

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Баламирзоев Назим Лиодирович  
Должность: И.о. ректора  
Дата подписания: 19.08.2023 23:10:04  
Уникальный программный ключ:  
2a04bb882d7edb7f479cb266eb4aaaaedebee849

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет КТВТиЭ

Кафедра «Теоретической и общей электротехники»

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**к выполнению лабораторных работ №4, №5, №6**  
**по дисциплине «Электротехника»**  
**для студентов направления подготовки бакалавров 27.03.04 «Управление в**  
**технических системах» (часть 2)**

Махачкала 2020

УДК 621.3

Учебно-методические указания к выполнению лабораторных работ №4, №5, №6 по дисциплине «Электротехника» для студентов направления подготовки бакалавров 27.03.04 «Управление в технических системах» (часть 2). -Махачкала: ДГТУ, 2020. -с.25.

Данные методические указания являются учебным руководством к выполнению лабораторных работ с использованием специализированных лабораторных стендов по дисциплине «Электротехника». Лабораторная работа №4 посвящена исследованию электрической цепи переменного тока с параллельным соединением элементов. Лабораторная работа №5 посвящена изучению трехфазной электрической цепи при соединении потребителей по схеме «звезда». Лабораторная работа №6 посвящена исследованию нелинейной электрической цепи постоянного тока.

Составители: Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор каф. ТиОЭ,

Евдулов Д.В., к.т.н., ст. преподаватель каф. ТиОЭ,

Евдулов О.В., к.т.н., доцент каф. ТиОЭ,

Миспахов И.Ш., к.т.н., ст. преподаватель каф. ТиОЭ.

Рецензенты:

д.т.н., профессор кафедры ТиОЭ ФГБОУ ВО «ДГТУ»

Саркаров Т.Э.

д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории комплексного освоения возобновляемых источников энергии Института проблем геотермии и возобновляемой энергетики- филиала ФГБУН ОИВТ РАТ

Кобзаренко Д.Н.

Печатается согласно постановлению ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет от \_\_\_\_\_ 2020 г.

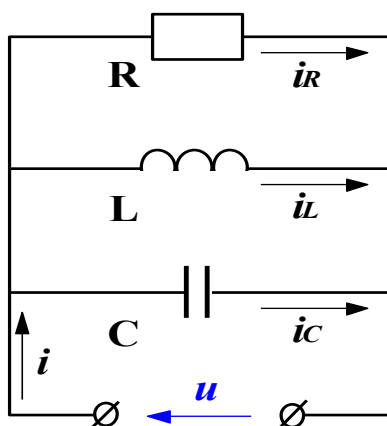
## Лабораторная работа №4 «Электрическая цепь переменного тока с параллельным соединением элементов»

**Цель работы:** ознакомиться с особенностями параллельного соединения активных и реактивных элементов в цепи переменного тока, явлением резонанса токов, повышением коэффициента мощности, применением 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока.

### 1. Краткие теоретические сведения.

#### Треугольник токов. Треугольник проводимостей

Цепь, все ветви которой подключены к одной паре узлов, называется параллельной.



Если напряжение на зажимах линейной цепи меняется по гармоническому закону  $u = U_m \sin \omega t$ , то по гармоническому закону будут меняться и токи в ветвях цепи. Тогда на основании первого закона Кирхгофа **мгновенное значение тока  $i$  в неразветвленной части цепи в любой момент времени будет равно сумме мгновенных значений токов в ветвях цепи, т.е.**

Рис. 1. Параллельное соединение элементов

$$i = i_R + i_L + i_C, \quad (1)$$

$$\text{где } i_R = I_{mR} \sin \omega t, \quad i_L = I_{mL} \sin(\omega t - \pi/2), \quad i_C = I_{mC} \sin(\omega t + \pi/2), \quad (2)$$

где  $I_{mR}, I_{mL}, I_{mC}$  - амплитудные значения токов в активной, индуктивной и емкостной ветвях цепи соответственно. Так как токи в ветвях цепи не совпадают по фазе, действующее значение тока в неразветвленной части цепи может быть получено векторным сложением:

$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_L + \bar{I}_C. \quad (3)$$

На основании уравнений (2), (3) строится векторная диаграмма токов и напряжения. Построение векторной диаграммы начинается с вектора напряжения, на выбор начальной фазы которого не налагается каких-либо ограничений. В выбранном масштабе напряжения направим его горизонтально вправо. В выбранном масштабе тока строим соответствующие векторы тока из уравнения (3). Фазы векторов напряжений берутся в соответствии с уравнениями (2).

Синфазно с вектором напряжения откладывается вектор тока в активной ветви цепи  $\bar{I}_a = \bar{U}g = \bar{I}_R$ . Вектор реактивного индуктивного тока  $\bar{I}_L = \bar{U}b_L$  строится сдвинутым относительно вектора напряжения в направлении движения часовой стрелки на угол  $-\pi/2$ . Вектор реактивного емкостного тока  $\bar{I}_C = \bar{U}b_C$  строится сдвинутым относительно вектора напряжения против направления движения часовой стрелки на угол  $\pi/2$  (где:  $g, b_L, b_C$  -

активная, индуктивная и емкостная проводимости, соответственно. Они легко вычисляются, если известны параметры ветвей  $g = \frac{r}{z^2}$ ,  $b = \frac{x}{z^2}$ , где:  $r$ ,  $x$ ,  $z$  - активное, реактивное и полное сопротивление ветвей, соответственно. Проводимость выражается в  $\text{Ом}^{-1}$  или См (сименс)). Вектор тока  $\bar{I}$ , протекающего в неразветвленной части цепи, находится сложением векторов  $\bar{I}_R$ ,  $\bar{I}_L$ ,  $\bar{I}_C$  по правилам векторной алгебры (рис.2).

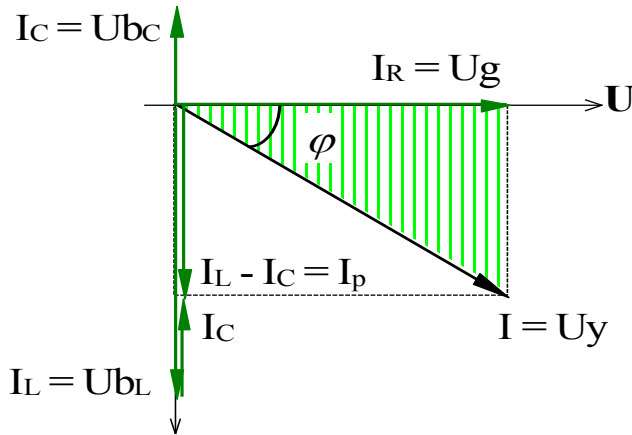


Рис. 2. Векторная диаграмма токов

Действующее значение этого тока можно определить из заштрихованного треугольника, который называется треугольником токов.

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (4) выражение для составляющих токов, получим:

$$I = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} \quad (5)$$

где  $\sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = y$  - полная проводимость цепи.

Тогда  $I = Uy$ . (6)

Выражение (6) является законом Ома для цепи с параллельным соединением элементов.

Из треугольника токов следует, что

$$I_a = I_R = I \cos \varphi, \quad I_p = I_L - I_C = I \sin \varphi. \quad (7)$$

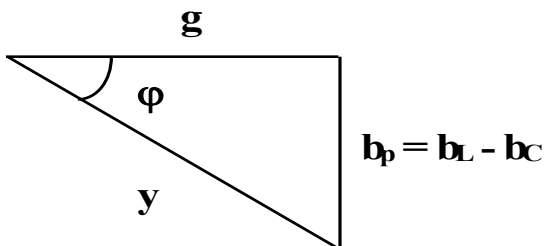


Рис. 3. Треугольник проводимостей

Поделив все стороны треугольника токов на напряжение, получим треугольник проводимостей рис. 3., который позволяет определить угол сдвига фаз между током и напряжением, если известны параметры элементов. Он определяется соотношением реактивных и активных проводимостей цепи:

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g} \quad (8)$$

Из треугольника проводимостей следует, что:

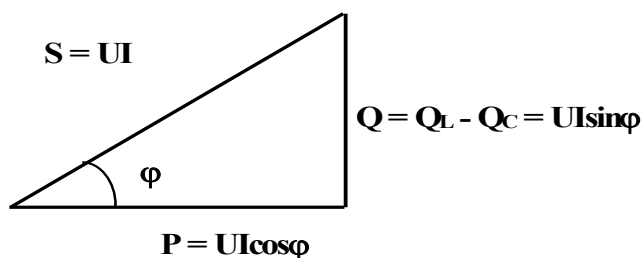
$$g = y \cos \varphi, \quad (9)$$

$$b = y \sin \varphi. \quad (10)$$

## Виды мощностей. Треугольник мощностей

В цепях переменного тока различают три понятия мощности: активная  $P$ , реактивная  $Q$ , полная  $S$ .

