

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

РЕЗИСТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.02*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра общей электротехники

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

РЕЗИСТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.02*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 621.31 ББК 31.2 (073)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Резистивные элементы в электрических цепях: Методические указания к практическим занятиям/ Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Я.Э. Шклярский, А.И. Барданов*. СПб, 2021. 68 с.

Методические указания к практическим занятиям «Резистивные элементы в электрических цепях» по дисциплине «Теоретические основы электротехники» содержат теоретические сведения о цепях, состоящих из линейных и нелинейных резистивных элементов, способах расчета таких цепей, а также ряд заданий для самостоятельного решения с примерами решения.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Научный редактор проф. *В.Я. Фролов*

Рецензент канд. техн. наук *А.А. Брагин* (ООО «Сименс»)

Оглавление

Введение	4
Теоретические сведения	5
Задача №1	23
Задача №2	37
Задача №3	40
Задача №4	48
Задача № 5	54
Рекомендуемый библиографический список	60
ПРИЛОЖЕНИЕ А	61
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	64
ПРИЛОЖЕНИЕ В	66
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	67

Введение

Настоящие методические указания предназначены студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / Электропривод и автоматика по курсу теоретических основ электротехники.

Методические указания посвящены резистивным элементам в электрических цепях. Подробно рассмотрены следующие темы:

- линейные и нелинейные резистивные элементы;
- представление резистивного элемента посредством вольт-амперной характеристики;
- виды вольт-амперных характеристик;
- последовательное и параллельное соединение резистивных элементов;
- сложение вольт-амперных характеристик;
- соединение резистивных элементов в треугольник и звезду;
- аналитические и графические методы расчета резистивных цепей.

Теоретические сведения и задачи для самостоятельного решения, представленные в методических указаниях будут полезны для формирования профессиональных компетенций у студентов, только приступивших к изучению курса ТОЭ. Однако перед тем как приступить к освоению материала, изложенного в методических указаниях, рекомендуется ознакомиться с соответствующими разделами в учебных пособиях из приложенного к указаниям библиотечного списка.

Теоретические сведения

Резистивные элементы

Резистивные элементы в эквивалентных схемах электрических цепей отражают способность цепи преобразовывать энергию электромагнитного поля в другие виды энергии. Например, тепловую в нагревательных элементах или механическую в электрических машинах. Основным параметром резистивных элементов является *активное сопротивление*.

Резистивные элементы разделяют на линейные и нелинейные. Линейные резистивные элементы в каждый момент времени, при любых величинах напряжений и токов описываются законом Ома:

$$u = i \cdot R, \quad (1)$$

где: u – мгновенное значение напряжения; i – мгновенное значение тока; R – величина активного сопротивления резистивного элемента.

Предполагается, что на таком элементе величина активного сопротивления остается неизменной, поэтому напряжение находится в прямопропорциональной зависимости от тока и наоборот. Если изобразить эту зависимость на графике, получится прямая линия. Графики, в которых ток ставится в зависимость к напряжению, называются вольт-амперными характеристиками (сокращенно ВАХ) элементов, а все резистивные элементы для которых получается зависимость такого типа называются линейными.

Различные способы обозначения линейных резистивных элементов представлены на рисунке 1. В данных методических указаниях применяется обозначение, показанное на рисунке 1 а.

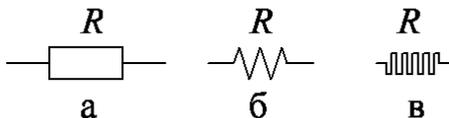


Рис. 1. Примеры обозначения резистивных элементов

Существует большое множество электротехнических устройств,

явления в которых описываются с помощью нелинейных вольт – амперных характеристик. Это лампы накаливания, электрические дуги, вакуумные электронные лампы, полупроводниковые диоды, транзисторы и пр. Различные обозначения нелинейных резистивных элементов показаны на рисунке 2, а вольт-амперные характеристики линейного (для сравнения) и ряда нелинейных элементов представлены на рисунке 3. В этих методических указаниях будет применяться обозначение, показанное на рисунке 2 а.

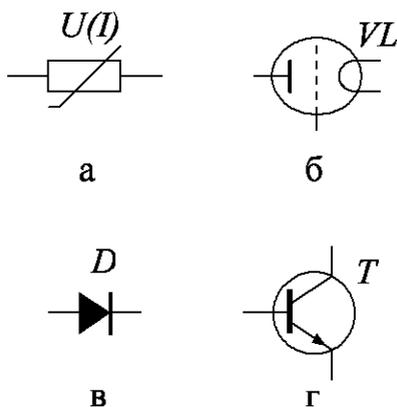


Рис. 2. Обозначения нелинейных резистивных элементов: а – элемент с нелинейной ВАХ, б – вакуумный триод, в – полупроводниковый диод, г – биполярный транзистор

Во всех рассмотренных случаях необычные формы ВАХ обусловлены физическими процессами, происходящими в средах в которых распространяются электрические поля и в которых переносится электрический заряд.

Обратите внимание на то, что ВАХ линейного резистивного элемента и электрической дуги (изображения а и б на рисунке 3) симметричны относительно начала координат, в то время как ВАХ полупроводниковых элементов (изображения в и г на рисунке 3) несимметричны. В этих методических указаниях внимание уделено обоим типам характеристик.

