К.Г.



доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры
«Электротехника и электроника»
Ананченко Л.Н.



Оглавление

Лабораторная работа №1 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	4
Лабораторная работа №2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА СО СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ РЕЗИСТОРОВ	9
Лабораторная работа №3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	13
Лабораторная работа №4 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТОРА, КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА	17
Лабораторная работа №5 ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА	25
Лабораторная работа №6 КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	32
Лабораторная работа №7 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ЗВЕЗДОЙ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ	38
Лабораторная работа №8 СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ В ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ	45
ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ...	51

Лабораторная работа № 1

Исследование неразветвленной электрической цепи постоянного тока

Цель работы

Исследовать неразветвленную электрическую цепь постоянного тока с линейными и нелинейными элементами. Проверить опытным путем закон Ома.

Краткие теоретические сведения

Электрическая цепь содержит источники электрической энергии (электромашинные генераторы, аккумуляторные батареи, термоэлементы и т. д.), передающие устройства (линия электропередачи, провода и т. д.), (приемники электрической энергии (электрические двигатели, осветительные приборы, нагревательные элементы и т. д.), устройства защиты и управления (плавкие предохранители, автоматические выключатели, магнитные пускатели, рубильники и т. д.), а также контрольно-измерительные приборы (амперметры, вольтметры и т. д.).

Задача анализа электрических цепей обычно сводится к определению тем или иным методом токов в ветвях и напряжений на различных участках цепи.

Для участка цепи с резистором R (рис. 1) ток и напряжение связаны простым соотношением – законом Ома

$$U_{ab} = R \cdot I_{ab} \text{ или } U = R \cdot I \quad (1)$$

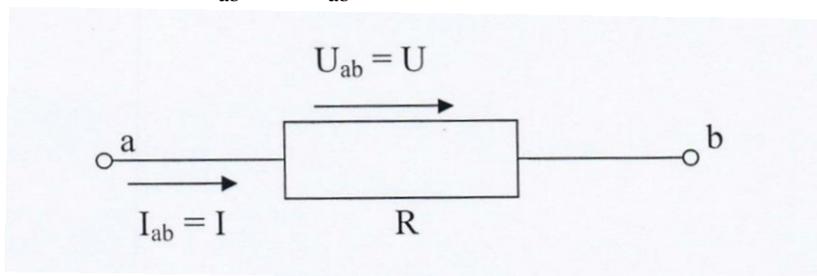


Рис. 1. Цепь постоянного тока с резистором R

Электрическое сопротивление однородных проводов с неизменным поперечным сечением по всей длине определяют по формуле

$$R = \rho \cdot l / s, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление материала провода, Ом·мм²/м;

l – длина провода, м;

s – площадь поперечного сечения, мм².

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью $G = 1/R$.

Основная единица измерения сопротивления в системе СИ – ом (Ом), проводимости – сименс (См).

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью $\gamma = 1/\rho$.

Сопротивление проводника зависит от температуры, которое в интервале от нуля до 100° С вычисляется следующим образом:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)], \quad (3)$$

где R_1 и R_2 – сопротивление соответственно при температуре θ_1 и θ_2 ;

α – температурный коэффициент сопротивления.

В таблице 1 приведены значения удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления некоторых материалов.

Таблица 1

Материал	Удельное сопротивление ρ , Ом·мм ² /м при 20° С	Температурный коэффициент сопротивления, α
Серебро	0,016	0,0035
Медь техническая	0,0185	0,0041
Алюминий	0,0295	0,004
Сталь	0,125 – 0,146	0,00057
Константан	0,44	0,00005
Нихром	1,02 – 1,12	0,0001

Линейный резистивный элемент является схемой замещения любой части электротехнического устройства, в которой ток пропорционален напряжению (рис. 2, а). Его параметром служит сопротивление $R = \text{const}$.

Если зависимость тока от напряжения нелинейная, то схема замещения содержит нелинейный резистивный элемент, который задается нелинейной вольт-амперной характеристикой $I = f(U)$ (рис. 2, б).

Нелинейный элемент характеризуется, также, статическим и дифференциальным сопротивлениями.

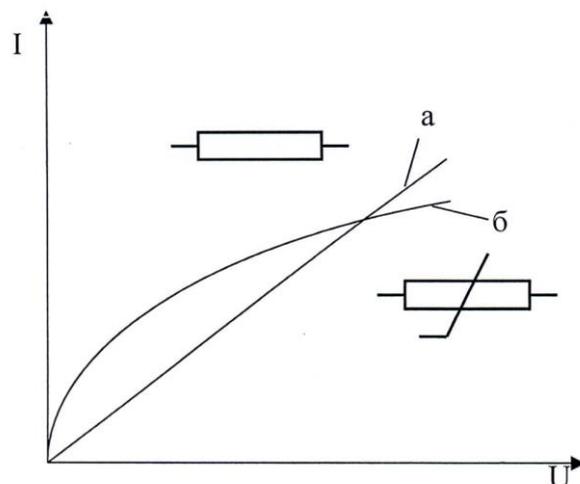


Рис. 2. Вольтамперные характеристики элементов:
а – линейного; б – нелинейного

Статическое сопротивление $R_{ст}$ равно отношению напряжения U к току I в данной точке вольтамперной характеристики:

$$R_{ст} = U / I. \quad (4)$$

Дифференциальное (динамическое) сопротивление $R_{д}$ равно отношению бесконечно малого приращения напряжения dU к бесконечно малому приращению тока dI в данной точке вольтамперной характеристики:

$$R_{д} = dU/dI. \quad (5)$$

Дифференциальное сопротивление характеризует нелинейный элемент при достаточно малых отклонениях от предшествующего состояния, используется при исследовании вопроса об устойчивости режимов работы нелинейных цепей.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь на стенде СЭЦ-1 в соответствии с рис. 3.

При сборке схемы в качестве амперметра использовать один из мультиметров с пределом измерения по току 10 А, второй мультиметр используется в качестве вольтметра.

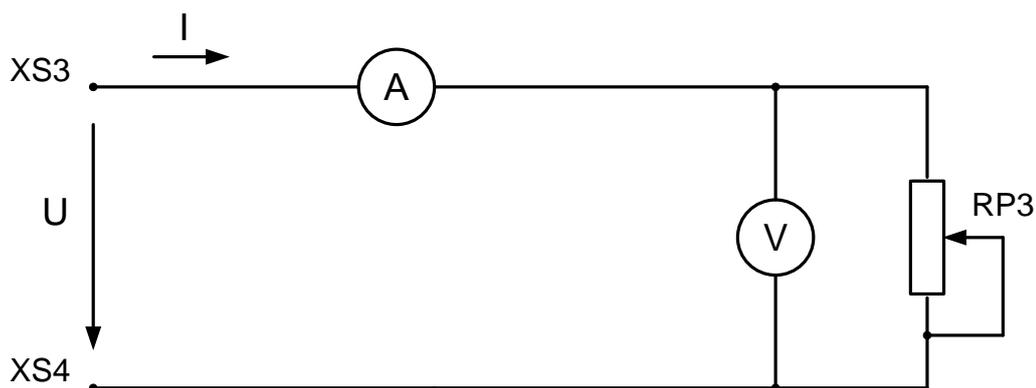


Рис. 3. Электрическая схема лабораторной установки

Для подключения мультиметров использовать приложенные в комплекте соединительные концы.

2. Установить переключатели на мультиметрах в положение соответствующее измерению постоянного тока и напряжения и после проверки схемы преподавателем снять вольтамперные характеристики для трёх значений резистивного элемента $RP3$ – 36 Ом, 72 Ом, 108 Ом. Автотрансформатор АТ позволяет плавно регулировать подводимое к резистору $RP3$ напряжение постоянного тока. Всего делают не менее пяти замеров для каждого резистивного элемента через приблизительно равные интервалы тока, изменяя подводимое к резистору напряжение от нуля до значения при котором ток в резистивном элементе достигнет значения в 1 А. Показания измерительных приборов заносят в таблицу 1.

Таблица 1

Номер измерения	Измерения при $R = 36 \text{ Ом}$		Вычисления	
	U, В	I, А	R, Ом	P, Вт
1				
2				
3				
4				
5				

Затем выполняют расчёты: сопротивление резистивного элемента $R = U/I$; мощность, потребляемая резистивным элементом $P = U \cdot I$ или $P = I^2 \cdot R$ или $P = U^2/R$.

Полученные значения вычисленных величин занести в таблицу 1. По данным таблицы построить вольтамперные характеристики $I = f(U)$ и характеристики мощности резистивных элементов $P = f(I)$.

3. Выполнить пункты 1 и 2 настоящего раздела, заменив в схеме на рис. 3 резистор RP3 на нелинейный элемент (выводы XS5 и XS6), напряжение на котором не должно превышать 220 В. Схему подключить к зажимам XS1и XS2. Результаты записать в таблицу 2.

Таблица 2

Номер измерения	Измерения		Вычисления	
	U, В	I, А	R _{ст} , Ом	R _д , Ом
1				
2				
3				
4				
5				

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома.
2. Сформулируйте закон Ома с учётом зависимости резистивного элемента от температуры.
3. Проанализируйте характеристику мощности резистивного элемента.
4. Какие материалы Вы рекомендуете для изготовления соединительных проводов?
5. Как определить статическое сопротивление нелинейного элемента?
6. Как определить дифференциальное (динамическое) сопротивление нелинейного элемента?

Лабораторная работа № 2

Исследование линейной электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов

Цель работы

Изучить способы соединения приёмников электрической энергии. Проверить опытным путем законы Ома и Кирхгофа.

Краткие теоретические сведения

Расчёт и анализ электрических цепей может быть проведен с помощью законов Ома и Кирхгофа, являющимися основными законами электротехники.

С помощью закона Ома устанавливается связь между током I , напряжением U и сопротивлением R заданного участка цепи: $I = U/R$.

При составлении уравнений по законам Кирхгофа необходимо задать положительные направления токов и напряжений. При этом нужно учитывать, что в приёмниках электрической энергии напряжение и ток направлены в одну сторону, а в источниках питания – в противоположную.

Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов в любом узле цепи равна нулю: $\sum I_k = 0$. Со знаком «+» в это уравнение следует включать токи, направленные к узлу, а со знаком «-» – токи, отходящие от узла (допускается и наоборот). Так, для схемы параллельного соединения резисторов (рис.1): $I = -I_1 - I_2 = 0$ или $I = I_1 + I_2$.

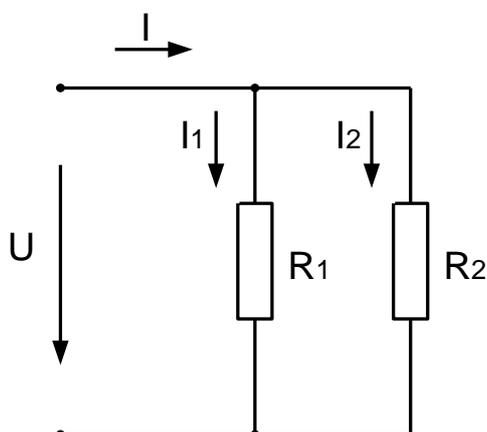


Рис.1. Параллельное соединение резисторов

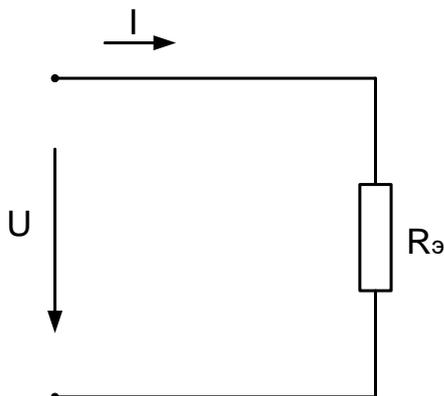


Рис. 2. Эквивалентная схема параллельного соединения резисторов

При параллельном соединении все элементы находятся под одним и тем же напряжением, поэтому для эквивалентной схемы (рис. 2) можно записать: $U/R_3 = U/R_1 + U/R_2$; $1/R_3 = 1/R_1 + 1/R_2$; $g_3 = g_1 + g_2$, где R_3 и g_3 – эквивалентные сопротивление и проводимость данной цепи. Параллельное соединение нашло широкое распространение в практической электротехнике – параллельно включаются осветительные устройства, нагревательные элементы, радио- и телеаппаратура, холодильники и другие электроприёмники в жилых домах.