Соотношения между мощностями могут быть получены из треугольника мощностей, который получается путем умножения всех сторон треугольника тока на значение напряжения рис. 4.



Где:

$Q_L$  - реактивная индуктивная мощность,  
 $Q_C$  - реактивная емкостная мощность.

Рис.4. Треугольник мощностей

Активная мощность  $P = UI \cos \varphi$

[Вт] - характеризует необратимый процесс преобразования электромагнитной энергии источника в другие виды энергии: механическую, тепловую, световую и т.д.

Реактивная мощность  $Q = UI \sin \varphi$  [Вар] (вольт-ампер реактивный) - характеризует обратимый процесс преобразования электромагнитной энергии источника в энергию магнитного поля катушки и энергию электрического поля конденсатора.

Полная мощность  $S = UI$  [ВА] (вольт-ампер) - характеризует наибольшее значение активной мощности при заданных действующих значениях тока и напряжения.

Как видно из выражения активной мощности, если мощность, потребляемая приемником в данной цепи, является вполне определенной величиной, то при неизменном напряжении на зажимах цепи и с уменьшением  $\cos \varphi$  ток нагрузки источника будет увеличиваться при одной и той же отдаваемой мощности.

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}. \quad (11)$$

Поэтому даже при полной загрузке током источника, но при низком  $\cos \varphi$  источник по мощности будет недогружен. Значение  $\cos \varphi$  характеризует использование полной или установленной мощности источника и называется коэффициентом мощности.

Наибольшего значения активная мощность достигает при  $\cos \varphi = 1$ , т.е. когда  $\varphi = 0$ , или, как следует из выражения (8), когда  $b_L = b_C$ . Такой режим работы называется резонансом токов.

### 2. Порядок выполнения работы.

1. Изучить главу «Описание оборудования».
2. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
3. Убедиться, что все выключатели модулей находятся в положении «ВЫКЛ».

4. По указанию преподавателя, выбрать модули для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки .
5. Подключить защитное заземление '©'.
6. Подключить модули к сети ~220В 50Гц.
7. Соединить модули согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
8. Провести эксперимент.
9. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
10. Составить отчет по лабораторной работе.

### **3. Порядок проведения эксперимента.**

В работе используются: модули: «Источник питания», «Измерительные приборы», «Нелинейные и реактивные элементы», «Измеритель мощности», «Сопротивления добавочные», «Миллиамперметры»;

3.1. Пользуясь схемой соединений (рис.3.1), начертить принципиальную схему исследуемой цепи с включенными измерительными приборами.

3.2. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резистора R1, катушки Lки конденсатора С (рис.3.1), установив в соответствии с заданным вариантом значения сопротивления резистора R1 и емкости конденсатора С (табл.3.1). Включение отдельных ветвей осуществлять с помощью соответствующих проводников. Предъявить схему для проверки преподавателю.

Таблица 3. 1.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
R, Ом								
С, мкФ	80	180	100	80	120	120	150	180

3.3. Включив электропитание модулей стенда (перевести в положение «Вкл.» выключатель питания) исследовать цепь. Для этого, по показаниям ваттметра и измерительных приборов, измерить напряжение на входе цепи, активную мощность цепи, токи в ветвях и ток, потребляемый от источника питания. Результаты измерений занести в табл.3.2.

3.4. Исследовать влияние емкости С, включенной параллельно индуктивной катушке Lк, на величину потребляемого от источника питания тока. Для этого подключить параллельно катушке Lк конденсатор С. Установить такое значение емкости С, при котором от источника потребляется минимальный ток (состояние цепи, близкое к резонансу токов). Измерить при этом токи в ветвях и ток, потребляемый из сети. Результаты занести в табл.3.2. Уменьшая и увеличивая значение емкости конденсатора С относительно резонансного значения добиться существенного изменения величины общего тока. При этом измерить токи на всех участках цепи, напряжение и активную мощность цепи. Результаты занести в табл. 3.2.

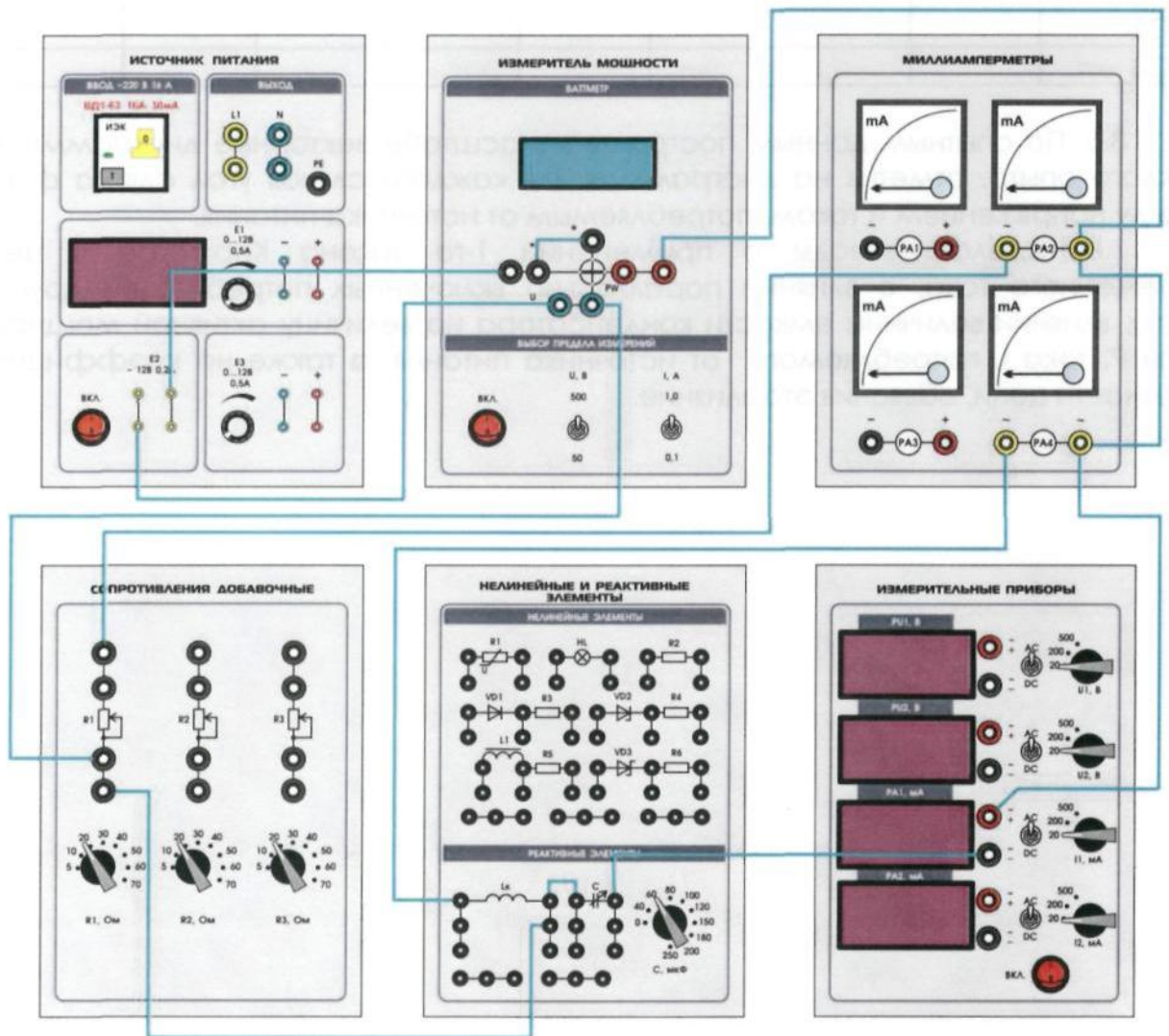


Рис. 3.1. Исследование электрической цепи переменного тока с параллельным соединением элементов.