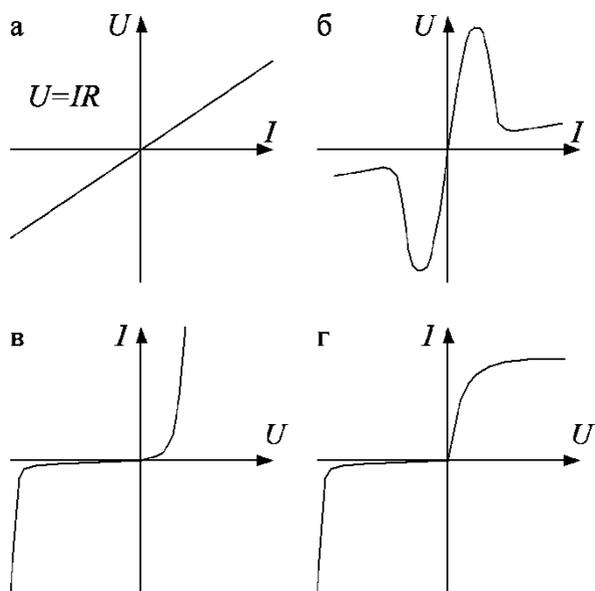


Рис.3. Вольт-амперные характеристики: а – линейного резистивного элемента, б – электрической дуги, в – полупроводникового диода, г – биполярного транзистора, при протекании по базе некоторого фиксированного тока

Есть еще одно различие между изображениями на рисунке 3 – это ориентация осей U и I . Оси можно располагать произвольно в зависимости от решаемых задач. Так для ряда задач электротехники удобно отмечать значения тока по оси абсцисс, а напряжение по оси ординат, в то время как для решения ряда задач из области электроники удобно другое расположение осей. В этих методических указаниях будут рассматриваться оба типа расположения осей.

Отдельно следует отметить два вспомогательных элемента, которые применяются в электрических цепях и которые можно встретить в данных методических указаниях: *закоротку* и *разрыв*. Эти элементы проиллюстрированы на рисунке 4.

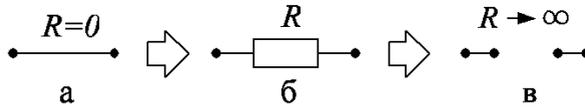


Рис. 4. Резистивные элементы с: а – бесконечно малыми или нулевым сопротивлением (закоротка); б – конечным активным сопротивлением; в – сопротивлением, стремящимся к бесконечно большой величине (разрыв)

Эквивалентирование электрических цепей

Говорят, что резистивные элементы соединены последовательно, когда при подключении к цепи источника напряжения по ним протекает один и тот же ток.

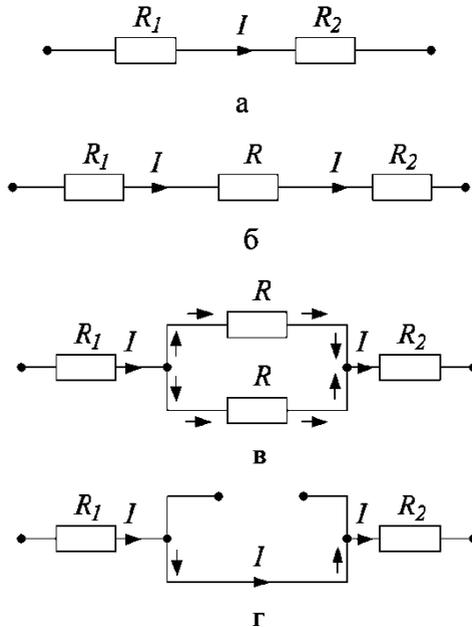


Рис. 5. Примеры последовательного соединения резистивных элементов

Это справедливо как для линейных, так и для нелинейных резистивных элементов. Линейные резистивные элементы R_1 и R_2 на рисунке 5 на всех схемах соединены последовательно.

Резистивные элементы соединены параллельно, если они

находятся между двумя узлами с одинаковыми потенциалами. Линейные резистивные элементы R_1 и R_2 на рисунке 6 на всех схемах соединены параллельно.

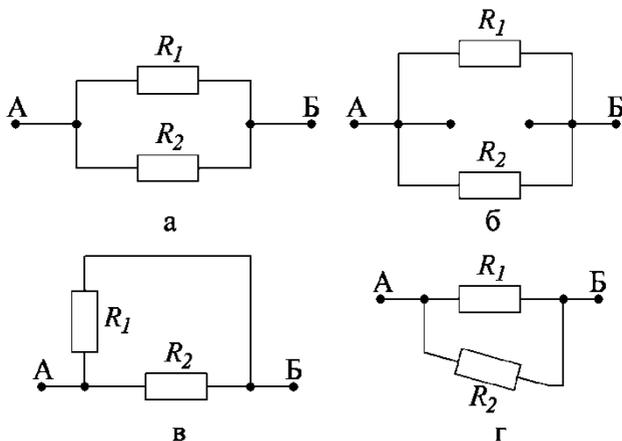


Рис. 6. Примеры параллельного соединения резистивных элементов

При последовательном соединении складываются напряжения и сопротивления, что проиллюстрировано рисунком 7.