Согласно второму закону Кирхгофа алгебраическая сумма напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю: $\sum U_k = 0$. При составлении уравнений слагаемые берут со знаком «+», когда произвольно выбранное направление обхода контура совпадает с направлением U или I . В противном случае слагаемые берут со знаком «-».

При последовательном соединении по всем элементам протекает один и тот же ток (рис. 3). Используя второй закон Кирхгофа, можно записать: $U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$; $I \cdot R_3 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$; $R_3 = R_1 + R_2$ и перейти к схеме рис. 4.

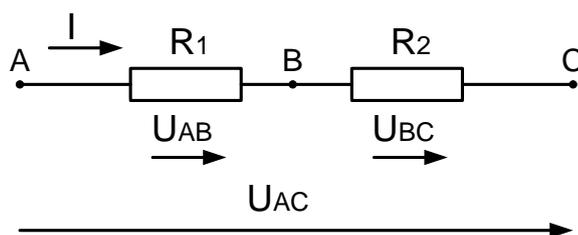


Рис. 3. Последовательное соединение резисторов

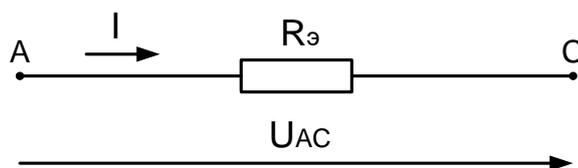


Рис. 4. Эквивалентная схема последовательного соединения резисторов

Приёмники электрической энергии последовательно соединяются относительно редко, т.к. исключается возможность независимого их включения и отключения, а при выходе из строя одного из приёмников отключаются и все остальные.

При смешанном соединении элементов в электрической цепи имеются последовательные и параллельные участки. К такому соединению относится схема лабораторной установки (рис. 5). Электрическое состояние этой схемы описывается следующими уравнениями: $I_1 = I_2 + I_3$; $U_{AC} = U_{AB} + U_{BC}$.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему лабораторной установки (рис. 5).

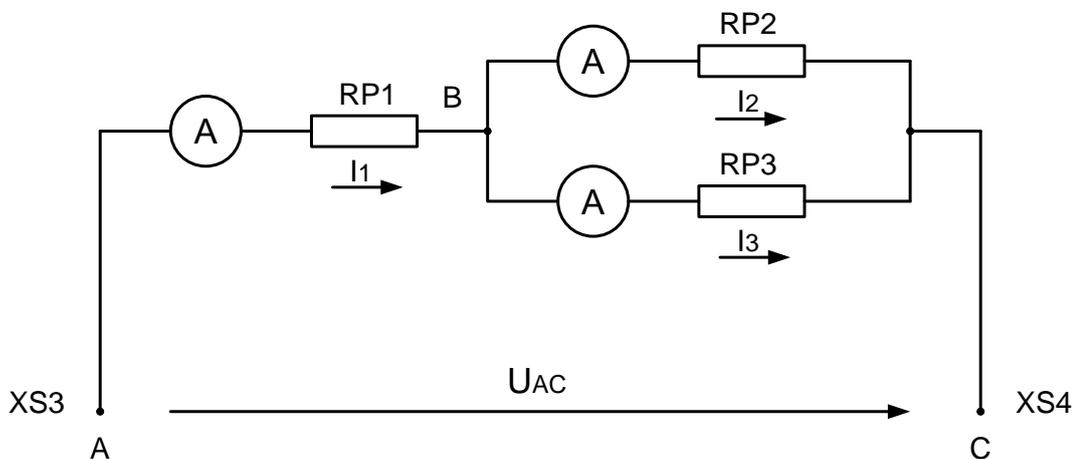


Рис. 5. Схема лабораторной установки

2. Установить с помощью переключателя разные значения сопротивления резистора RP3 (три опыта), измерить токи и напряжения на участках цепи. При проведении экспериментов ток I_1 не должен превышать 1А. Полученные данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	Измерения						Вычисления				
	I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ , А	U _{АС} , В	U _{АВ} , В	U _{ВС} , В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R _Э , Ом	R' _Э , Ом
1											
2											
3											

3. Используя закон Ома, вычислить для всех опытов сопротивление резисторов R_1 , R_2 , R_3 , а также значение эквивалентного (общего) сопротивления цепи:

$$R_Э = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}; R'_Э = \frac{U_{АС}}{I_1}.$$

4. Проанализировать полученные результаты и записать выводы в отчёт.

Контрольные вопросы

1. Как соединить приёмники электрической энергии последовательно, параллельно, смешанно?
2. Как определить эквивалентное (общее) сопротивление цепи при последовательном соединении резисторов?
3. Как определить эквивалентное (общее) сопротивление цепи при параллельном соединении резисторов?
4. Какие электрические цепи называют неразветвлёнными и, какие называют разветвлёнными?
5. Сформулируйте первый и второй закон Кирхгофа.
6. Как изменятся показания приборов схемы лабораторной установки, если при неизменных значениях R_2 , R_3 , U : уменьшить R_1 ; увеличить R_1 ?
7. Назовите единицы измерения тока, напряжения, сопротивления, проводимости.
8. Какие электрические цепи называются линейными?

Лабораторная работа № 3

Исследование режимов работы двухпроводной линии электропередачи постоянного тока

Цель работы

1. Изучить основные электротехнические параметры, характеризующие работу линии электропередачи (ЛЭП).
2. Исследовать работу линии в режиме холостого хода, согласованного, номинального и короткого замыкания.
3. Исследовать влияние тока нагрузки на потерю напряжения, мощности и коэффициента полезного действия линии.

Краткие теоретические сведения

Передача и распределение электрической энергии осуществляется преимущественно воздушными (ВЛ) и кабельными (КЛ) линиями. На энергоёмких предприятиях применяют токопроводы, на генераторном напряжении электростанций – шинопроводы, в производственных и жилых зданиях – внутренние проводки.

На строительных площадках получили широкое распространение ВЛ вследствие возможности простого изменения трассы в ходе строительных работ, их меньшей стоимости (по сравнению с кабельными), простоты обнаружения мест повреждения, а также удобства ремонта.

В условиях промышленных предприятий, а также в жилых районах и на стройплощадках, распределение электрической энергии осуществляется и КЛ, которые отличаются высокой надёжностью электроснабжения. Они не подвержены влиянию ветра и гололёда, не загромождают, подобно ВЛ, улицы городов и территории предприятий, однако КЛ значительно дороже ВЛ того же напряжения (в среднем в 2-3 раза для линий 6-35 кВ и в 5-6 раз для линий 110 кВ и выше), сложнее при сооружении и эксплуатации.

Кабель – готовое заводское изделие, состоящее из изолированных, жил, заключённых в защитную герметичную оболочку и броню, предохраняющие их от влаги, кислот и механических повреждений.

Силовые кабели имеют от одной до четырёх алюминиевых или медных жил сечением $1,5 - 2000 \text{ мм}^2$. Жилы сечением до 16 мм^2 – однопроволочные, свыше – многопроволочные.

Длина воздушной и кабельной линии электропередачи связана с номинальным напряжением, на которое она рассчитана и при увеличении длины (передача электроэнергии на большие расстояния) возникает необходимость повышения напряжения электропередачи.

Для передачи электроэнергии постоянным током сооружаются преобразовательные подстанции – выпрямительная (ВПС) на питающем конце электропередачи, преобразующая после трансформации на высокое напряжение переменный ток в постоянный, и инверторная (ИПС) на другом конце с обратным преобразованием постоянного тока в переменный для трансформации на низкое напряжение.

Отключение линий постоянного тока (ЛПТ) производится закрытием полупроводниковых вентилей ВПС, поэтому электропередача постоянного тока имеет блочную схему: ВПС – ЛПТ – ИПС без присоединения других ИПС в промежуточных пунктах линии. Техническая трудность осуществления разветвлённых линий электропередачи постоянного тока вызвана также особенностями их режимного регулирования, обеспечения устойчивости, необходимостью локализации аварий и др.

Наличие двух подстанций (выпрямительной и инверторной), дорогих и сложных в эксплуатации, сдерживает широкое применение линий постоянного тока. Применение постоянного тока для передачи электроэнергии может быть альтернативой переменному току для сверхдальних линий (от 1500 км и выше и передаче мощности свыше 2000 МВт). Электропередачи постоянного тока меньшей протяжённости применяются при решении технических задач формирования объединённых энергосистем, не решаемых с помощью электропередач переменного тока (обеспечение устойчивости параллельной работы, несинхронная связь электроэнергетических систем большой мощности, кабельные линии большой протяжённости), а также в тех случаях, когда сооружение ВЛ и ВК

переменного тока экономически нецелесообразно, например, для пересечения морского пространства.

При передаче электроэнергии в ЛПТ возникает потеря напряжения, под которой понимают разность напряжений в начале U и в конце $U_{\text{нагр.}}$ линии:

$$\Delta U = U - U_{\text{нагр}} = I \cdot R_{\text{л}}, \quad (1)$$

где I – величина тока в линии;

$R_{\text{л}}$ – сопротивление проводов линии.

Необходимо отметить, что потеря напряжения ухудшает работу электроприёмников, например, снижение светового потока у лампы накаливания пропорционально квадрату снижения напряжения, для двигателя постоянного тока момент на валу пропорционален напряжению. Эксплуатация электроприёмников при повышенном напряжении сокращает срок их службы.

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) нормируются допустимые отклонения напряжения в процентах: на зажимах приборов рабочего освещения, в том числе прожекторного, от $-2,5\%$ до $+5\%$ от номинального; на электродвигателях от -5% до $+10\%$ от номинального; на зажимах остальных приёмников электрической энергии в пределах $\pm 5\%$ от номинального.

В связи с этим, потерю напряжения при расчётах выражают часто в процентах:

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{\text{нагр.ном}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Прохождение электрического тока по проводам ЛЭП приводит к необратимому преобразованию электрической энергии в тепловую. Этот нагрев происходит за счёт потерь мощности ΔP в проводах:

$$\Delta P = I^2 \cdot R_{\text{л}} = \Delta U \cdot I = P - P_{\text{нагр.}} \quad (3)$$

Потребляемая мощность P линией из сети может быть определена из соотношения:

$$P = U \cdot I. \quad (4)$$

Полезная мощность выделяется на нагрузке:

$$P_{\text{нагр.}} = U_{\text{нагр.}} \cdot I. \quad (5)$$

Отношение полезной мощности к потребляемой из сети называют коэффициентом полезного действия:

$$\eta = \frac{P_{\text{нагр.}}}{P} \cdot 100\% = \frac{P_{\text{нагр.}}}{P_{\text{нагр.}} + \Delta P} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему лабораторной установки на стенде СЭЦ-1 (рис. 1).