Таблица 3.2

Включены	Измерено						Вычислено	
	U, В	I, А	IR, А	IC, А	IK, А	P, Вт		Cosφ
R								
C								
LK								
R,C								
R, LK								
R, LK, C,								
LK, CI								
LK, C2								
LK, C3								

3.5. По опытным данным построить в масштабе векторные диаграммы для каждого опыта отметив на диаграммах для каждого случая угол сдвига фаз  $\phi$  между напряжением и током потребляемым от источника питания .

3.6. Сделайте выводы о применении 1-го закона Кирхгофа в цепях переменного тока о влиянии параллельно включенных потребителей друг на друга влиянии величины емкости конденсатора на величину активной мощности цепи  $P$ , тока потребляемого от источника питания, а также на коэффициент мощности цепи объяснив это влияние.

### Контрольные вопросы

1. Какой ток называется переменным?
2. Дайте определение мгновенного, амплитудного и действующего значений переменного тока. Какая связь между ними?
3. В параллельной R-L-C цепи напряжение на зажимах цепи меняется по закону  $u = U_m \sin \omega t$ . Запишите законы изменения тока во всех ветвях цепи. Запишите закон изменения тока в неразветвленной части цепи:
  - если проводимость емкостной ветви больше проводимости индуктивной;
  - если проводимость емкостной ветви меньше индуктивной;
  - если емкостная и индуктивная проводимости равны.
4. В параллельной R-L-C цепи с идеальными элементами индуктивная проводимость больше емкостной. Как изменится ток в цепи, если частота питающего напряжения увеличится?
5. Запишите закон Ома для параллельной R-L-C цепи в действующих значениях напряжений и токов.
6. Запишите условие резонанса токов.
7. Почему в момент резонанса токов ток в неразветвленной части цепи минимален, а в момент резонанса напряжений максимален?
8. Напишите выражение активной мощности, рассеиваемой в параллельной цепи.
9. Начертите треугольник проводимостей и, руководствуясь им, напишите формулы, выражающие:
  - полную проводимость цепи,
  - активную проводимость цепи,
  - реактивную проводимость цепи,
  - угол сдвига фаз между током и напряжением.
10. Почему при подключении конденсатора параллельно индуктивному приемнику, реактивная проводимость которого больше проводимости конденсатора, коэффициент мощности приемника возрастает? При каком значении емкостной проводимости это положение нарушается?



## Лабораторная работа №5 «Трехфазная электрическая цепь при соединении потребителей по схеме «звезда»

**Цель работы:** ознакомиться с трехфазными системами, измерением фазных и линейных токов и напряжений. Проверить основные соотношения между токами и напряжениями симметричного и несимметричного трехфазного потребителя. Выяснить роль нейтрального провода в четырехпроводной трехфазной системе. Научиться строить векторные диаграммы напряжений и токов.

### 1.Краткие теоретические сведения.

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных электрических систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенный угол. Отметим, что обычно эти ЭДС, в первую очередь в силовой энергетике, синусоидальны. Однако, в современных электромеханических системах, где для управления исполнительными двигателями используются преобразователи частоты, система напряжений в общем случае является несинусоидальной. Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, называют **фазой**, т.е. фаза – это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке.

Таким образом, понятие «фаза» имеет в электротехнике два различных значения:

- фаза как аргумент синусоидально изменяющейся величины;
- фаза как составная часть многофазной электрической системы.

Разработка многофазных систем была обусловлена исторически. Исследования в данной области были вызваны требованиями развивающегося производства, а успехам в развитии многофазных систем способствовали открытия в физике электрических и магнитных явлений.

Важнейшей предпосылкой разработки многофазных электрических систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля (Г.Феррарис и Н.Тесла, 1888 г.). Первые электрические двигатели были двухфазными, но они имели невысокие рабочие характеристики. Наиболее рациональной и перспективной оказалась трехфазная система, основные преимущества которой будут рассмотрены далее. Большой вклад в разработку трехфазных систем внес выдающийся русский ученый-электротехник М.О.Доливо-Добровольский, создавший трехфазные асинхронные двигатели, трансформаторы, предложивший трех- и четырехпроводные цепи, в связи с чем по праву считающийся основоположником трехфазных систем.

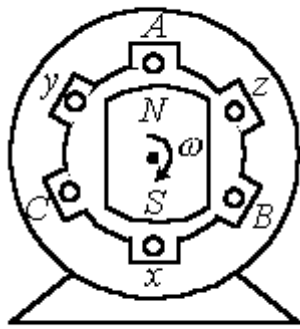


Рис.1

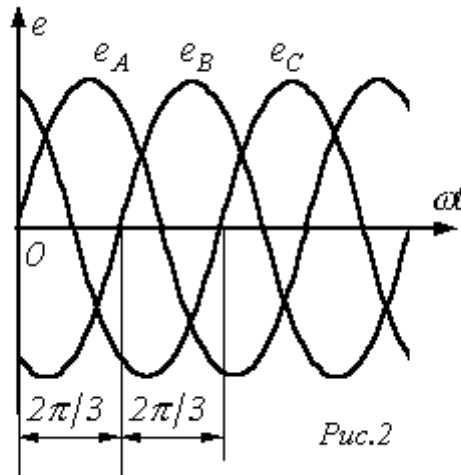


Рис.2

Источником трехфазного напряжения является трехфазный генератор, на статоре которого (см. рис. 1) размещена трехфазная обмотка. Фазы этой обмотки располагаются таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве друг относительно друга на  $2\pi/3$  эл. рад. На рис. 1 каждая фаза статора условно показана в виде одного витка. Начала обмоток принято обозначать заглавными буквами А,В,С, а концы- соответственно прописными x,y,z. ЭДС в неподвижных обмотках статора индуцируются в результате пересечения их витков магнитным полем, создаваемым током обмотки возбуждения вращающегося ротора (на рис. 1 ротор условно изображен в виде постоянного магнита, что используется на практике при относительно небольших мощностях). При вращении ротора с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но отличающиеся вследствие пространственного сдвига друг от друга по фазе на  $2\pi/3$  рад. (см. рис. 2).

Трехфазные системы в настоящее время получили наибольшее распространение. На трехфазном токе работают все крупные электростанции и потребители, что связано с рядом преимуществ трехфазных цепей перед однофазными, важнейшими из которых являются:

- экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- самым надежным и экономичным, удовлетворяющим требованиям промышленного электропривода является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- возможность получения с помощью неподвижных обмоток вращающегося магнитного поля, на чем основана работа синхронного и асинхронного двигателей, а также ряда других электротехнических устройств;
- уравновешенность симметричных трехфазных систем.

Для рассмотрения важнейшего **свойства уравновешенности** трехфазной системы, которое будет доказано далее, введем понятие симметрии многофазной системы.

Система ЭДС (напряжений, токов и т.д.) называется **симметричной**, если она состоит из  $m$  одинаковых по модулю векторов ЭДС (напряжений, токов и т.д.), сдвинутых по фазе друг

относительно друга на одинаковый угол  $\alpha = 2\pi/m$ . В частности векторная диаграмма для симметричной системы ЭДС, соответствующей трехфазной системе синусоид на рис. 2, представлена на рис.3.

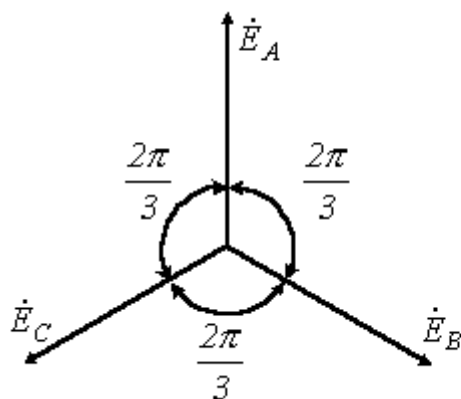


Рис.3

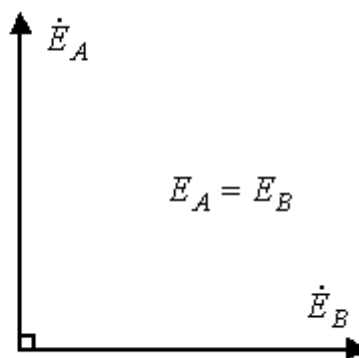


Рис.4

Из несимметричных систем наибольший практический интерес представляет двухфазная система с 90-градусным сдвигом фаз (см. рис. 4).