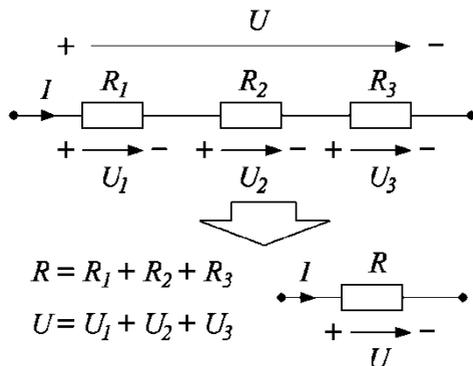


Рис. 7. Эквивалентирование последовательно соединенных линейных резистивных элементов

При параллельном соединении складываются токи и

проводимости. Что проиллюстрировано рисунком 8.

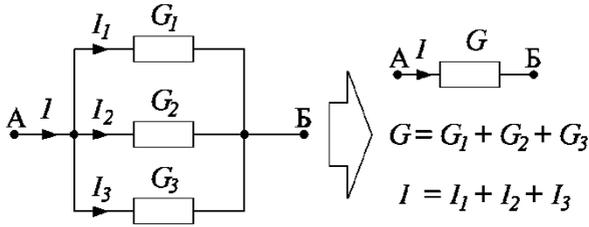


Рис. 8. Эквивалентирование параллельно соединенных линейных резистивных элементов

Линейные и нелинейные резистивные элементы, соединенные последовательно и параллельно, также можно объединять в эквивалентные нелинейные резистивные сопротивления, что проиллюстрировано на рисунке 9.

При этом производится сложение вольт-амперных характеристик элементов. При последовательном соединении характеристики складываются по напряжению при одинаковых значениях тока, что продемонстрировано на рисунке 10 а. ВАХ линейного резистивного элемента R складывается с ВАХ нелинейного резистивного элемента $U(I)_1$. Результирующая ВАХ обозначена на рисунке $U(I)$. На примере точки с напряжением U_3 показано, как получены все точки характеристики $U(I)$.

При параллельном соединении вольт-амперные характеристики складываются по току при постоянных напряжениях, что проиллюстрировано на рисунке 10 б. Так же как и в предыдущем случае, проиллюстрированы операции получения точки эквивалентной ВАХ с током I_3 .

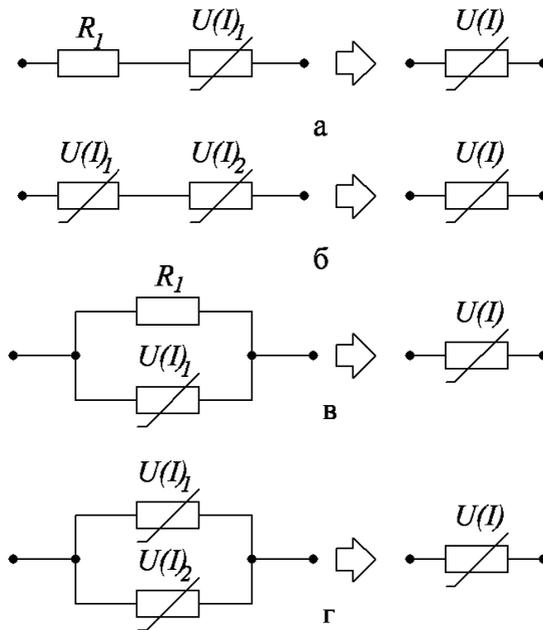


Рис. 9. Эквивалентирование соединений линейных и нелинейных резистивных элементов

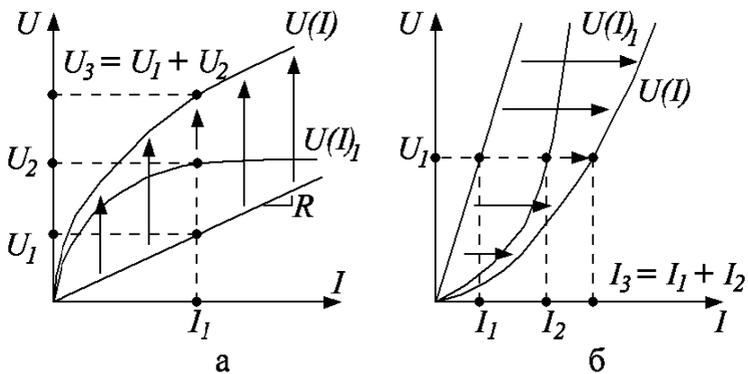


Рис. 10. Пример сложения ВАХ: а – при последовательном соединении, б – при параллельном соединении

Соединение резистивных элементов в треугольник и звезду

Существует два особых вида соединения элементов в электрических цепях, которые нельзя однозначно отнести ни к последовательному, ни к параллельному соединению. Соединения элементов в треугольник и в звезду показаны на рисунке 11.