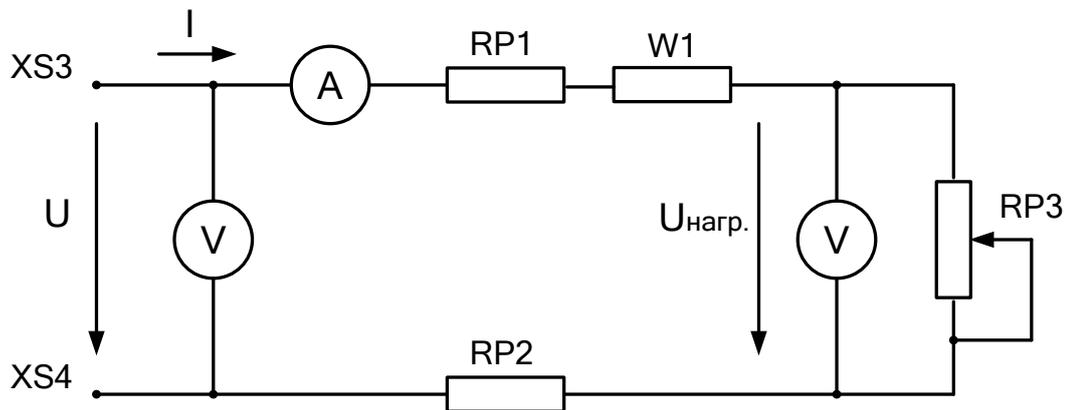


Рис. 1. Схема лабораторной установки

2. Установить резистор RP3 в положение «0» (короткое замыкание нагрузки). Установить напряжение U на входе линии по указанию преподавателя и поддерживать его постоянным по величине в течение всей работы. В данном опыте ток в линии не должен превышать 1 А. Результаты измерений U, U_{нагр.}, I записать в графу 1 таблицы 1.

Таблица 1

№ п/п	Измерения			Вычисления						
	U, В	U _{нагр.} , В	I, А	ΔU, В	R _л , Ом	P, Вт	P _{нагр.} , Вт	ΔP, Вт	η, %	R _{нагр.} , Ом
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

3. Устанавливая резистор R_{P3} в положение «36», «72», «108» (согласованная нагрузка), «144», «180», «∞» (холостой ход) записать в таблицу 1 результаты измерений U , $U_{\text{нагр.}}$, I .

4. Произвести вычисления и записать их в табл. 1. Величину сопротивления нагрузки (потребителя) рассчитать по формуле:

$$R_{\text{нагр.}} = U_{\text{нагр.}} / I. \quad (7)$$

По полученным данным построить графики: $U = f(I)$; $U_{\text{нагр.}} = f(I)$; $\Delta U = f(I)$; $P = f(I)$; $P_{\text{нагр.}} = f(I)$; $\Delta P = f(I)$; $\eta = f(I)$.

5. По результатам работы сделать выводы и записать их в отчёт.

Контрольные вопросы

1. Почему необходимо передавать (транспортировать) электроэнергию?
2. Каким напряжением выгодно передавать заданную мощность (высоким или низким) и почему?
3. Как определить потерю напряжения в ЛЭП?
4. Назовите причины потери мощности в ЛЭП.
5. Как влияют геометрические параметры проводов линии и их материал на потерю напряжения?
6. Как определить коэффициент полезного действия ЛЭП?
7. Назовите и проанализируйте основные режимы работы ЛЭП.
8. Как определить сопротивление проводов ЛЭП?
9. Какие отклонения напряжения на зажимах электроприёмников допускаются ПУЭ?

Лабораторная работа № 4

Последовательное соединение резистора, катушки индуктивности и конденсатора

Цель работы:

1. Проверить основные соотношения для цепи, содержащей последовательно соединенные активные и реактивные элементы.

2. Исследовать режим резонанса напряжений.
3. Ознакомиться с построением векторных диаграмм напряжений и токов, а также треугольников сопротивлений и мощностей.

Краткие теоретические сведения

В данной работе исследуется цепь синусоидального тока, состоящая из последовательно соединенных резисторов R , катушки индуктивности L и конденсатора C (рис. 2).

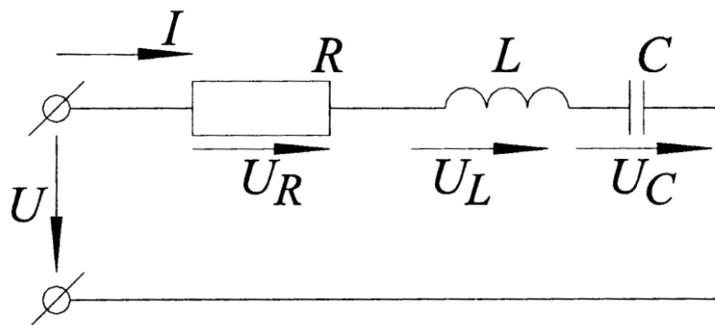


Рис. 2. Последовательное соединение R, L, C

Напряжения на элементах при токе $i = I_m \sin \omega t$ являются синусоидальными функциями времени: $U_a = U_{ma} \sin \omega t$, $U_L = U_{mL} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, $U_C = U_{mC} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$.

Согласно второму закону Кирхгофа для вектора напряжения на входе такой цепи может быть записано выражение:

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_C,$$

где $\bar{U}_a, \bar{U}_L, \bar{U}_C$ - соответственно активная, индуктивная и емкостная составляющие вектора напряжения на входе цепи.

Из этого выражения следует, что при известных $\bar{U}_a, \bar{U}_L, \bar{U}_C$, вектор \bar{U} может быть получен построением векторной диаграммы. Свойства рассматриваемой цепи, а, следовательно, и вид векторной диаграммы, будут зависеть от соотношений между индуктивным и емкостным сопротивлениями:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}, \quad (8)$$

где ω – угловая частота;

f – частота питающей сети, Гц, ($f=50$ Гц);

L – индуктивность катушки, Гн;

C – емкость конденсатора, Ф.

На рис. 3, а показана векторная диаграмма для случая $U_L > U_C$, ($x_L > x_C$). Построение этой диаграммы начинают, откладывая в произвольном направлении вектор тока \bar{I} . Затем из точки O откладывают вектор \bar{U}_a , совпадающий по фазе с \bar{I} , вектор \bar{U}_L , опережающий вектор тока на $\frac{\pi}{2}$, и вектор \bar{U}_C , отстающий от \bar{I} на угол $\frac{\pi}{2}$. Для получения вектора напряжения \bar{U} необходимо вначале сложить векторы \bar{U}_L и \bar{U}_C , определив тем самым вектор реактивного напряжения $\bar{U}_p = \bar{U}_L + \bar{U}_C$.

Складывая векторы \bar{U}_p и \bar{U}_a , можно получить вектор напряжения на входе цепи \bar{U} .

Угол сдвига фаз φ между напряжением \bar{U} , приложенным к зажимам цепи, и током \bar{I} будет в этом случае положительным (напряжение опережает ток по фазе).

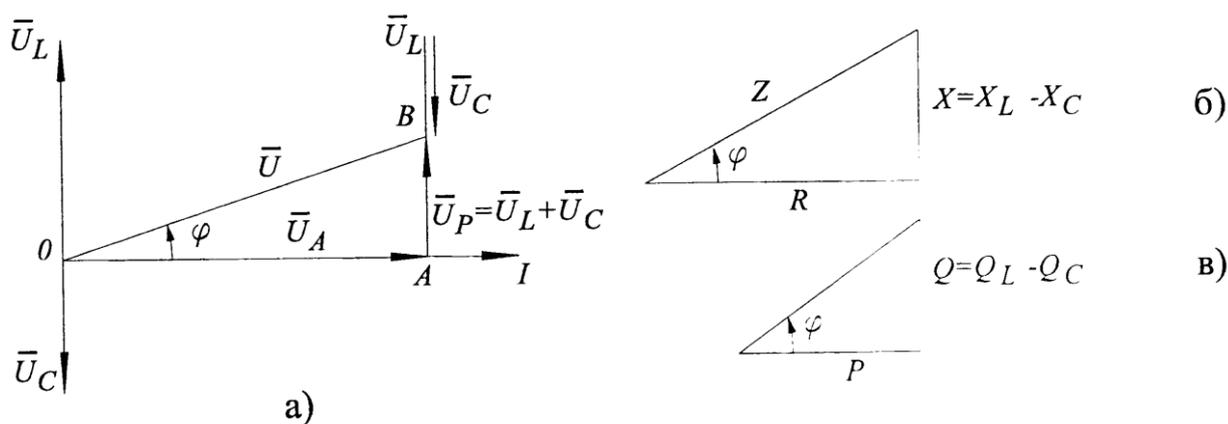


Рис. 3. Векторная диаграмма (а), треугольники сопротивлений (б) и мощностей (в)

Прямоугольный треугольник OAB называют **треугольником напряжений**.

Если модули напряжений, входящие в этот треугольник, разделить на модуль тока, то получим значения активного R , реактивного X и полного Z сопротивлений:

$$R = \frac{U_a}{I}; \quad X = X_L - X_C = \frac{U_L - U_C}{I} = \frac{U_p}{I}; \quad Z = \frac{U}{I}, \quad (9)$$

используя которые, можно в определенном масштабе построить треугольник сопротивлений (рис. 3. б). Из рассмотрения этого треугольника следует, что

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (10)$$

Для получения треугольника мощностей (рис. 3, в) умножив модули напряжений \bar{U} , \bar{U}_p и \bar{U}_a на модуль тока I :

$$S = UI; \quad P = U_a I; \quad Q = U_p I, \quad (11)$$

где S – полная мощность цепи;

P – активная мощность цепи;

Q – реактивная мощность, $Q = Q_L - Q_C$.

Выражая значения U_a и U_p через U (из прямоугольного треугольника CAB), будем иметь

$$S = UI; \quad P = UI \cos \varphi, \quad Q = UI \sin \varphi, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (12)$$

Хотя все три мощности имеют одну и ту же размерность – вольт-ампер, для их различия введены следующие наименования этой единицы измерения:

- а) для P – ватт (Вт);
- б) для Q – вольт-ампер реактивный (вар);
- в) для S – вольт-ампер (В·А).

При рассмотрении случая, когда $X_L < X_C$, необходимо иметь в виду, что порядок построения векторной диаграммы аналогичен рассмотренному выше. Однако, т.к. $U_L < U_C$, угол φ принимает отрицательные значения (напряжение отстает по фазе от тока).

Реактивное индуктивное и емкостное сопротивления цепи переменного тока могут также полностью уравновесить друг друга $X_L - X_C = 0$. В этом случае в цепи возникает **резонанс напряжений**, т.е. явление, при котором в последова-

тельной цепи, состоящей из элементов R , L , и C , общее напряжение на входе совпадает по фазе с ее током. При этом индуктивное и емкостное напряжения компенсируют друг друга $U_L + U_C = 0$, т.к. они равны по величине и противоположны по фазе. Отметим, что каждая из реактивных составляющих \bar{U} , т.е. \bar{U}_L и \bar{U}_C , может быть значительно больше, чем напряжение, приложенное к цепи. Отношение $U_L / U = U_C / U = Q$ называют добротностью контура. Величина обратная добротности $1/Q = d$ называется затуханием.