Все симметричные трех- и  $m$ -фазные ( $m > 3$ ) системы, а также двухфазная система являются **уравновешенными**. Это означает, что хотя в отдельных фазах мгновенная мощность пульсирует (см. рис. 5,а), изменяя за время одного периода не только величину, но в общем случае и знак, суммарная мгновенная мощность всех фаз остается величиной постоянной в течение всего периода синусоидальной ЭДС (см. рис. 5,б).

Уравновешенность имеет важнейшее практическое значение. Если бы суммарная мгновенная мощность пульсировала, то на валу между турбиной и генератором действовал бы пульсирующий момент. Такая переменная механическая нагрузка вредно отражалась бы на энергогенерирующей установке, сокращая срок ее службы. Эти же соображения относятся и к многофазным электродвигателям.

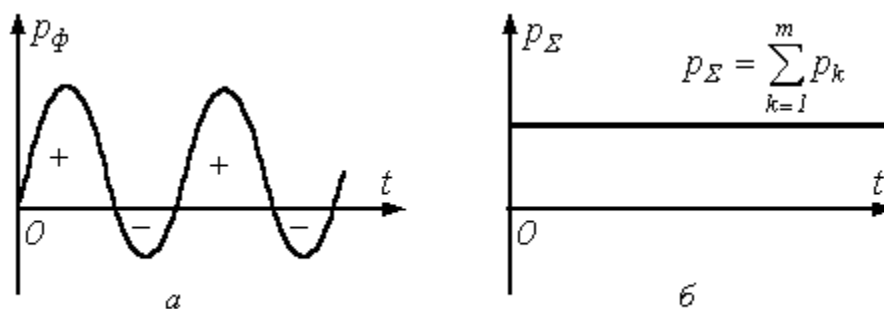


Рис.5

Если симметрия нарушается (двухфазная система Tesla в силу своей специфики в расчет не принимается), то нарушается и уравновешенность. Поэтому в энергетике строго следят за тем, чтобы нагрузка генератора оставалась симметричной.

### Схемы соединения трехфазных систем

Трехфазный генератор (трансформатор) имеет три выходные обмотки, одинаковые по числу витков, но развивающие ЭДС, сдвинутые по фазе на 120°. Можно было бы использовать систему, в которой фазы обмотки генератора не были бы гальванически соединены друг с другом. Это так называемая **несвязная система**. В этом случае каждую фазу генератора необходимо соединять с приемником двумя проводами, т.е. будет иметь место шестипроводная линия, что неэкономично. В этой связи подобные системы не получили широкого применения на практике.

Для уменьшения количества проводов в линии фазы генератора гальванически связывают между собой. Различают два вида соединений: **в звезду** и **в треугольник**. В свою очередь при соединении в звезду система может быть **трех-** и **четырёхпроводной**.

### Соединение в звезду

На рис. 6 приведена трехфазная система при соединении фаз генератора и нагрузки в звезду. Здесь провода AA', BB' и CC' – линейные провода.

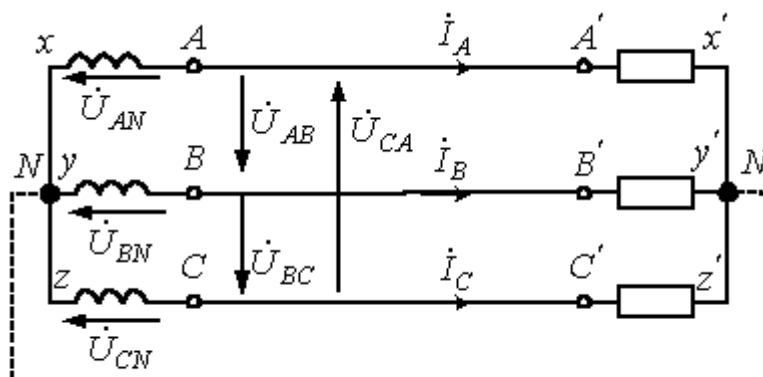


Рис.6

**Линейным** называется провод, соединяющий начала фаз обмотки генератора и приемника. Точка, в которой концы фаз соединяются в общий узел, называется **нейтральной** (на рис. 6 N и N' – соответственно нейтральные точки генератора и нагрузки).

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называется **нейтральным** (на рис. 6 показан пунктиром). Трехфазная система при соединении в звезду без нейтрального провода называется **трехпроводной**, с нейтральным проводом – **четырёхпроводной**.

Все величины, относящиеся к фазам, носят название **фазных переменных**, к линии – **линейных**. Как видно из схемы на рис. 6, при соединении в звезду линейные токи  $\dot{I}_A, \dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  равны соответствующим фазным токам. При наличии нейтрального провода ток в нейтральном проводе  $\dot{I}_{N'N} = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ . Если система фазных токов симметрична, то  $\dot{I}_{N'N} = 0$ . Следовательно, если бы симметрия токов была гарантирована, то нейтральный провод был бы не нужен. Как будет показано далее, нейтральный провод обеспечивает поддержание симметрии напряжений на нагрузке при несимметрии самой нагрузки.

Поскольку напряжение на источнике противоположно направлению его ЭДС, фазные напряжения генератора (см. рис. 6) действуют от точек A, B и C к нейтральной точке N;  $U_{A'N'}, U_{B'N'}, U_{C'N'}$  – фазные напряжения нагрузки.

Линейные напряжения действуют между линейными проводами. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для линейных напряжений можно записать

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN}; \quad (2)$$

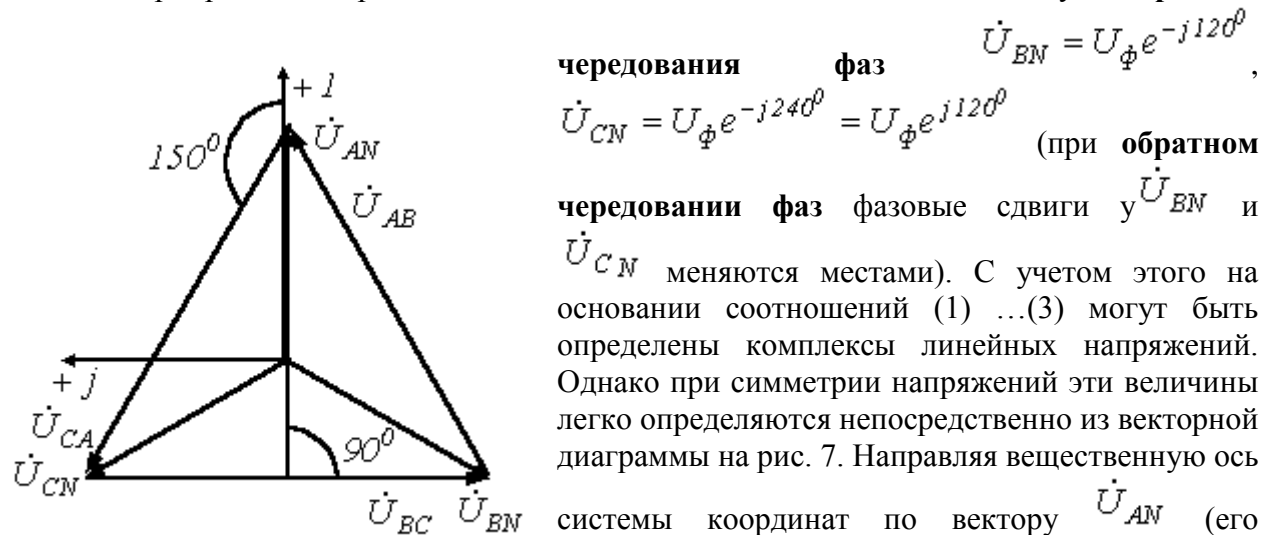
$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN} \quad (3)$$

Отметим, что всегда  $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$  - как сумма напряжений по замкнутому контуру.