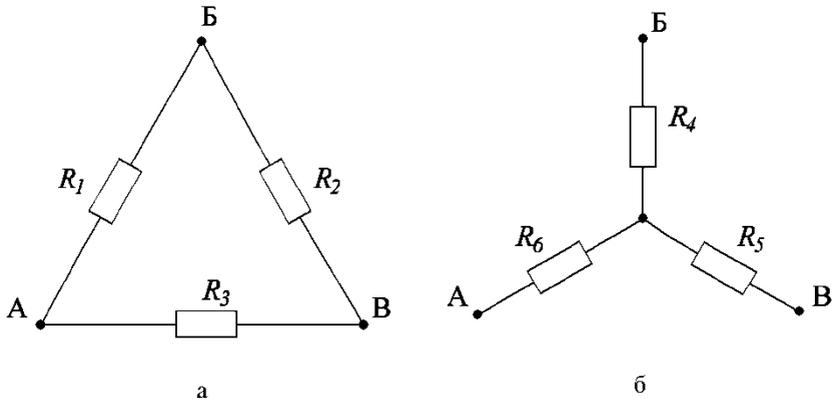


Рис. 11. Соединение резистивных элементов: а – в треугольник; б – в звезду

Напрямую эквивалентировать цепи, содержащие элементы, соединенные в треугольник или звезду бывает сложно, однако такие группы элементов обладают очень полезным свойством: любой треугольник можно преобразовать в эквивалентную звезду и наоборот. Это свойство продемонстрировано рисунком 12.

Соединения треугольником и звездой называют эквивалентными, если при замене треугольника на эквивалентную звезду (или наоборот), токи в ветвях цепи и потенциалы в узлах цепи не изменяются.

Это условие приводит к следующему утверждению: сопротивления эквивалентных треугольника и звезды относительно одних и тех же зажимов одинаковы.

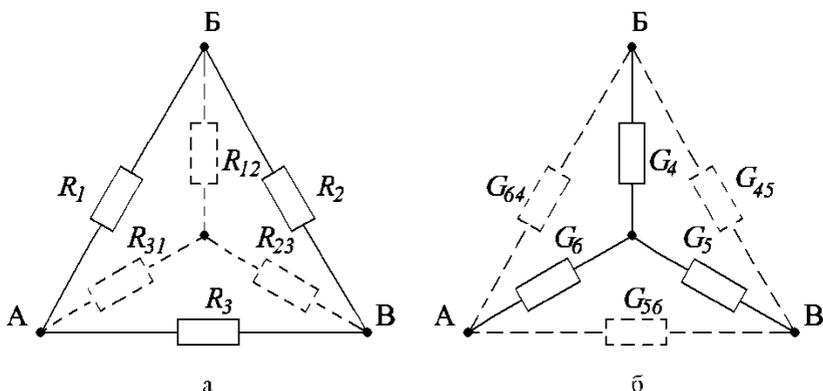


Рис. 12. Схема преобразования: а – треугольника в эквивалентную звезду; б – звезды в эквивалентный треугольник

На рисунке 13 показаны входные сопротивления эквивалентных треугольника и звезды относительно входных зажимов А и Б. Эквивалентные сопротивления при этом равны:

$$R_{a\bar{b}} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2)$$

и

$$R_{a\bar{b}} = R_{12} + R_{31}. \quad (3)$$

Проведя аналогичное эквивалентирование относительно других зажимов, можно получить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} R_{12} + R_{31} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}, \\ R_{12} + R_{23} = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}, \\ R_{23} + R_{31} = \frac{R_3(R_2 + R_1)}{R_1 + R_2 + R_3}. \end{cases} \quad (4)$$

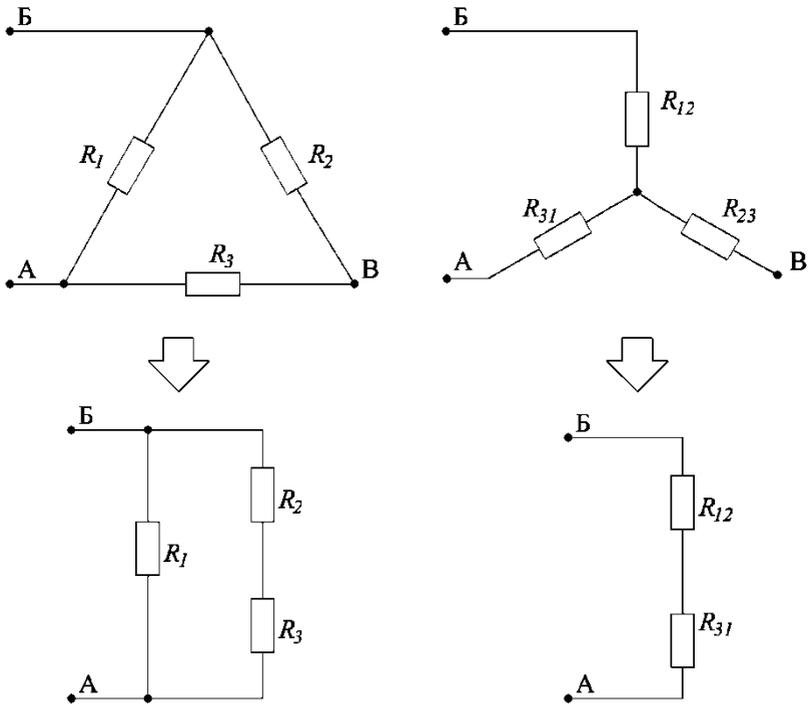


Рис. 13. Выражение эквивалентных сопротивлений звезды и треугольника относительно зажимов А и Б