Порядок построения векторной диаграммы сохраняется прежним. Согласно условию возникновения резонанса напряжений

$$X_L = X_C \rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow 2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (13)$$

этот режим может быть получен при изменении частоты питающего напряжения, величины индуктивности или емкости соответствующих элементов рассматриваемой цепи. Резонансная частота последовательного колебательного контура

$$f_{\text{рез.}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}. \quad (14)$$

Резонанс напряжений применяется в технике электроизмерений и в автоматике, в первом случае, при измерении неэлектрических величин, во втором – в приборах автоматического регулирования частоты, а также в цепях электрических фильтров, в радиоаппаратуре.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь на стенде СЭЦ-1 или СЭЦ-1К в соответствии с рис. 4.

Для подключения вольтметров и амперметров использовать приложенные в комплекте соединительные концы.

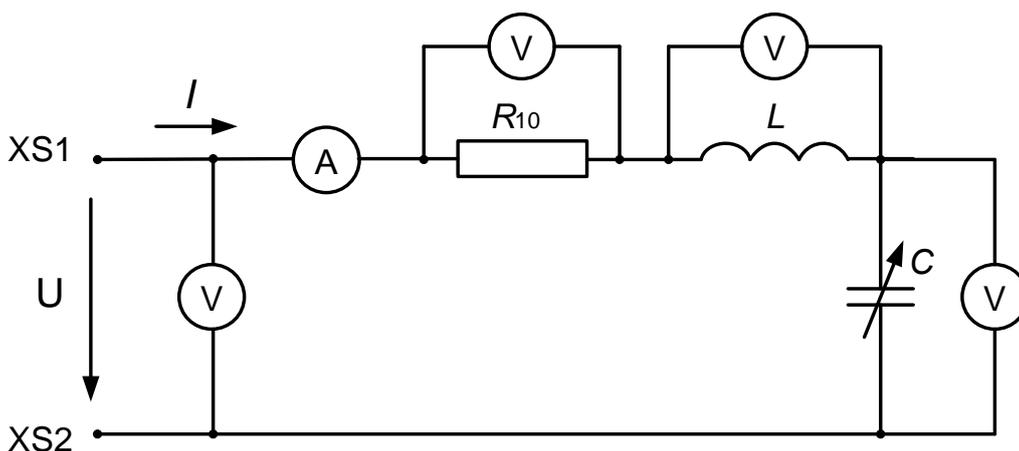


Рис. 4. Электрическая схема лабораторной установки

2. Измерить действующие значения тока в цепи, а также напряжений на входе цепи, на резисторе U_{R10} , катушке индуктивности U_K , батарее конденсаторов U_C . В процессе проведения лабораторной работы выбрать пять различных значения емкости конденсаторов. Полученные данные занести в табл.2.

Результаты измерений

Таблица 2

Значение C	I	U	U_{R10}	U_K	U_C
	А	В	В	В	В
$C = C_1$					
$C = C_2$					
$C = C_3$					
$C = C_4$					
$C = C_5$					

3. При исследовании процессов в цепях переменного тока следует учитывать, что катушка индуктивности обладает активным сопротивлением R_K , которое можно рассматривать как включенное последовательно с индуктивностью (рис. 5). Поэтому для получения достоверных результатов необходимо выделить активную и индуктивную составляющие напряжений на катушке: $U_{RK} = R_K I$; $U_L = IX_L$.

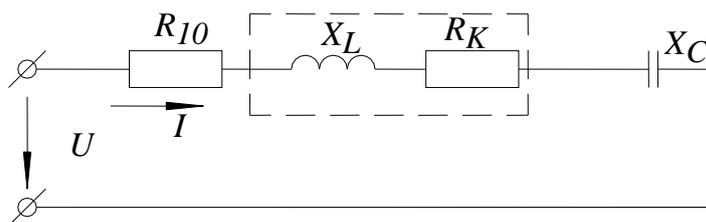


Рис. 5. Расчетная схема замещения

Активная составляющая напряжения цепи находится суммированием напряжения, измеренного на резисторе R_{10} и напряжения U_{RK} , полученного расчетным путем: $U_a = U_{R10} + U_{RK}$.

В данной работе R_K и R_{10} необходимо измерить цифровым мультиметром.

Значение U_P находится из соотношения $U_P = U_L - U_C$.

4. Используя выражение (9) и соотношение $X_C = \frac{U_C}{I}$, определить R , X_C , X_L , Z , найти $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$ и $\sin \varphi = \frac{X}{Z}$. С помощью соотношения (11) найти P , S , и Q .

Полученные данные занести в табл. 3 и по ним построить векторные диаграммы для трех случаев: до резонанса ($X_L < X_C$); при резонансе ($X_L = X_C$); после резонанса ($X_L > X_C$), построить треугольники мощностей и сопротивлений.

Построить графики зависимостей: $U_L = f(C)$; $U_C = f(C)$; $I = f(C)$; $\cos \varphi = f(C)$ в одной системе координат, но в разных масштабах.

5. Сделать выводы об основных соотношениях в цепи переменного тока, содержащей последовательно соединенные R , L , C , о возможных режимах работы.

Результаты расчетов

Таблица 3

Значение С	U_{RK}	U_L	U_a	U_P	R	X_C	X
	В	В	В	В	Ом	Ом	Ом
$C=C_1$							
$C=C_2$							
$C=C_3$							
$C=C_4$							
$C=C_5$							

Окончание табл. 3

Значение С	Z	$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	S	P	Q	C
	Ом	-	-	В·А	Вт	вар	мкФ
$C=C_1$							
$C=C_2$							
$C=C_3$							
$C=C_4$							
$C=C_5$							

Контрольные вопросы

1. Какое соединение элементов электрической цепи называется последовательным?
2. Чему равен сдвиг по фазе между напряжением и током при включении в цепь сопротивлений: активного, индуктивного, емкостного?
3. Как определяется полное сопротивление цепи при последовательном соединении R, L, C .
4. Напишите уравнение по второму закону Кирхгофа для последовательного соединения R, L, C .
5. Начертите векторную диаграмму напряжений для цепи с последовательно соединенными R, L, C при условии

а) $X_L > X_C$

б) $X_L < X_C$

6. Постройте треугольники сопротивлений и мощностей для случаев, указанных в п.4.
7. Напишите формулу для определения активной, реактивной и полной мощности. В каких единицах измеряются P , S и Q ?
8. Как зависят от частоты питающей сети индуктивное и емкостное сопротивления?
9. Расскажите о резонансе напряжений. Постройте векторную диаграмму.
10. Как определить резонансную частоту последовательного колебательного контура?
11. Как определить добротность последовательного колебательного контура?
12. Как определить затухание последовательного колебательного контура?
13. Практическое применение резонанса напряжений.

Лабораторная работа № 5

Параллельное соединение катушки индуктивности и конденсатора

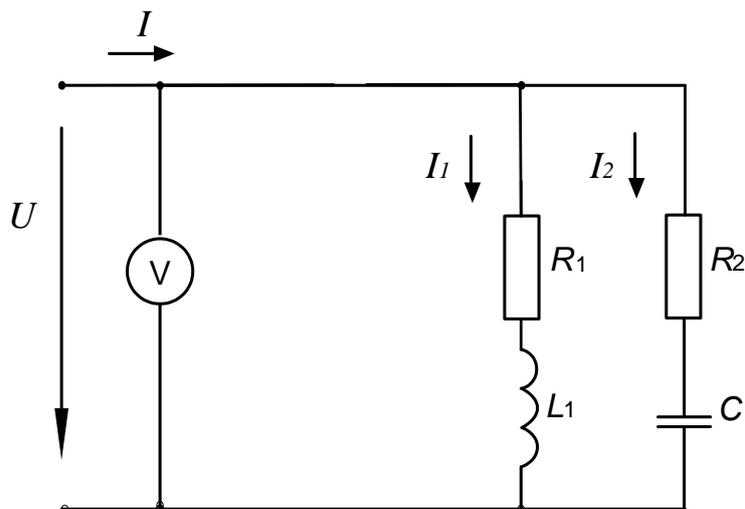
Цель работы:

1. Проверить основные соотношения для цепи, содержащей параллельно соединенные реактивные элементы.
2. Исследовать режим резонанса токов.
3. Ознакомиться с построением векторных диаграмм напряжений и токов.

Краткие теоретические сведения

Основной схемой соединения приемников переменного тока является параллельная схема. На рис. 6 показано соединение двух приемников – катушки индуктивности и конденсатора. Каждый приемник характеризуется активным и реактивным сопротивлениями. Напряжение на приемниках одинаковое и равно сетевому U .

Анализ электрического состояния цепей с параллельным соединением приемников производится следующими методами.


 Рис. 6. Цепь переменного тока с параллельным соединением R, L, C

1. Комплексный метод

Токи в ветвях схемы определяются по закону Ома в комплексной форме записи:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{R_1 + jX_1} = \frac{\dot{U}}{Z_1}; \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{R_2 - jX_2} = \frac{\dot{U}}{Z_2}, \quad (15)$$

где $X_1 = 2\pi fL_1$ – реактивное (индуктивное) сопротивление первой ветви;

Z_1 – комплексное сопротивление первой ветви;

$X_2 = \frac{1}{2\pi fC}$ – реактивное (емкостное) сопротивление второй ветви;

Z_2 – комплексное сопротивление второй ветви.

Ток в неразветвленной части цепи определяется по первому закону Кирхгофа в комплексной форме записи $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$.

Построение векторных диаграмм (рис. 7) начинаем с построения вектора

Построение векторных диаграмм (рис. 7) начинаем с построения вектора

напряжения \dot{U} , который откладываем по действительной оси.

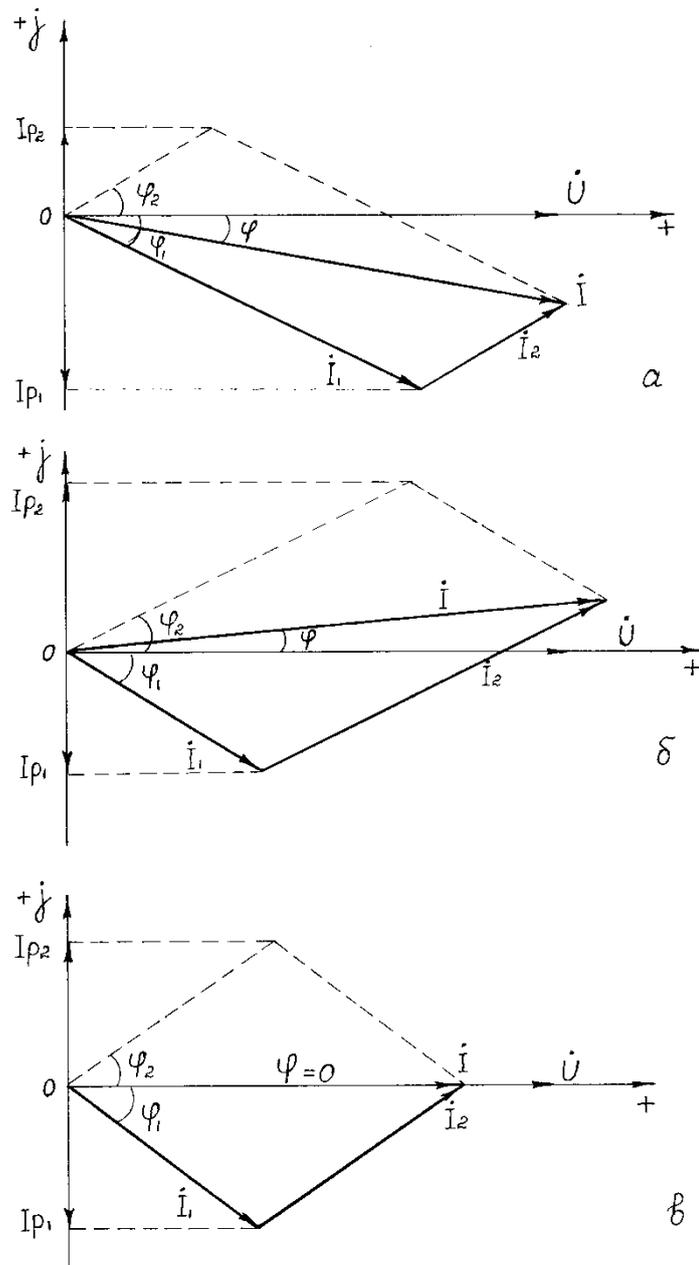


Рис. 7. Векторные диаграммы для цепи с параллельным соединением приемников: а - $I_{p1} > I_{p2}$; б - $I_{p1} < I_{p2}$; в - $I_{p1} = I_{p2}$

Далее откладываем токи \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I} под расчетными углами φ_1 , φ_2 , φ . Проекции токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 на мнимую ось дают значения реактивных составляющих I_{p1} и I_{p2} . В последнем случае (рис. 7, в), когда $I_{p1} = I_{p2}$ наступает резонанс токов.