На рис. 7 представлена векторная диаграмма для симметричной системы напряжений. Как показывает ее анализ (лучи фазных напряжений образуют стороны равнобедренных треугольников с углами при основании, равными  $30^\circ$ ), в этом случае

$$U_\pi = \sqrt{3}U_\phi \quad (4)$$

Обычно при расчетах принимается  $\dot{U}_{AN} = U_\phi e^{j0} = U_\phi$ . Тогда для случая **прямого**



**чередования фаз**

$$\dot{U}_{BN} = U_\phi e^{-j120^\circ}$$

$$\dot{U}_{CN} = U_\phi e^{-j240^\circ} = U_\phi e^{j120^\circ} \quad (\text{при обратном чередовании фаз фазовые сдвиги у } \dot{U}_{BN} \text{ и } \dot{U}_{CN} \text{ меняются местами}).$$

С учетом этого на основании соотношений (1) ... (3) могут быть определены комплексы линейных напряжений. Однако при симметрии напряжений эти величины легко определяются непосредственно из векторной диаграммы на рис. 7. Направляя вещественную ось системы координат по вектору  $\dot{U}_{AN}$  (его начальная фаза равна нулю), отсчитываем фазовые сдвиги линейных напряжений по отношению к этой оси, а их модули определяем в соответствии с (4). Так для линейных напряжений

$\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{U}_{CA}$  получаем:  $\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}U_\phi e^{-j90^\circ}$ ;  $\dot{U}_{CA} = \sqrt{3}U_\phi e^{j150^\circ}$ .

## 2. Порядок выполнения работы.

1. Изучить главу «Описание оборудования».
2. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
3. Убедиться, что все выключатели модулей находятся в положении «ВЫКЛ»
4. По указанию преподавателя, выбрать модули для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки.
5. Подключить защитное заземление©.
6. Подключить модули к сети ~220В 50Гц.
7. Соединить модули согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
8. Провести эксперимент.
9. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
10. Составить отчет по лабораторной работе.

### 3. Порядок проведения эксперимента.

В работе используются: модули: «Функциональный генератор», «Измерительные приборы», «Сопrotивления добавочные», Миллиамперметры», «Мультиметры».

3.1. Пользуясь схемой соединений (рис.3.1), начертить принципиальную схему исследуемой цепи с включенными измерительными приборами.

3.2. Включить электропитание модулей стенда (перевести в положение «ВКЛ» выключатель питания). С помощью модуля «Мультиметры» измерить линейные и фазные напряжения трехфазного источника питания (трехфазный генератор модуля «Функциональный генератор») в режиме холостого хода (без подключения потребителей). Результаты измерений занести в табл.3.1. Выключить модуль трехфазного генератора. Построить векторную диаграмму фазных и линейных напряжений трехфазного источника питания.

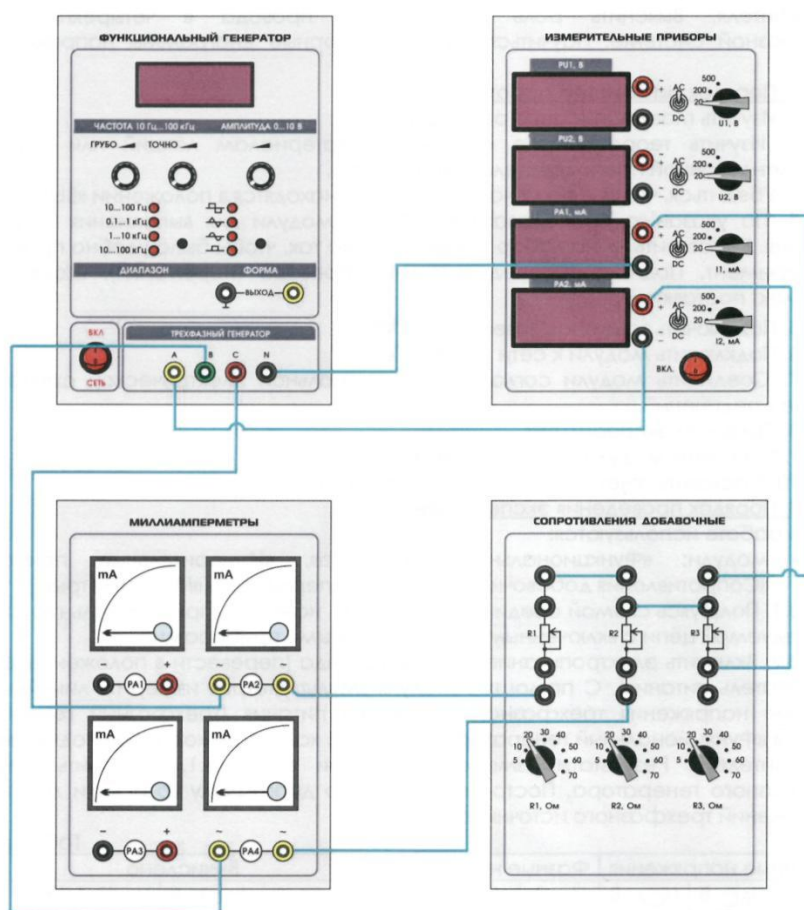


Рис.3.1. Исследование трехфазной электрической цепи при соединении потребителей по схеме «звезда»

Таблица 3.1

Линейные напряжения			Фазные напряжения			Вычислено		
$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_{лср}, В$	$U_{фср}, В$	$U_{лср}/U_{фср}$

3.3. Собрать электрическую цепь (рис.3.1), установить в соответствии с заданным вариантом (табл.3.2) симметричную нагрузку (все сопротивления и мощности фазных потребителей одинаковы) и предъявить цепь для проверки преподавателю.

Таблица 3.2

Вариант			2	3	4	5	6	7	8
R1, Ом									
R2, Ом									
R3,									

3.4. Включить электропитание модулей стенда (перевести в положение «ВКЛ» выключатель питания). С помощью измерительных приборов (РА2, РА4 модуля «Миллиамперметры», РА1 и РА2 модуля «Измерительные приборы», модуль «Мультиметры») измерить все токи, фазные напряжения на потребителях и величину межзвучного напряжения  $U_{nN}^{ПРИ}$  включенном и отключенном нейтральном проводе N. Результаты измерений занести в табл.3.3. Выключить электропитание модулей и предъявить результаты измерений преподавателю.

Таблица 3.3

Режим нагрузки	Токи нагрузки, А			Ток в нейтральном проводе, А	Фазные напряжения на потребителях, В			Межзвучное напряжение, В
	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$	$U_{aП}$	$U_{bП}$	$U_{cП}$	$U_{nN}$
Нейтральный провод включен, нагрузка симметричная								
Обрыв линейного провода «А» в четырехпроводной симметричной цепи								

Нейтральный провод выключен, нагрузка симметричная								
Обрыв линейного провода «А» в трехпроводной симметричной цепи								
Нейтральный провод включен, нагрузка несимметричная								
Нейтральный провод выключен, нагрузка несимметричная								

3.5. Изменить нагрузку в фазах потребителя в соответствии с заданным вариантом (несимметричная нагрузка). Включить электропитание модулей и измерить токи, напряжения в каждой фазе потребителя и величину межзвонного напряжения  $U_{\text{лн}}$  при включенном и отключенном нейтральном проводе N. Результаты записать в табл.3.3.

3.6. Для всех проведенных опытов построить в масштабе векторные диаграммы.

3.7. Сравнить влияние нейтрального провода на работу трехфазной системы при симметричной и несимметричной нагрузке.

### Контрольные вопросы

1. Какой принцип действия у трехфазного генератора?
2. В чем заключаются основные преимущества трехфазных систем?
3. Какие системы обладают свойством уравновешенности, в чем оно выражается?
4. Какие существуют схемы соединения в трехфазных цепях?
5. Какие соотношения между фазными и линейными величинами имеют место при соединении в звезду и в треугольник?
6. Что будет, если поменять местами начало и конец одной из фаз генератора при соединении в треугольник, и почему?
7. Определите комплексы линейных напряжений, если при соединении фаз генератора в звезду начало и конец обмотки фазы С поменяли местами.