Преобразуя систему уравнений (4), получаем систему уравнений (5), которую можно использовать для преобразования треугольника в эквивалентную звезду.

$$\begin{cases} R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3}, \\ R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, \\ R_{31} = \frac{R_3 R_1}{R_1 + R_2 + R_3}. \end{cases} \quad (5)$$

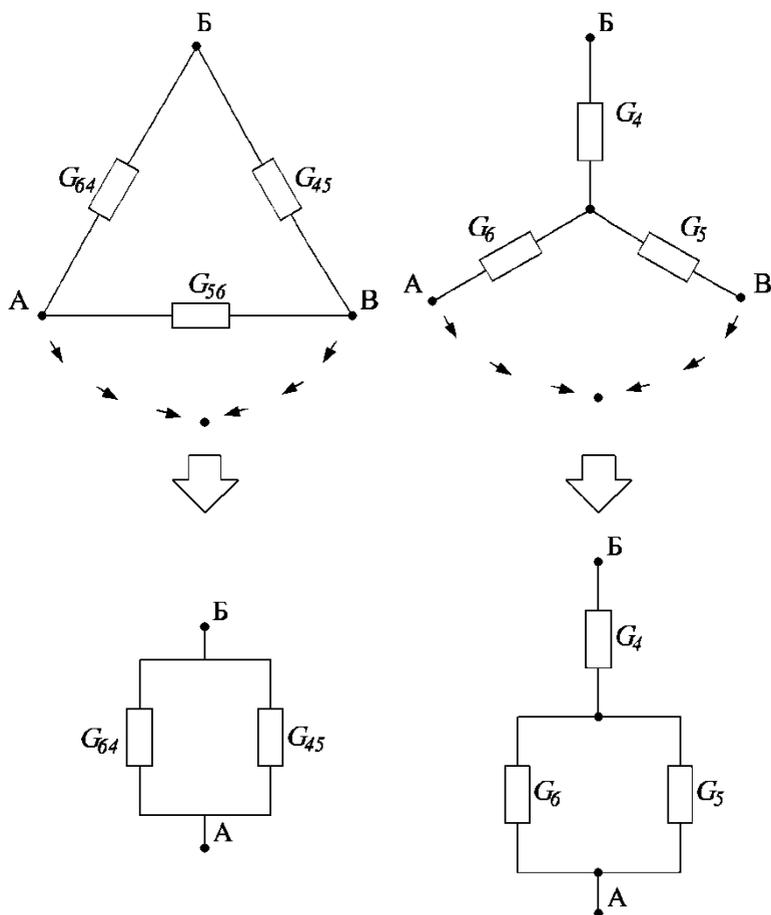


Рис. 14. Выражение эквивалентной проводимости треугольника и звезды относительно зажимов Б и соединенных зажимов А и В

Для того, чтобы получить аналогичную систему уравнений, но для перехода от звезды к эквивалентному треугольнику, проведем аналогичные операции но для цепей, полученных после преобразований, показанных на рисунке 14. При этом будем оценивать входные проводимости.

Получившаяся при этом система уравнений:

$$\begin{cases} G_{64} + G_{45} = \frac{G_4(G_5 + G_6)}{G_4 + G_5 + G_6}, \\ G_{45} + G_{56} = \frac{G_5(G_4 + G_6)}{G_4 + G_5 + G_6}, \\ G_{56} + G_{64} = \frac{G_6(G_4 + G_5)}{G_4 + G_5 + G_6}. \end{cases} \quad (6)$$

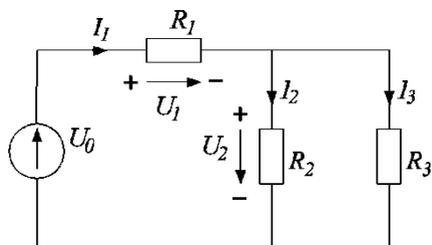
Преобразуя систему уравнений (6), получаем систему уравнений (7), позволяющую осуществить переход от соединения элементов в звезду к эквивалентному соединению элементов в треугольник:

$$\begin{cases} G_{45} = \frac{G_4 G_5}{G_4 + G_5 + G_6}, \\ G_{56} = \frac{G_5 G_6}{G_4 + G_5 + G_6}, \\ G_{64} = \frac{G_6 G_4}{G_4 + G_5 + G_6}. \end{cases} \quad (7)$$

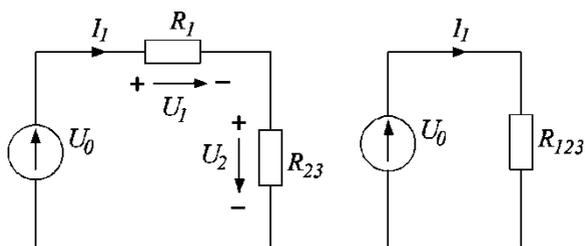
Аналитический метод расчета резистивных цепей

Интерес представляет возможность эквивалентирования электрических цепей для определения токов в ветвях и напряжений на участках цепей. Рассмотрим пример решения такой задачи с помощью рассмотренных методов для цепи, состоящей из линейных резистивных элементов (рисунок 15 а). Параметры элементов $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, $R_3 = 6 \Omega$, $U_0 = 9 \text{ В}$.