2. Метод проекций

На векторной диаграмме цепи (рис. 8) представлены активные и реактивные составляющие токов \dot{I}_1 , \dot{I}_2 и \dot{I} .

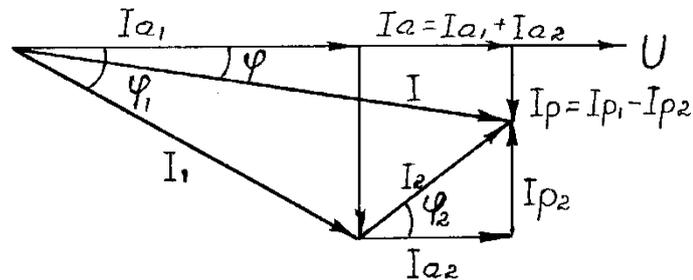


Рис. 8. Векторная диаграмма токов для цепи с параллельным соединением приемников

Такое разделение на активные и реактивные составляющие условно, так как реально невозможно разделить в катушке индуктивности активное сопротивление R и индуктивное X_L , а в конденсаторе – активное сопротивление R и емкостное X_C .

Порядок расчета по методу проекций следующий.

Определяем токи в ветвях схемы

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} = \frac{U}{z_1}; I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{U}{z_2}. \quad (16)$$

Из треугольников сопротивлений

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{z_1}; \quad \sin \varphi_1 = \frac{X_1}{z_1}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{z_2}; \quad \sin \varphi_2 = -\frac{X_2}{z_2}. \quad (17)$$

Определяем активные и реактивные составляющие токов ветвей:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= I_1 \cdot \cos \varphi_1 & I_{p1} &= I_1 \cdot \sin \varphi_1 \\ I_{a2} &= I_2 \cdot \cos \varphi_2 & I_{p2} &= I_2 \cdot \sin \varphi_2 \end{aligned} \quad (18)$$

Ток в неразветвленной части цепи:

$$I = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} - I_{p2})^2} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}, \quad (19)$$

а УГОЛ $\varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a}$.

3. Метод проводимостей

Основан на соотношениях из треугольника проводимостей. Определяем активные и реактивные проводимости ветвей схемы рис. 6:

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{R_1}{R_1^2 + X_1^2} = \frac{R_1}{z_1^2} & g_2 &= \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2} = \frac{R_2}{z_2^2} \\ b_1 &= \frac{X_1}{R_1^2 + X_1^2} = \frac{X_1}{z_1^2} & b_2 &= \frac{X_2}{R_2^2 + X_2^2} = \frac{X_2}{z_2^2} \end{aligned} \quad ; \quad (20)$$

Полная проводимость цепи:

$$y = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} = \sqrt{g^2 + b^2} \quad . \quad (21)$$

где: $g = g_1 + g_2$ – активная проводимость цепи;

$b = b_1 - b_2$ – реактивная проводимость цепи.

Ток в неразветвленной части цепи $I = U \cdot y$. Угол сдвига фаз между напряжением U и током I :

$$\varphi = \arctg \frac{b}{g} \quad (22)$$

При равенстве реактивных проводимостей ветвей $b_1 = b_2$ наступает резонанс токов, реактивная проводимость цепи в этом случае $b = b_1 - b_2 = 0$. Реактивная составляющая тока в неразветвленной цепи $I_p = U \cdot b = 0$, ток в неразветвленной части цепи $I = I_a = U \cdot g$ совпадает по фазе с напряжением U . Следует заметить, что токи в параллельных ветвях равны и противоположны по фазе $I_1 = b_1 \cdot U = I_2 = b_2 \cdot U$, намного превышают ток I .

Резонансная частота параллельного колебательного контура:

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}} \quad (23)$$

В радиотехнике, где используется явление резонанса токов, величины R_1 и R_2 обычно незначительны по сравнению с X_L и X_C , поэтому на высоких частотах

$$f_{рез} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad , \quad (24)$$

т.е. резонансная частота параллельного колебательного контура совпадает с резонансной частотой последовательного колебательного контура.

При постоянной частоте f резонанс в цепи может получить изменением индуктивности L или емкости C .

Резонанс токов используется в радиоэлектронной аппаратуре, в генераторах, электрических фильтрах, резонансных контурах. Так, например, в передатчике, в режиме резонанса токов работают контуры, включенные в цепь переменной составляющей анодного тока генераторных ламп. Резонанс токов находит также применение в промышленных энергетических установках для повышения коэффициента мощности $\cos\varphi$.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь на стенде СЭЦ-1 или СЭЦ-1К в соответствии с рис. 9.

Для подключения вольтметров и амперметров использовать приложенные в комплекте соединительные концы.

2. Измерить действующее значение напряжения на входе цепи U , а также токов I , I_1 , I_2 . В процессе проведения лабораторной работы выбрать пять различных значений емкости конденсаторов. Полученные данные занести в табл. 4.

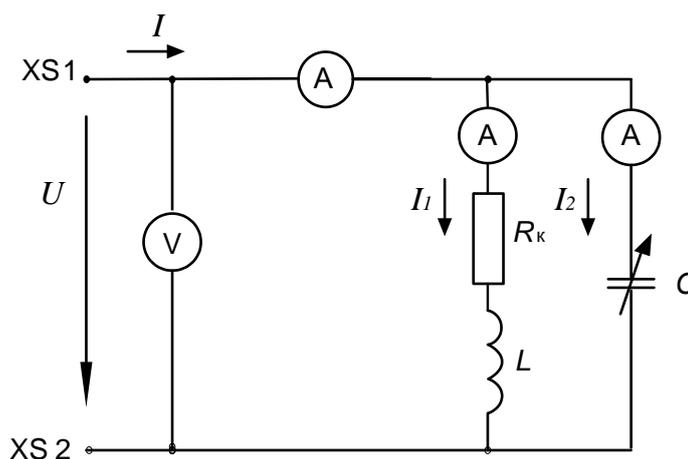


Рис. 9. Схема лабораторной установки

Результаты измерений

Таблица 4

Значение C	U	I	I_1	I_2
	В	А	А	А
$C = C_1$				
$C = C_2$				
$C = C_3$				
$C = C_4$				
$C = C_5$				

3. Определить: $z = \frac{U}{I}$; $z_1 = \frac{U}{I_1}$; $\varphi_1 = \arccos \frac{R_k}{z_1}$; $g_1 = \frac{R_k}{z_1^2}$; $X_L = \sqrt{z_1^2 - R_k^2}$;

$$b_1 = \frac{X_L}{z_1^2}; X_2 = \frac{U}{I_2} = z_2; b_2 = \frac{X_2}{z_2^2}; C = \frac{10^6}{X_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}; \varphi = \arctg \frac{b_1 - b_2}{g_1}.$$

В данной работе R_k необходимо замерить цифровым мультиметром.

Полученные данные занести в таблицу 5 и по ним построить векторные диаграммы для трех случаев: до резонанса ($C=C_2$); при резонансе ($C=C_3$); после резонанса ($C=C_4$).

Построить графики зависимостей: $I=f(C)$; $I_1=f(C)$; $I_2=f(C)$; $z=f(C)$; $\varphi=f(C)$ в одной системе координат, но в разных масштабах.

Результаты расчетов

Таблица 5

Значение C	z	b_1	z_2	b_2	C	φ
	Ом	Ом ⁻¹	Ом	Ом ⁻¹	мкФ	град.
$C = C_1$						
$C = C_2$						
$C = C_3$						
$C = C_4$						
$C = C_5$						

4. Сделать выводы об основных соотношениях в цепи переменного тока, содержащей параллельно соединенные R, L, C , о возможных режимах работы.

Контрольные вопросы

1. Какое соединение элементов электрической цепи называется параллельным?
2. Расчет электрической цепи при параллельном соединении элементов комплексным методом.
3. Расчет электрической цепи при параллельном соединении элементов методом проекций.
4. Расчет электрической цепи при параллельном соединении элементов методом проводимостей.
5. Объясните метод построения векторных диаграмм по известным углам сдвига фаз и токов ветвей.
6. Как зависят от частоты питающей сети индуктивное и емкостное сопротивление?
7. Расскажите о резонансе токов. Постройте векторную диаграмму.
8. Как определить резонансную частоту параллельного колебательного контура?
9. При каких условиях контур является для источника индуктивной нагрузкой, когда емкостной и когда активной?
10. Практическое применение резонанса токов.

Лабораторная работа №6

Коэффициент мощности в цепях переменного тока

Цель работы:

1. Ознакомиться с основными понятиями и технико-экономическим значением повышения коэффициента мощности.
2. Изучить практические способы определения и повышения коэффициента мощности электрических цепей.

Краткие теоретические сведения

Приемники переменного тока потребляют как активную мощность (лампы накаливания, электронагревательные приборы – утюги, чайники, плиты и

т.д.), так и активно-индуктивную (электродвигатели, трансформаторы и т. д.). Полезную работу совершает только активная мощность, а остальная тратится на нагрев проводов, потери в приемниках и т.д. Так, например, если активная мощность P передается при $\cos\varphi = 1$, то ток в линии

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi} = \frac{P}{U}, \quad (25)$$

где U – напряжение в линии.

Если активная мощность P передается при $\cos\varphi = 0,5$, то

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos\varphi} = \frac{P}{U \cdot 0,5} = 2 \frac{P}{U}, \quad (26)$$

т.е. ток увеличился в два раза по сравнению с первым случаем. Увеличение тока в два раза требует увеличения сечения проводов, что приводит к соответствующему увеличению капитальных затрат, поэтому на промышленных предприятиях поддерживают $\cos\varphi = 0,90 - 0,92$. Повышение коэффициента мощности осуществляется, прежде всего, естественным путем за счет упорядочения энергетического режима оборудования, рационального использования его мощностей, замены малозагруженных трёхфазных асинхронных двигателей двигателями меньших мощностей, ограничения длительности режимов холостого хода трансформаторов, двигателей, электромагнитов и т.д. Так, например, для трёхфазного асинхронного двигателя в режиме холостого хода $\cos\varphi = 0,1 \div 0,3$, при номинальной нагрузке $\cos\varphi = 0,8 \div 0,92$.