## Лабораторная работа №6 «Нелинейная цепь постоянного тока»

**Цель работы:** экспериментальное получение вольтамперных характеристик нелинейных резистивных элементов, графический расчет нелинейной электрической цепи постоянного тока и экспериментальная проверка результатов расчета.

### 1.Краткие теоретические сведения.

Нелинейными называются цепи, в состав которых входит хотя бы один нелинейный элемент.

Нелинейными называются элементы, параметры которых зависят от величины и (или) направления связанных с этими элементами переменных (напряжения, тока, магнитного потока, заряда, температуры, светового потока и др.). Нелинейные элементы описываются нелинейными характеристиками, которые не имеют строгого аналитического выражения, определяются экспериментально и задаются таблично или графиками.

Нелинейные элементы можно разделить на **двух – и многополюсные**. Последние содержат три (различные полупроводниковые и электронные триоды) и более (магнитные усилители, многообмоточные трансформаторы, тетроды, пентоды и др.) полюсов, с помощью которых они подсоединяются к электрической цепи. Характерной особенностью многополюсных элементов является то, что в общем случае их свойства определяются семейством характеристик, представляющих зависимости выходных характеристик от входных переменных и наоборот: входные характеристики строят для ряда фиксированных значений одного из выходных параметров, выходные – для ряда фиксированных значений одного из входных.

По другому признаку классификации нелинейные элементы можно разделить на **инерционные** и **безынерционные**. Инерционными называются элементы, характеристики которых зависят от скорости изменения переменных. Для таких элементов **статические характеристики**, определяющие зависимость между действующими значениями переменных, отличаются от **динамических характеристик**, устанавливающих взаимосвязь между мгновенными значениями переменных. Безынерционными называются элементы, характеристики которых не зависят от скорости изменения переменных. Для таких элементов статические и динамические характеристики совпадают.

Понятия инерционных и безынерционных элементов относительны: элемент может рассматриваться как безынерционный в допустимом (ограниченном сверху) диапазоне частот, при выходе за пределы которого он переходит в разряд инерционных.

В зависимости от вида характеристик различают нелинейные элементы с **симметричными** и **несимметричными** характеристиками. Симметричной называется характеристика, не зависящая от направления определяющих ее величин, т.е. имеющая симметрию относительно начала системы координат:  $f(x) = -f(-x)$ . Для несимметричной характеристики это условие не выполняется, т.е.  $f(x) \neq -f(-x)$ . Наличие у нелинейного элемента симметричной характеристики позволяет в целом ряде случаев упростить анализ схемы, осуществляя его в пределах одного квадранта.

По типу характеристики можно также разделить все нелинейные элементы на элементы с **однозначной** и **неоднозначной** характеристиками. Однозначной называется характеристика  $y = f(x)$ , у которой каждому значению  $x$  соответствует единственное значение  $y$  и наоборот. В случае неоднозначной характеристики каким-то значениям  $x$  может соответствовать два или более значения  $y$  или наоборот. У нелинейных резисторов неоднозначность характеристики обычно связана с наличием падающего участка,

для которого  $du/di < 0$ , а у нелинейных индуктивных и емкостных элементов – с гистерезисом.

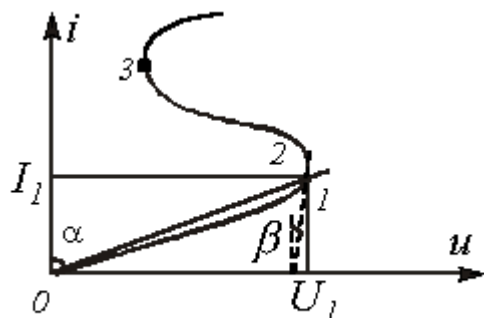


Рис. 1

Наконец, все нелинейные элементы можно разделить на **управляемые** и **неуправляемые**. В отличие от неуправляемых управляемые нелинейные элементы (обычно трех- и многополюсники) содержат управляющие каналы, изменяя напряжение, ток, световой поток и др. в которых, изменяют их основные характеристики: вольт-амперную, вебер-амперную или кулон-вольтную.

### Нелинейные электрические цепи постоянного тока

Нелинейные свойства таких цепей определяет наличие в них нелинейных резисторов.

В связи с отсутствием у нелинейных резисторов прямой пропорциональности между напряжением и током их нельзя охарактеризовать одним параметром (одним значением  $R$ ). Соотношение между этими величинами в общем случае зависит не только от их мгновенных значений, но и от производных и интегралов по времени.

#### Параметры нелинейных резисторов

В зависимости от условий работы нелинейного резистора и характера задачи различают статическое, дифференциальное и динамическое сопротивления.

Если нелинейный элемент является безынерционным, то он характеризуется первыми двумя из перечисленных параметров.

**Статическое сопротивление** равно отношению напряжения на резистивном элементе к протекающему через него току. В частности для точки 1 ВАХ на рис. 1

$$R_{cm} = \frac{U_1}{I_1} = m_R \operatorname{tg} \alpha$$

Под **дифференциальным сопротивлением** понимается отношение бесконечно малого приращения напряжения к соответствующему приращению тока

$$R_{\partial} = \frac{du}{di} = m_R \operatorname{tg} \beta$$

Следует отметить, что у неуправляемого нелинейного резистора  $R_{cm} > 0$  всегда, а  $R_{\partial}$  может принимать и отрицательные значения (участок 2-3 ВАХ на рис. 1).

В случае инерционного нелинейного резистора вводится понятие динамического сопротивления

$$R_{дин} = \frac{du}{di},$$

определяемого по динамической ВАХ. В зависимости от скорости изменения переменной, например тока, может меняться не только величина, но и знак  $R_{дин}$ .

## Методы расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока

Электрическое состояние нелинейных цепей описывается на основании законов Кирхгофа, которые имеют общий характер. При этом следует помнить, что для нелинейных цепей принцип наложения неприменим. В этой связи методы расчета, разработанные для линейных схем на основе законов Кирхгофа и принципа наложения, в общем случае не распространяются на нелинейные цепи.

Общих методов расчета нелинейных цепей не существует. Известные приемы и способы имеют различные возможности и области применения. В общем случае при анализе нелинейной цепи описывающая ее система нелинейных уравнений может быть решена следующими методами:

- графическими;
- аналитическими;
- графо-аналитическими;
- итерационными.

Наиболее часто на практике среди перечисленных применяются графические методы расчета электрических цепей с нелинейными элементами.

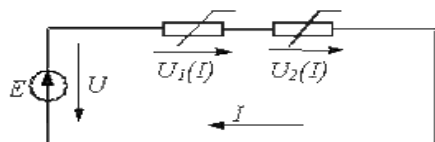
### Графические методы расчета

При использовании этих методов задача решается путем графических построений на плоскости. При этом характеристики всех ветвей цепи следует записать в функции одного общего аргумента. Благодаря этому система уравнений сводится к одному нелинейному уравнению с одним неизвестным. Формально при расчете различают цепи с последовательным, параллельным и смешанным соединениями.

#### а) Цепи с последовательным соединением резистивных элементов.

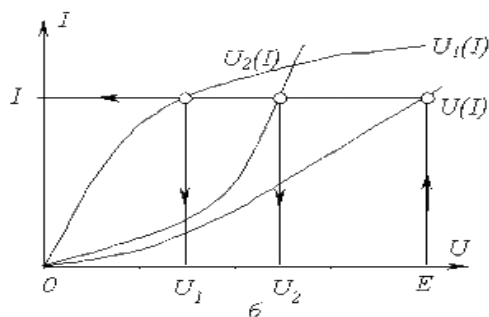
При последовательном соединении нелинейных резисторов в качестве общего аргумента принимается ток, протекающий через последовательно соединенные элементы. Расчет проводится в следующей последовательности. По заданным ВАХ  $U_i(I)$  отдельных резисторов в системе декартовых координат  $U - I$  строится результирующая зависимость  $U(I) = \sum U_i(I)$ . Затем на оси напряжений откладывается точка, соответствующая в выбранном масштабе заданной величине напряжения на входе цепи, из которой восстанавливается перпендикуляр до пересечения с зависимостью  $U(I)$ . Из точки пересечения перпендикуляра с кривой  $U(I)$  опускается ортогональ на ось токов – полученная точка соответствует искомому току в цепи, по найденному значению которого с использованием зависимостей  $U_i(I)$  определяются напряжения  $U_i$  на отдельных резистивных элементах.