Решение проведем в два этапа: на первом этапе выполним эквивалентирование (сворачивание) цепи, на втором этапе пошагово восстановим начальную топологию цепи, определяя токи в ветвях и напряжения на участках цепи на каждом из этапов.



а



б

в

Рис. 15. Эквивалентирование цепи, состоящей из линейных резистивных элементов

Перейдем к схеме, изображенной на рисунке 15 б. Для этого следует эквивалентировать сопротивления R_2 и R_3 , соединенные параллельно. Сложим проводимости этих элементов в общем виде:

$$G_{23} = G_2 + G_3. \quad (8)$$

Перепишем уравнение 8, подставив туда сопротивления:

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (9)$$

Из уравнения 9 несложно выразить сопротивление R_{23} :

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2 \Omega. \quad (10)$$

Теперь осуществим переход к эквивалентной схеме, изображенной на рисунке 15 в. Для этого сложим сопротивления R_1

и R_{23} :

$$R_{123} = R_1 + R_{23} = 1 + 2 = 3\Omega. \quad (11)$$

Теперь, когда эквивалентирование цепи завершено, путем применения закона Ома (1), можно определить ток I_0 и перейти ко второму этапу решения задачи:

$$I_1 = \frac{U_0}{R_{123}} = \frac{9}{3} = 3 \text{ А}. \quad (12)$$

Теперь можно переходить к схеме, изображенной на рисунке 15 б. Определим напряжение U_1 :

$$U_1 = I_1 R_1 = 3 \cdot 1 = 3 \text{ В}, \quad (13)$$

и U_2 :

$$U_2 = I_1 R_{23} = 3 \cdot 2 = 6 \text{ В}. \quad (14)$$

Если скомбинировать уравнения 12 и 13, а также 12 и 14, можно получить следующие удобные уравнения для напряжения U_1 :

$$U_1 = I_1 R_1 = U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_{23}}, \quad (15)$$

и для напряжения U_2 :

$$U_2 = I_1 R_{23} = U_0 \frac{R_{23}}{R_1 + R_{23}}. \quad (16)$$

Теперь, когда определено напряжение U_2 можно перейти к оригинальной схеме, изображенной на рисунке 15 а. Определим ток I_1 :

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{6}{3} = 2 \text{ А}, \quad (17)$$

и ток I_2 :

$$I_3 = \frac{U_2}{R_3} = \frac{6}{6} = 1 \text{ А}. \quad (18)$$

Таким образом, задача полностью решена, однако по

аналогии с напряжениями в последовательном соединении приведем удобные формулы для токов I_2 :

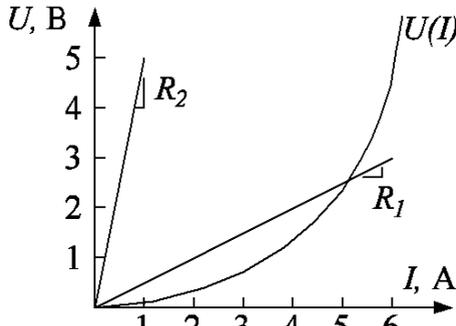
$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = I_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad (19)$$

и I_3 :

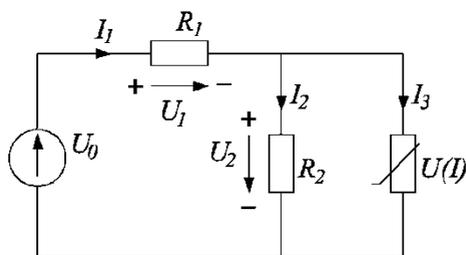
$$I_3 = \frac{U_2}{R_3} = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3}. \quad (20)$$

Графический метод расчета резистивных цепей

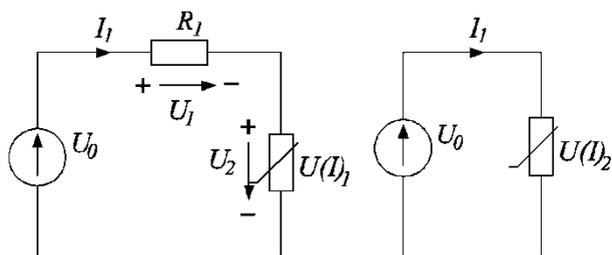
Рассмотрим способ решения аналогичной задачи с помощью вольт-амперных характеристик. Параметры элементов: $R_1 = 0.5 \Omega$, $R_2 = 5 \Omega$ и, $U_0 = 4 \text{ В}$, ВАХ нелинейного элемента $U(I)$ вместе с ВАХ линейных элементов представлены на рисунке 16, а схема, на примере которой будет рассмотрено решение задачи, представлена на рисунке 17 а.



Как и в предыдущем случае, решение задачи делится на два этапа. На первом этапе производится поэтапное эквивалентирование схемы. Эквивалентирование проводится сначала для параллельного соединения рисунок 17 б, а затем и для последовательного соединения — рисунок 17 в. Второй этап решения задачи заключается в нахождении токов в ветвях и напряжений на участках цепи, однако в этом случае решение осуществляется графически, с помощью простых геометрических построений.