В случае необходимости используют искусственные способы повышения коэффициента мощности. Для этого параллельно нагрузке включают устройства с активным сопротивлением или синхронные компенсаторы (синхронные двигатели облегченной механической конструкции, предназначенные для повышения $\cos\varphi$) или батареи конденсаторов. Емкость батареи конденсаторов определяется по формуле:

$$C = \frac{P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2)}{2\pi f U^2} [\Phi], \quad (27)$$

где φ_1 – значение угла, при котором работает энергетическая установка;

φ_2 – значение угла, при котором должна работать энергетическая установка.

Графическая иллюстрация искусственных методов повышения $\cos\varphi$ может быть представлена треугольниками мощностей.

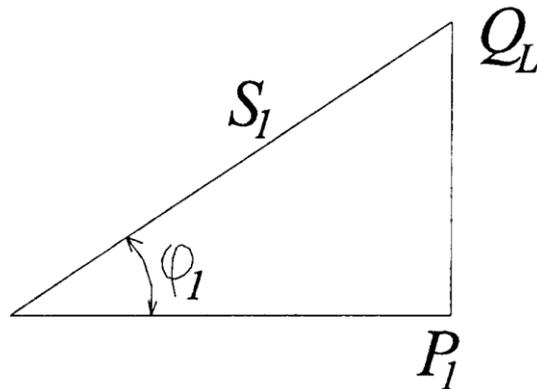


Рис. 10. Треугольник мощностей для исходной цепи с активно-индуктивным сопротивлением

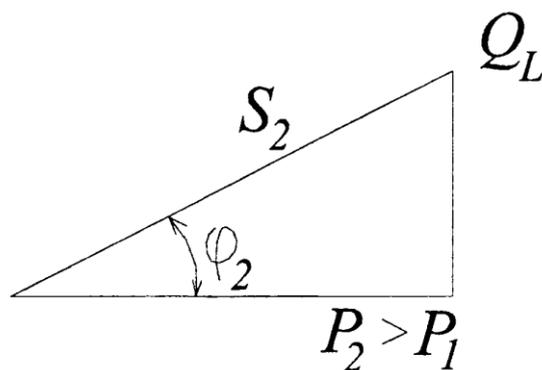


Рис. 11. Треугольник мощностей при параллельном подключении к цепи активного сопротивления

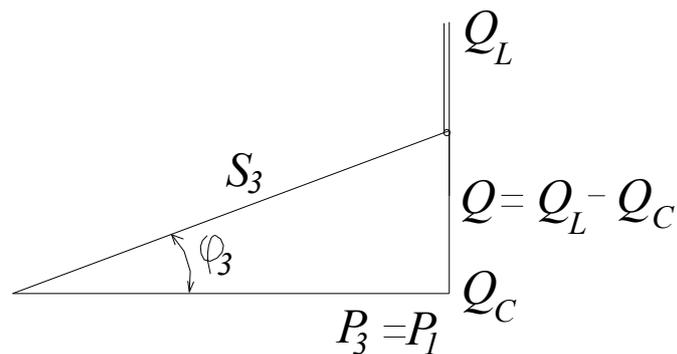


Рис. 12. Треугольник мощностей при параллельном подключении к цепи емкостного сопротивления

Полная электрическая мощность цепи:

$$S = U \cdot I \quad (28)$$

Величина активной мощности:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (29)$$

Степень полезного использования потребителем электрической мощности генератора определяется величиной косинуса угла сдвига фаз между током I и напряжением U :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (30)$$

который называется коэффициентом мощности потребителя или коэффициентом мощности цепи переменного тока.

Реактивная мощность:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = S \sin \varphi. \quad (31)$$

Между мощностями S , P и Q существует зависимость:

$$S^2 = P^2 + Q^2. \quad (32)$$

Генератор выгодно эксплуатировать так, чтобы вырабатываемая электроэнергия полностью использовалась у потребителя на совершение полезной работы. Это происходит при $\cos \varphi = 1$.

Использование резонанса токов (см. лаб. работу №3) дает возможность раз-

грузить линию от реактивного тока, замкнув колебания энергии в контуре, образуемом емкостью и индуктивностью, при этом $Q_L = Q_C$. В большинстве случаев осуществляется не полная компенсация сдвига фаз, так как наличие небольшого реактивного тока при $\cos \varphi \geq 0,95$ практического значения не имеет ($I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$, где I_a – активная составляющая тока цепи, I_p – реактивная составляющая тока цепи), а полная компенсация требует дополнительной установки батарей конденсаторов значительной емкости.

Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь на стенде СЭЦ-1 или СЭЦ-1К в соответствии с рис. 11.

Для подключения вольтметров и амперметров использовать приложенные в комплекте соединительные концы.

2. Включить общий рубильник стенда и измерить действующее значение напряжения на входе цепи U (устанавливается по указанию преподавателя или лаборанта), а также тока I_1 , при этом рубильники P_1 и P_2 выключены. Полученные данные занести в табл. 6.

3. Включить рубильник P_1 . Измерить действующее значение напряжения на входе цепи U , а также токов I_1, I_2 . Полученные данные занести в табл. 6.

4. Выключить рубильник P_1 , затем включить рубильник P_2 . Полученные данные занести в табл. 6.

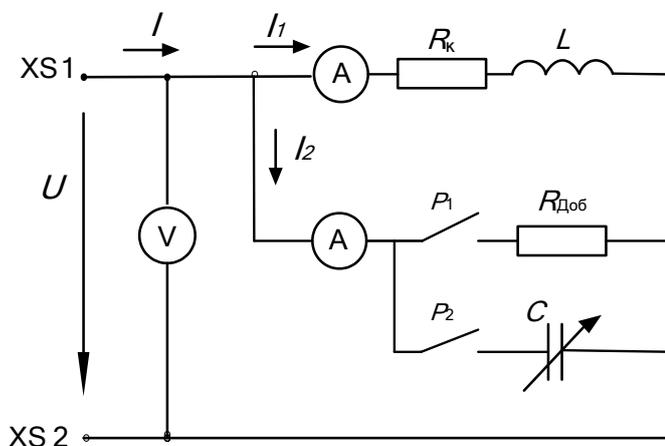


Рис. 11. Схема лабораторной установки

Результаты измерений

Таблица 6

№ п/п	Измерено				
	$U, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$R_k, Ом$	$R_{доб}, Ом$
1					
2					
3					

5. Произвести вычисления по формулам и записать результаты в табл. 7.

Активная мощность цепи:

$$\text{в первом и третьем опыте } P = I_1^2 \cdot R_k; \quad (33)$$

$$\text{во втором опыте } P = I_1^2 \cdot R_k + I_2^2 R_{доб}. \quad (34)$$

Реактивная мощность катушки:

$$Q_L = I_1^2 \cdot X_L. \quad (35)$$

Реактивная мощность конденсатора:

$$Q_C = I_1^2 \cdot X_C. \quad (36)$$

Суммарная реактивная мощность:

$$Q = Q_L - Q_C. \quad (37)$$

Полная электрическая мощность цепи:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (38)$$

Коэффициент мощности цепи переменного тока:

$$\cos \varphi = P/S. \quad (39)$$

Общий ток цепи:

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \varphi}. \quad (40)$$

Результаты расчетов

Таблица 7

№ п/п	Вычислено								
	$X_L,$ Ом	$X_C,$ Ом	$P,$ Вт	$Q_L,$ вар	$Q_C,$ вар	$Q,$ вар	$S,$ В·А	$\cos \varphi$	$I,$ А
1									
2									
3									

Контрольные вопросы

1. Что называют коэффициентом мощности электрической цепи?
2. От чего зависит угол сдвига по фазе φ между током и напряжением в электрической цепи?
3. Как рассчитать величину $\cos\varphi$ электрической цепи?
4. Как влияет величина $\cos\varphi$ на значение тока при неизменных значениях напряжения и активной мощности в цепи?
5. В чем заключается технико-экономическое значение $\cos\varphi$?
6. Какие существуют естественные способы повышения $\cos\varphi$?
7. Поясните суть и методы искусственных способов повышения $\cos\varphi$.
8. Как влияет значение $\cos\varphi$ на нагрев проводов линии электропередач?

Лабораторная работа №7

Соединение приемников звездой в трехфазной цепи

Цель работы

1. Установить соотношения между линейными и фазными величинами токов и напряжений при различных режимах работы цепи.
2. По опытным данным построить векторные диаграммы напряжений и токов при симметричной и несимметричной нагрузке фаз.
3. Выяснить влияние обрыва линейного и нейтрального проводов на режим работы потребителей.

Краткие теоретические сведения

В современной электроэнергетике наибольшее распространение получили трехфазные цепи, которые были разработаны в конце XIX века выдающимся русским электротехником Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским.

Источником электрической энергии в трехфазных цепях является синхронный генератор, у которого три обмотки A , B , C (фазы) сдвинуты одна по отношению к другой на угол 120° . От такого генератора могут отходить четыре провода – три линейных A , B , C и один нейтральный N .

К этим проводам присоединяются потребители (приемники), которые могут

быть как однофазными (лампы накаливания, бытовые электроприборы, ручной электроинструмент и т. д.), так и трехфазными (асинхронные двигатели, индукционные печи и т.д.).

Отдельные фазы трехфазных потребителей или однофазные потребители при подключении в трехфазную цепь могут соединяться между собой по способу «звезда». Для соединения звездой, например, трех однофазных потребителей необходимо их концы X, Y, Z объединить электрически в одну общую нейтральную или нулевую точку O' . К полученной нейтральной точке присоединяется нейтральный провод $O-O'$, а к началам потребителей A, B, C – соответственно линейные провода $A-A, B-B, C-C$ от генератора (рис.12, а).

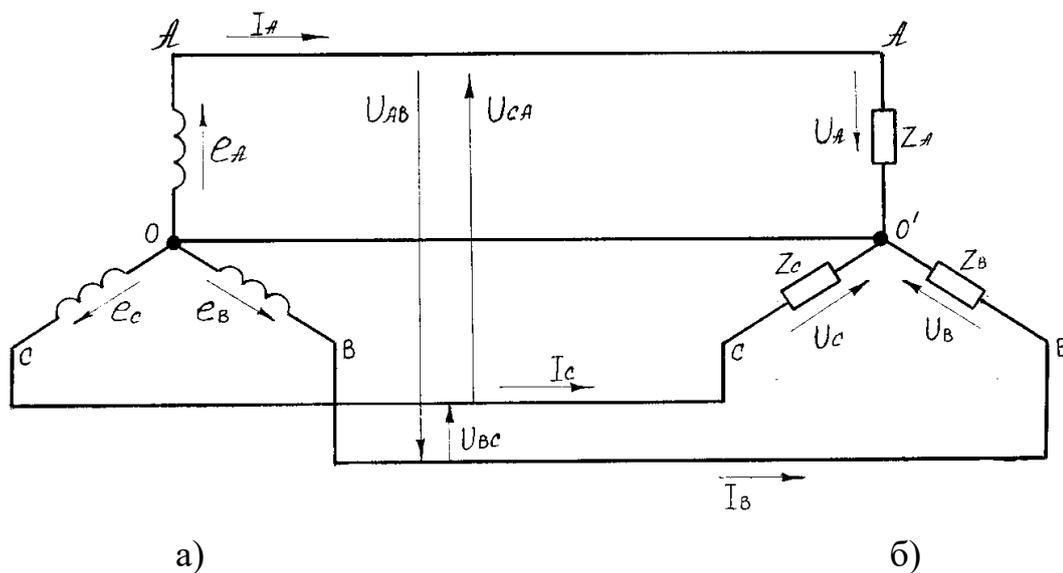


Рис.12. Схема соединения приемников звездой

Для соединения звезда характерно, что токи в линейных проводах I_L являются одновременно и фазными токами I_Φ :

$$I_L = I_\Phi \quad (41)$$

При установлении соотношения по 1-му закону Кирхгофа между фазными токами потребителей I_A, I_B, I_C током в нейтральном проводе I_N принято, что фазные токи всегда условно направлены к нейтральной точке соединения N , а ток в нейтральном проводе – от этой точки (рис.12, б):

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C. \quad (42)$$

Напряжение между началом и концом каждого потребителя, или между линейным и нейтральным проводом, называется фазным напряжением (U_{Φ}) и обозначается соответственно: U_A , U_B , U_C . Напряжение между двумя линейными проводами называется линейным напряжением ($U_{\text{Л}}$) и обозначается соответственно U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

В общем случае фазные и линейные напряжения связаны между собой согласно 2-му закону Кирхгофа:

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B; \quad \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C; \quad \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A. \quad (43)$$

Каждый из однофазных потребителей в трехфазной цепи характеризуется величинами полного сопротивления Z_A , Z_B , Z_C и коэффициентами мощности $\cos \varphi_A$, $\cos \varphi_B$, $\cos \varphi_C$. При численном равенстве полных сопротивлений фазных нагрузок и равенстве их коэффициентов мощности имеет место симметричная нагрузка фаз. Нарушение хотя бы одного из отмеченных равенств создает несимметричную нагрузку.