Применение указанной методики иллюстрируют графические построения на рис. 2,б, соответствующие цепи на рис. 2,а.



а

Рис.2



б

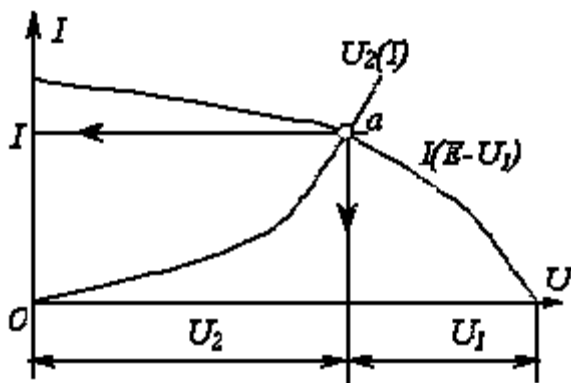


Рис.3

Графическое решение для последовательной нелинейной цепи с двумя резистивными элементами может быть проведено и другим методом – **методом пересечений**. В этом случае один из нелинейных резисторов, например, с ВАХ  $U_1(I)$  на рис.2,а, считается внутренним сопротивлением источника с ЭДС  $E$ , а другой – нагрузкой. Тогда на основании соотношения  $E - U_1(I) = U_2(I)$  точка а (см. рис. 3) пересечения кривых

$I(E - U_1)$  и  $U_2(I)$  определяет режим работы цепи. Кривая  $I(E - U_1)$  строится путем вычитания абсцисс ВАХ  $U_1(I)$  из ЭДС  $E$  для различных значений тока.

Использование данного метода наиболее рационально при последовательном соединении линейного и нелинейного резисторов. В этом случае линейный резистор принимается за внутреннее сопротивление источника, и линейная ВАХ последнего строится по двум точкам.

### б) Цепи с параллельным соединением резистивных элементов.

При параллельном соединении нелинейных резисторов в качестве общего аргумента принимается напряжение, приложенное к параллельно соединенным элементам. Расчет проводится в следующей последовательности. По заданным ВАХ  $I_i(U)$  отдельных резисторов в системе декартовых координат  $U - I$  строится результирующая зависимость  $I(U) = \sum I_i(U)$ . Затем на оси токов откладывается точка, соответствующая в выбранном масштабе заданной величине тока источника на входе цепи (при наличии на входе цепи источника напряжения задача решается сразу путем восстановления перпендикуляра из точки, соответствующей заданному напряжению источника, до пересечения с ВАХ  $I_i(U)$ ), из которой восстанавливается перпендикуляр до пересечения с зависимостью  $I(U)$ . Из точки пересечения перпендикуляра с кривой  $I(U)$  опускается ортогональ на ось напряжений – полученная точка соответствует напряжению на нелинейных резисторах, по найденному значению которого с использованием зависимостей  $I_i(U)$  определяются токи  $I_i$  в ветвях с отдельными резистивными элементами.

Использование данной методики иллюстрируют графические построения на рис. 4,б, соответствующие цепи на рис. 4,а.

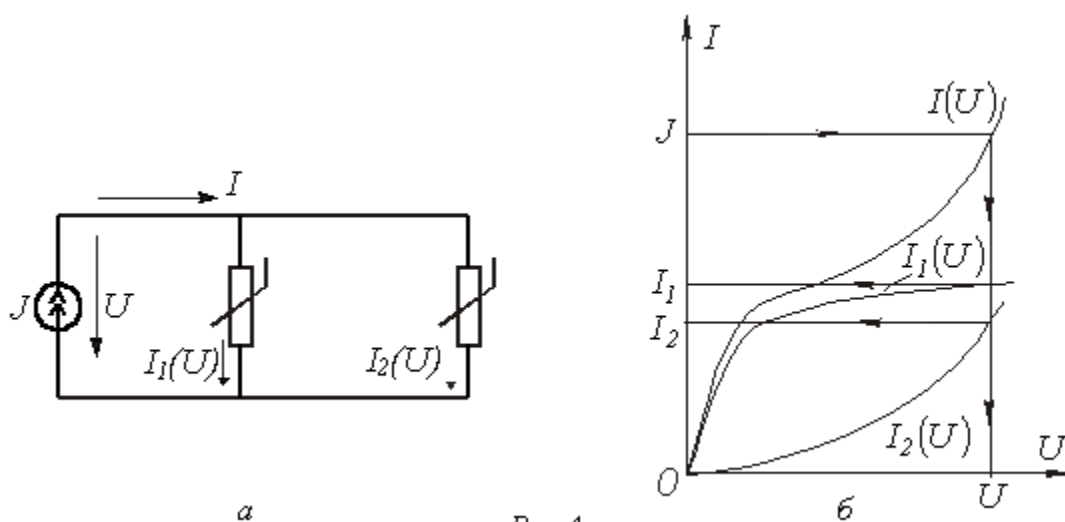


Рис.4

### в) Цепи с последовательно-параллельным (смешанным) соединением резистивных элементов.

1. Расчет таких цепей производится в следующей последовательности: Исходная схема сводится к цепи с последовательным соединением резисторов, для чего строится результирующая ВАХ параллельно соединенных элементов, как это показано в пункте б).

2. Проводится расчет полученной схемы с последовательным соединением резистивных элементов (см. пункт а), на основании которого затем определяются токи в исходных параллельных ветвях.

### 2.Порядок выполнения работы.

1. Изучить главу «Описание оборудования».
2. Изучить теоретические основы по материалам лекций или перечню рекомендованной преподавателем литературы.
3. Убедиться, что все выключатели модулей находятся в положении «ВЫКЛ»
4. По указанию преподавателя, выбрать модули для выполнения текущего задания. Расставить их на лабораторной стойке так, чтобы было удобно проводить эксперимент. Подготовить соединительные провода (перемычки), входящие в комплект поставки.
5. Подключить защитное заземление ©.
6. Подключить модули к сети ~220В 50Гц.
7. Соединить модули согласно принципиальной электрической схеме или схеме соединений.
8. Провести эксперимент.
9. Отключить модули от сети ~220В 50Гц.
10. Составить отчет по лабораторной работе.

### 3. Порядок проведения эксперимента.

В работе используются следующие модули: «Источник питания», «Нелинейные и реактивные элементы», «Измеритель мощности», «Мультиметры».

3.1. Пользуясь схемами соединений (рис.3.1, рис.3.2, рис.3.3), начертить принципиальные схемы исследуемых цепей с включенными измерительными приборами.

3.2. Собрать электрическую цепь для снятия вольтамперных характеристик элементов цепи (рис.3.1). В качестве регулируемого источника постоянного напряжения использовать источник E1 (0...12В, 0,5А). Предъявить схему для проверки преподавателю.

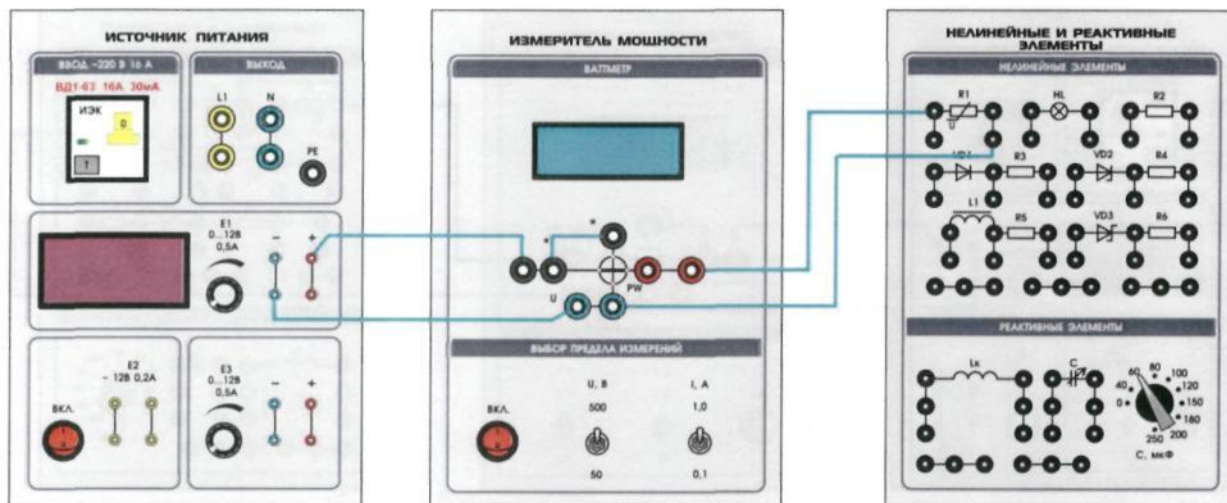


Рис.3.1. Исследование нелинейной цепи постоянного тока.