а



б

в

Рис. 17. Эквивалентирование цепи, состоящей из линейных и нелинейных резистивных элементов

На рисунке 18 а продемонстрировано сложение характеристик при параллельном соединении нелинейного резистивного элемента $U(I)$ с линейными резистивным элементом R_2 . Сложение ВАХ осуществляется по току при одинаковых значениях напряжения. Эквивалентная ВАХ обозначена $U(I)_1$.

На рисунке 18 б продемонстрировано сложение характеристик при последовательном соединении нелинейного резистивного элемента $U(I)_1$ с линейными резистивным элементом R_1 . Сложение ВАХ осуществляется по напряжению при одинаковых значениях тока. Эквивалентная ВАХ обозначена $U(I)_2$.

После завершения эквивалентирования цепи можно переходить ко второму этапу решения задачи, который заключается в определении токов в ветвях и напряжений на участках цепи. Для этого на график нанесом характеристики нелинейных резистивных элементов $U(I)_1$ и $U(I)_2$, а также линейного резистивного элемента R_1 (рисунок 18 в). Напряжение источника равно 4 В, проведем на этом

уровне горизонтальную линию. Точка А – пересечения линии, определяющей источник напряжения U_0 с эквивалентной ВАХ цепи $U(I)$ называется рабочей точкой. Если провести от точки А вертикальную линию до пересечения с осью абсцисс, то можно определить ток I_1 . Согласно графику ток $I_1 = 4.8$ А.

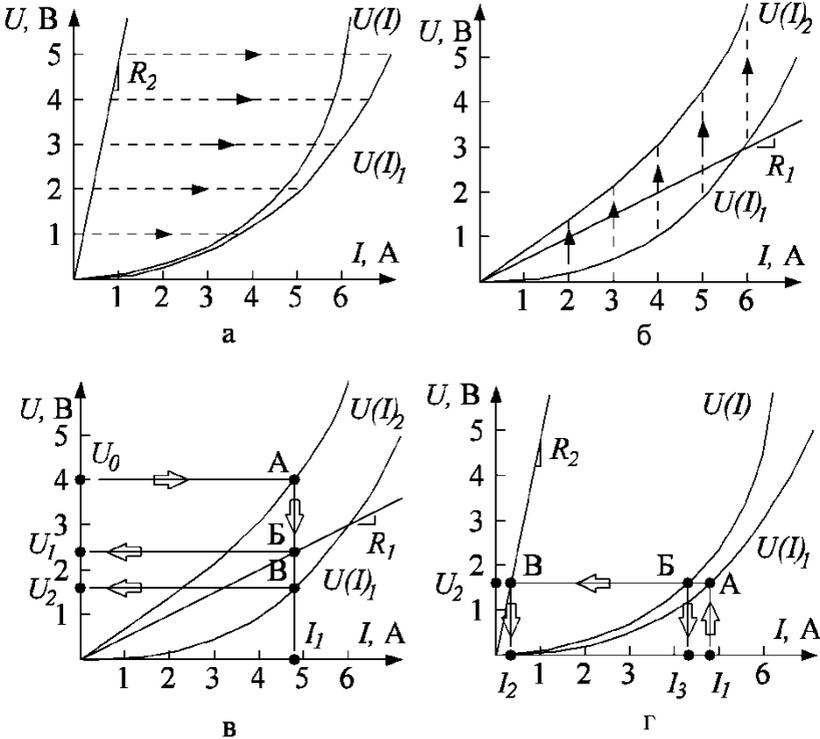


Рис. 18. Последовательность графического метода решения: а – эквивалентирование параллельного соединения элементов, б – эквивалентирование последовательного соединения элементов, в – определение напряжений на участках цепи, г – определение токов в ветвях цепи

Получившаяся вертикальная прямая пересекает также ВАХ элемента R_1 и ВАХ элемента $U(I_1)$. Действительно, они соединены последовательно и через них протекает один ток I_1 . Точки Б и В, отмечающие пересечения с соответствующими ВАХ, также

являются рабочими точками для этих элементов и если провести горизонтальные прямые на уровне этих точек, можно определить падения напряжения на них. Так, при токе 4.8 А, падение напряжения на участке цепи U_1 (на линейном элементе) равно 2.4 В, а падение напряжения U_2 (на нелинейном элементе) равно 1.6 В.

Также по известному току I_1 или напряжению U_2 можно определить токи в ветвях параллельного соединения I_2 и I_3 . Решение этой задачи проиллюстрировано на рисунке 18 г. Если на диаграмме, на которую нанесены ВАХ элементов $U(I)_1$, $U(I)$ и R_2 , провести вертикальную линию на уровне I_1 , попадем в точку А, которая является рабочей точкой для элемента $U(I)_1$. Если провести горизонтальную линию до пересечения с осью ординат, можно попасть в точку U_2 , что подтвердит полученные ранее результаты. Однако сейчас интерес представляют получившиеся точки Б и В, являющиеся рабочими точками для параллельно соединенных элементов. Из этих построений определяем, что ток $I_2 = 0.4$ А, а ток $I_3 = 4.4$ А.