Для потребителя каждой фазы справедливы, в общем случае, следующие зависимости:

$$Z_{\Phi} = \sqrt{R_{\Phi}^2 + X_{\Phi}^2}, \quad I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\Phi}}, \quad \cos \varphi = \frac{R_{\Phi}}{Z_{\Phi}}. \quad (44)$$

В случае симметричной активной нагрузки фазные токи I_A , I_B , I_C равны друг другу по величине и на векторной диаграмме совпадают по направлению с соответствующими фазными напряжениями U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} (рис. 13, а). Тока в нейтральном проводе I_N в этом случае не будет, что может быть подтверждено графическим решением векторного уравнения (42).

При несимметричной нагрузке фаз нарушается равенство фазных токов I_A , I_B , I_C и появляется ток I_N в нейтральном проводе (рис. 13 б).

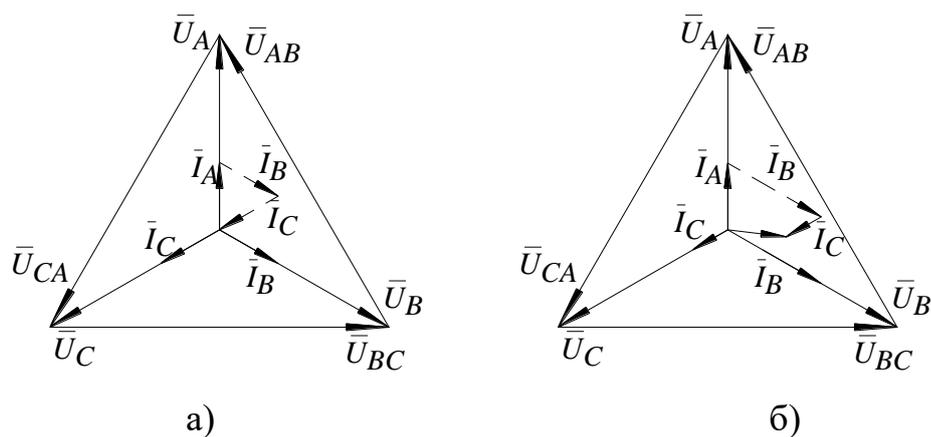


Рис. 13. Векторные диаграммы токов и напряжений: при симметричной (а) и несимметричной (б) активной нагрузке фаз

Следует отметить, что при симметричной и несимметричной активной нагрузке фаз (рис. 13, а, б) наличие нейтрального провода обеспечивает постоянство фазных напряжений. Причем между этими напряжениями существует следующая зависимость:

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}, \quad (45)$$

которая легко может быть установлена из векторных диаграмм.

При несимметричной активной нагрузке и обрыве нейтрального провода наблюдается смещение потенциала нейтральной точки и нарушение равенства между фазными напряжениями – фаза с большим сопротивлением оказывается под повышенным напряжением, что может привести к аварийной ситуации. Векторную диаграмму в этом случае строят по опытным данным методом засечек (рис. 14, а). Сначала вычерчивают треугольник линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , которые сохранили свое равенство. Затем из соответствующих вершин треугольника радиусами, равными измеренным фазным напряжениям U_A , U_B , U_C , описывают дуги, пересечение которых определяет положение нейтральной точки.

Обрыв, например, одного из линейных проводов $A-A$ или перегорание предохранителя в нем (рис. 12) при целом нейтральном проводе приводит к отключению питания потребителей только фазы A . Режим работы двух других фаз не изменяется.

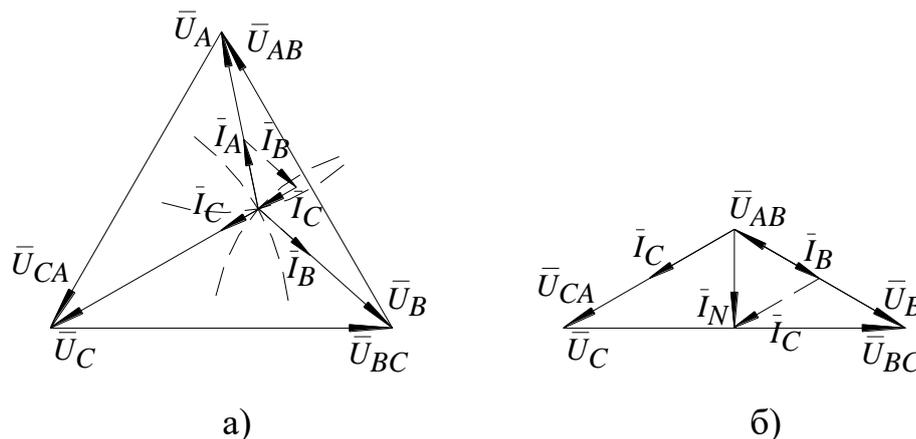


Рис. 14. Векторные диаграммы токов и напряжений при несимметричной активной нагрузке фаз и обрыве нейтрального (а) и линейного (б) проводов

Однако ток в нейтральном проводе I_N несколько увеличится и станет равным векторной суммой только двух фазных токов I_B и I_C (рис. 14, б). Обрыв в рассматриваемом случае еще и нейтрального провода может резко сказаться на работе включенных потребителей, так как произойдет перераспределение напряжений потребителей пропорционально величинам их сопротивлений.

Исходя из вышесказанного, всегда, стремятся поддерживать целостность нейтрального провода – в него никогда не ставят предохранители или выключатели.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему лабораторной установки на стенде СЭЦ-1 или СЭЦ-1К (рис. 15).

2. Опыт №1 – симметричная активная нагрузка с нулевым проводом.

3. Опыт №2 – несимметричная активная нагрузка с нулевым проводом.

4. Опыт №3 – несимметричная активная нагрузка без нулевого провода.

5. Опыт №4 – обрыв фазы А.

Результаты экспериментов записываем в таблицу 8.

По данным измерений и расчётов строим векторные диаграммы для каждого опыта.

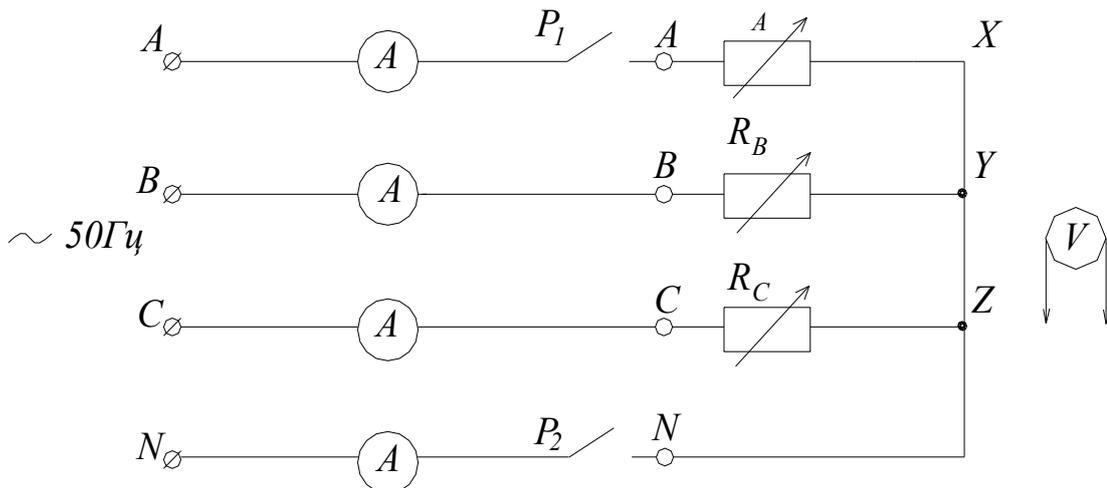


Рис. 15. Схема лабораторной установки

Результаты измерений и расчетов

Таблица 8

№ п/п	Данные измерений									Результаты вычислений							
	Ток, А				Напряжение, В					Нагрузка, Ом			Активная мощность, Вт				
					Фазное			Линейное					Фазная		Общая		
	IA	IB	IC	IN	UA	UB	UC	UAB	UBC	UCA	RA	RB	RC	PA	PB	PC	P
1																	
2																	
3																	
4																	

Контрольные вопросы

1. Как соединить потребители звездой ?
2. Какие напряжения и токи называются: а) фазными; б) линейными?
3. Запишите векторные уравнения, связывающие между собой фазные и линейные напряжения.
4. Каковы соотношения между: а) фазными и линейными токами; б) фазными и линейными напряжениями при симметричной нагрузке?

5. Какие функции выполняет нулевой провод ?
6. Как отразится обрыв нулевого провода на работу потребителей при несимметричной нагрузке ?
7. Как изменятся напряжения потребителей при обрыве одного из линейных проводов и отсутствии нулевого провода?
8. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений при несимметричной активно-индуктивной нагрузке.
9. По каким формулам рассчитываются мощности соединения «звезда» при симметричной и несимметричной нагрузке?
10. Приведите пример использования симметричной (несимметричной) нагрузки, соединенной звездой в технике.
11. Соберите схему лабораторной установки.
12. Расскажите порядок выполнения лабораторной работы.

Лабораторная работа №8

Соединение приемников треугольником в трёхфазной цепи

Цель работы

1. Установить соотношения между фазными и линейными величинами токов и напряжений при различных режимах работы.
2. По опытным данным построить векторные диаграммы токов и напряжений при симметричной и несимметричной нагрузках фаз.
3. Выяснить влияние обрыва линейного и фазного проводов на режим работы потребителя.

Краткие теоретические сведения

При выполнении соединения «треугольник» необходимо в первую очередь для каждого из трех однофазных потребителей установки определить начало и конец фаз. Например, для трехфазных катушек статора асинхронного электродвигателя (или трехфазного трансформатора) это будут соответственно $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$. Далее, конец X соединяется с началом B , Y с C , а Z с A .

Образовавшиеся точки XB , YC , ZA присоединяются к линейным проводам $A-A$, $B-B$, $C-C$ (рис. 16, а).