3.3. Снять вольтамперную характеристику нелинейного элемента R1. Включить электропитание модулей стенда (перевести в положение «Вкл.» выключатель питания). Плавно увеличивая напряжение  $U$  источника E1 в диапазоне 0...12В, провести необходимые измерения тока в цепи I. Данные тока и напряжения считывать с измерителя мощности (ваттметра). Результаты измерений занести в табл.3.1. Выключить электропитание стенда модулей стенда.

Таблица 3.1

U, В	0								
I, А	0								

3.4. Собрать цепь с последовательным соединением лампы накаливания HL и резистора R2. Снять вольтамперную характеристику лампы накаливания HL и резистора R2: плавно увеличивая напряжение  $U$  источника E1 в диапазоне 0...12В провести необходимые измерения тока в цепи I и напряжений  $U_L, U_R$  (для измерения напряжения на отдельных элементах использовать мультиметр, для тока цепи - ваттметр). Результаты измерений занести в табл.3.2.

Таблица 3.2

I, A	0								
U <sub>л</sub> , В	0								
U <sub>R</sub> , В	0								

3.5. Собрать разветвленную нелинейную электрическую цепь (рис.3.2) и предъявить её для проверки преподавателю.

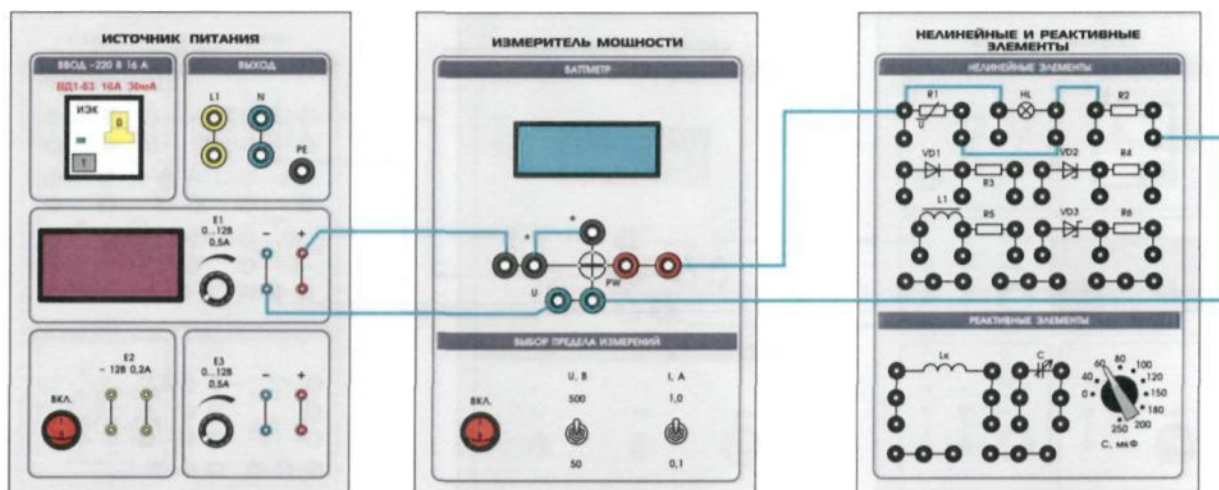


Рис. 3.2. Исследование нелинейной электрической цепи постоянного тока.

3.6. Включить электропитание модулей стенда и снять вольтамперную характеристику всей цепи  $U_{ЭКСП}=f(I)$ . Эксперимент выполнять аналогично п.3.3.

Результаты измерений занести в табл.3.3. Выключить электропитание.

Таблица 3.3

U <sub>эксп</sub> , В	0							
I, А	0							

3.7. По экспериментальным данным таблицы 3.3. построить характеристику всей цепи  $U_{ЭКСП}=f(I)$ .

3.8. Записать уравнения законов Кирхгофа для исследуемой разветвленной нелинейной цепи.

3.9. Собрать электрическую цепь по рис.3.3 и предъявить её для проверки преподавателю. В качестве амперметров использовать измерительные приборы модуля «Миллиамперметры» или «Измерительные приборы / Измерительные приборы 1». После проверки схемы включить электропитание модулей стенда и установить заданное значение входного напряжения U (источник E1). Измерить токи I1 и I2, мультиметром измерить напряжения U1 и U2 на отдельных участках цепи. Определить величину тока I3. Результаты занести в табл.3.4.

Таблица 3.4

U, В	U1,В	U2, В	I1,А	I2, А	I3=I1-I2,А

3.10. Используя результаты эксперимента, построить расчетную вольтамперную характеристику всей цепи  $U_{РАСЧ} = f(I)$  и сравнить с экспериментальной.

3.11. Сделать вывод об особенностях применения законов Кирхгофа в нелинейной цепи постоянного тока.

3.12. Рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления нелинейного элемента при указанном преподавателем значении напряжения.

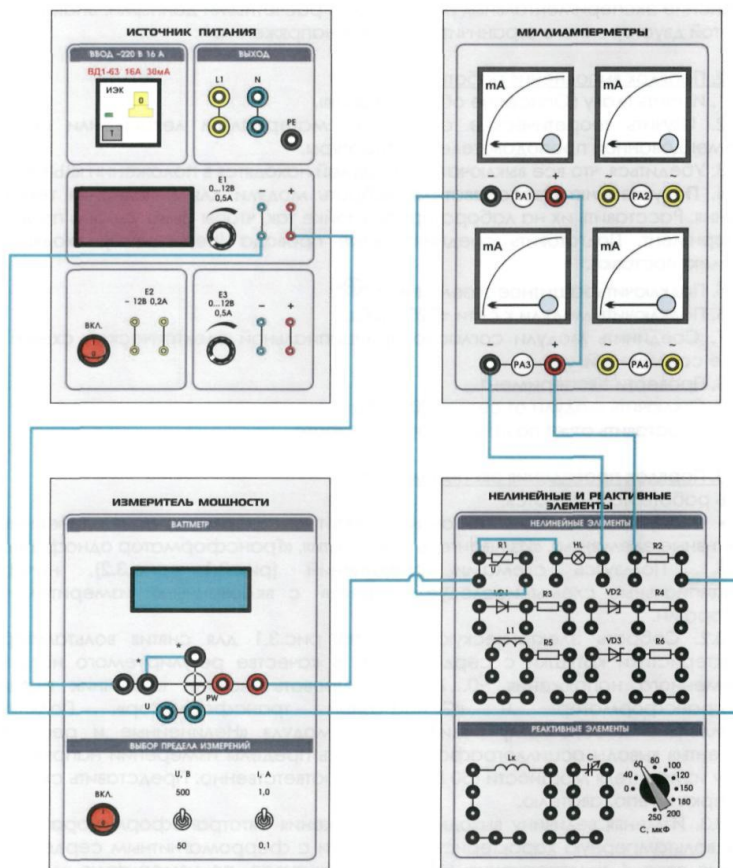


Рис.3.3. Исследование нелинейной электрической цепи постоянного тока.



## Контрольные вопросы

1. Что называется нелинейным элементом?
2. Какие нелинейные элементы вам известны?
3. Расскажите о назначении и принципе действия стабилитрона (терморезистора, выпрямительного диода)
4. Как классифицируются ВАХ нелинейных элементов?
5. Как строится ВАХ цепи, состоящей из последовательно соединенных нелинейных элементов?
6. Как строится ВАХ цепи, состоящей из параллельно соединенных нелинейных элементов?
7. Как пользуясь ВАХ нелинейного элемента определить его статическое и динамическое сопротивления?
8. Приведите пример ВАХ нелинейного элемента, в одной из точек которой статическое и динамическое сопротивления равны.