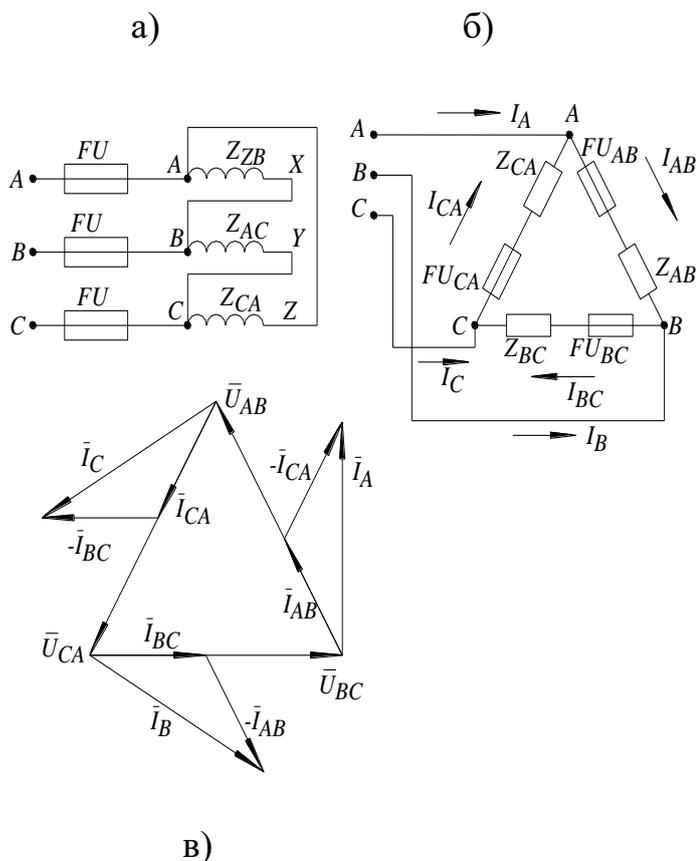


Рис. 16. Схема «треугольник»

Такое соединение более наглядно может быть показано в виде треугольника (рис. 16, б).

Каждый из однофазных потребителей определяется величинами полного сопротивления Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} и коэффициента мощности $\cos \varphi_{AB}$, $\cos \varphi_{BC}$, $\cos \varphi_{CA}$.

При равенстве полных сопротивлений фазных нагрузок и их коэффициентов мощности создается симметричная нагрузка соединения. Нарушения этих равенств создает несимметричную нагрузку.

Фазные потребители защищены от токов короткого замыкания плавкими предохранителями (FU_{AB} , FU_{BC} , FU_{CA}). Короткое замыкание в фазе AB , например, приведет к плавлению предохранителя FU_{AB} , что эквивалентно разрыву фазной нагрузки AB .

На линейных проводах также установлены предохранители FU_A , FU_B , FU_C .

Плавление любого из них создает отключение соответствующего линейного провода.

С учетом этого в лабораторной работе изучаются следующие режимы работы соединения «треугольник»:

1. Симметричный режим нагрузки фаз.
2. Несимметричный режим.
3. Режим обрыва фазы AB .
4. Режим обрыва линейного провода A .

При соединении «треугольник» фазный потребитель подключен к двум линейным проводам, т. е. находится под линейным напряжением, которое одновременно является и фазным, поэтому $U_{\Phi} = U_{Л}$.

При установлении соотношения между фазными и линейными токами принято условие, что линейные токи направлены в условно положительном направлении от источника электрической энергии к потребителю, а фазные токи – от начала к концу фазного потребителя.

Применив 1-й закон Кирхгофа для узлов A , B , C , можно легко получить следующие векторные уравнения:

$$\begin{aligned}\bar{I}_A &= \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}; \\ \bar{I}_C &= \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.\end{aligned}\tag{46}$$

Каждый из фазных токов I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} рассчитывается по модулю

$$I_{\Phi} = \frac{U_{\Phi}}{Z_{\Phi}}\tag{47}$$

и по фазе

$$\cos \varphi_{\Phi} = \frac{r_{\Phi}}{Z_{\Phi}}.\tag{48}$$

Например, для фазного потребителя AB

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}};\tag{49}$$

$$Z_{AB} = \sqrt{r_{AB}^2 + X_{AB}^2}; \quad (50)$$

$$\cos \varphi_{AB} = \frac{r_{AB}}{Z_{AB}}. \quad (51)$$

Очевидно, что для симметричной нагрузки фазные токи равны между собой:

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{\phi}. \quad (52)$$

Линейные токи также равны между собой и превышают фазные в $\sqrt{3}$.

$$I_A = I_B = I_C = I_L = \sqrt{3}I_{\phi} \quad (53)$$

Эта зависимость вытекает из построения векторной диаграммы токов и напряжений при симметричной активной нагрузке (рис. 16, в). В этом случае фазные токи совпадают по направлению с фазными напряжениями, линейные токи определяются графически решением системы уравнений (46).

Несимметричная нагрузка связана с неравенством фазных токов и нарушением соотношения (52).

При разрыве цепи потребителя AB ток

$$I_{AB} = 0 \quad (54)$$

Потребители BC и CA остаются подключенными к линейным проводам под неизменным напряжением. Поэтому отключение потребителя AB не повлияет на работу потребителей BC и CA .

Обрыв линейного провода A окажет существенное влияние на режим работы соединения. В этом случае создаются две параллельные цепи, включенные под линейное напряжение – потребитель BC и последовательное соединение потребителей Z_{CA} , Z_{BC} .

Фазный ток

$$I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} \quad (55)$$

не изменится, а ток во второй цепи

$$I_{CA} = I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{CA} + Z_{AB}} \quad (56)$$

будет определяться суммой сопротивлений фазных нагрузок CA и AB . Соответственно этому и распределение фазных напряжений U_{CA} и U_{AB} , будет зависеть от соотношения сопротивлений фазных потребителей CA и AB .

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему соединения «треугольник» на стенде СЭЦ-1 или СЭЦ-1К (рис. 17).

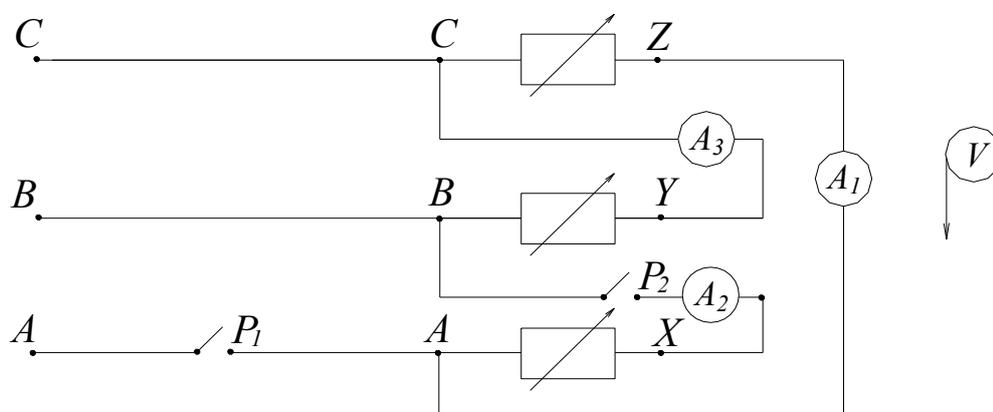


Рис. 17. Схема лабораторной установки

2. Включить рубильники P_1 и P_2 и после проверки правильности соединений в схеме включить питание.

3. Установить симметричный режим работы соединения. Это достигается соответствующим включением резисторов в каждой фазе. При этом амперметры фазных токов должны показывать одинаковые величины. С помощью вольтметра со щупами измерить линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Показания записать в таблицу .

4. Установить несимметричный режим работы за счет изменения нагрузок. Измерить фазные и линейные величины, записать их в таблицу 9.

5. При несимметричном режиме (установленном в п. 4) создать разрыв в фазе AB . Для этого надо отключить P_2 , измерить фазные и линейные величины, записать их в таблицу 9.

6. Включить рубильник P_2 . При несимметричном режиме (установленном в п. 4) выключить рубильник P_1 . Этим будет создан режим обрыва линейного провода A . Произвести измерения, записать их в таблицу 9.

Результаты измерений и вычислений

Таблица 9

Экспериментальные величины						Расчетные величины					
Фазные токи, А			Напряжение, В			Линейные токи, А			Сопротивления фаз, Ом		
I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	R_{AB}	R_{BC}	R_{CA}

Примечания:

Опыт 1. Симметричная нагрузка, P_1 и P_2 включены;

Опыт 2. Несимметричная нагрузка, P_1 и P_2 включены;

Опыт 3. Несимметричная нагрузка, P_1 – включен, P_2 – отключен, обрыв фазы AB ;

Опыт 4. Несимметричная нагрузка, P_1 – отключен, P_2 – включен. Обрыв линейного провода A .

7. Найти отношение среднеарифметических значений линейных и фазных токов и сравнить их с теоретическим значением.

8. Рассчитать величины активной нагрузки в каждой фазе по формуле.

$$R_\phi = \frac{U_\phi}{I_\phi \cdot 10^{-3}} \quad (57)$$

9. Для четырех опытов построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений. Определить по ним значения линейных токов и записать их в таблицу.
10. Сделать выводы по каждому исследованному режиму.

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте схему соединения «треугольник» для следующих потребителей: в фазе AB – активно-индуктивная нагрузка, в фазе BC – активная нагрузка, в фазе CA – активно-емкостная нагрузка. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений.
2. Для трех фазных обмоток электродвигателя нужно произвести соединение «треугольник». Нарисуйте схему с указанием начала и конца фазных обмоток. Постройте векторную диаграмму токов и напряжений для этого случая.
3. Какому режиму соответствует отключение рубильника P_1 (или P_2) при реальном использовании соединения «треугольник».
4. Как изменится активная мощность трехфазного асинхронного электродвигателя при переключении его обмоток со «звезды» на «треугольник» при сохранении величины линейного напряжения.
5. Можно ли допустить длительную эксплуатацию фазных потребителей, соединенных треугольником, при обрыве одного из линейных проводов?
6. Расскажите о ходе выполнения лабораторной работы.

Перечень использованных информационных ресурсов

1. Бондарь И.М. Электротехника и электроника: уч. пособие / И.М. Бондарь.– 2-е изд. – Ростов н/Д: Изд. центр «МарТ»; Феникс, 2010. – 340 с.
2. Бондарь И.М. Электротехника: уч. пособие / И.М. Бондарь. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2010. – 72 с.
3. Иванов И.И. Электротехника и основы электроники: учебник / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я. Фролов. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 736 с.
4. Марченко А.А. Электротехника и электроника: учебник: в 2 т.: Электротехника/А.А. Марченко, Ю.Ф. Опачий. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 574 с. + Доп. материалы. [Электронный ресурс].
5. Поляков А.Е. Электротехника и электроника. Дистанционный курс: уч. пособие/А.Е. Поляков, М.С. Иванов; под редакцией А.Е. Полякова. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 352 с.
6. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: уч. пособие / Ю.Г. Синдеев. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс, 2019. – 407 с.
7. Шандриков А.С. Электротехника с основами электроники: уч. пособие /А.С. Шандриков. – Минск: РИПО, 2016. – 318 с.
8. ЭБС НТБ ДГТУ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ntb.donstu.ru/>.
9. Электронная библиотечная система. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.znanium.com.
10. Библиотека электронных учебников. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://abc.vvsu.ru/books/ebooks_iskt/.
11. Электротехника. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electrotehnika.info.ru/>.
12. Электротехника и электроника. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bondaruniver.jimdo.com/>.