Задача №1

Выразите эквивалентное сопротивление (*входное сопротивление*) схемы для пар контактов a и b , a и $в$, $б$ и $в$ относительно величины R и определите ток I . Варианты для самостоятельного решения приведены в таблице 1.

Пример решения задачи

Для примера рассмотрим цепь на рисунке 19. Дополнительные условия для решения задачи: $U_{ав} = 120$ В, $R = 10$ Ω .

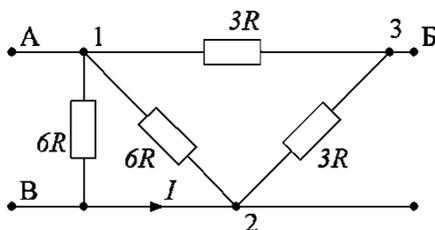


Рис. 19. Схема цепи с линейными резистивными элементами

Преобразуем цепь для того, чтобы найти эквивалентное сопротивление относительно зажимов А и Б. Цель преобразования – представить цепь таким образом, чтобы отчетливо были видны последовательные и параллельные соединения (рисунок 20).

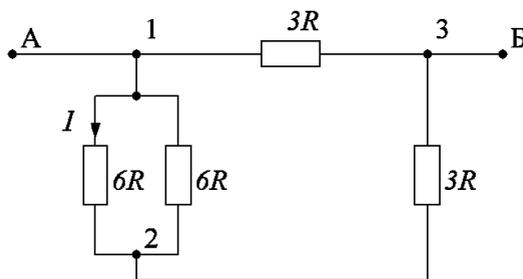


Рис. 20. Упрощенная схема цепи

Вспомогательные узлы в цепях на рисунках 19 и 20

отмечены одинаково цифрами 1, 2 и 3. При таком представлении отчетливо видно параллельное соединение, между узлами 1 и 2. Величина эквивалентного сопротивления в этом случае составит:

$$\frac{6R \cdot 6R}{6R + 6R} = \frac{36R^2}{12R} = 3R.$$

Эквивалентная схема представлена на рисунке 21.

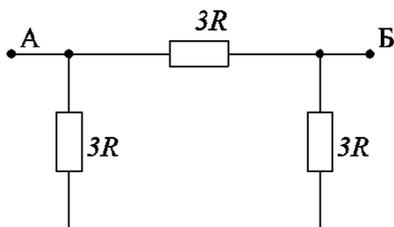


Рис. 21. Упрощенная схема цепи

В схеме на рисунке 21 отчетливо видно последовательное соединение. Продолжим преобразование схемы. Величина эквивалентного сопротивления в этом случае составит:

$$3R + 3R = 6R.$$

Следующая ступень схемы представлена на рисунке 22.

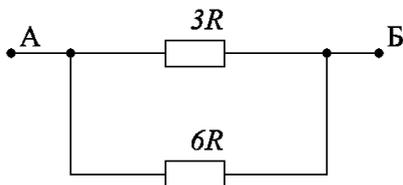


Рис. 22. Упрощенная схема цепи

После последнего преобразования в схеме осталось только одно параллельное соединение резистивных элементов, поэтому общее сопротивление относительно зажимов А и Б будет равно:

$$\frac{3R \cdot 6R}{3R + 6R} = \frac{18R^2}{9R} = 2R.$$

Результат преобразования представлен на рисунке 23.

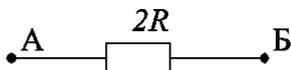


Рис. 23. Упрощенная схема цепи

Определим ток I , отмеченный в одной из ветвей на рисунке 20 из условия что к зажимам А и Б подключен источник напряжения величиной 120 В, а величина R составляет 10 Ω . Для этого выполним ряд обратных преобразований, проиллюстрированных на рисунке 24.

Если рассматривать схему, представленную на рисунке 23, она же изображена в левом верхнем углу на рисунке 24, понятно, что с учетом исходных данных ток $I_{аб}$, втекающий в цепь, будет равен:

$$I_{аб} = \frac{U_{аб}}{2R} = \frac{120}{20} = 6 \text{ А.}$$

Если рассмотреть предыдущую эквивалентную схему, представленную на рисунке 22, можно определить токи, протекающие через ветви с сопротивлениями 3R (30 Ω) и 6R (60 Ω), это токи 4 и 2 ампера соответственно. Обратите внимание, что токи поделились в обратной пропорции к сопротивлениям: через ветвь с большим сопротивлением протекает меньший ток и наоборот. При этом выполняется первый закон Кирхгофа:

$$6 = 4 + 2.$$

Перейдем к предыдущему состоянию схемы (рисунок 21). Узлы, обозначенные на правой нижней схеме на рисунке 24, однозначно соответствуют узлам на схемах на рисунке 20 и на рисунке 19.

В этой эквивалентной схеме ветвь, по которой протекает ток 2 ампера, включает два сопротивления по 30 Ω , соединенных последовательно, несложно определить, что падение напряжения на каждом из резистивных элементов U_{12} и U_{23} можно определить по формуле:

$$U_{12} = U_{23} = 2 \cdot 30 = 60 \text{ В.}$$

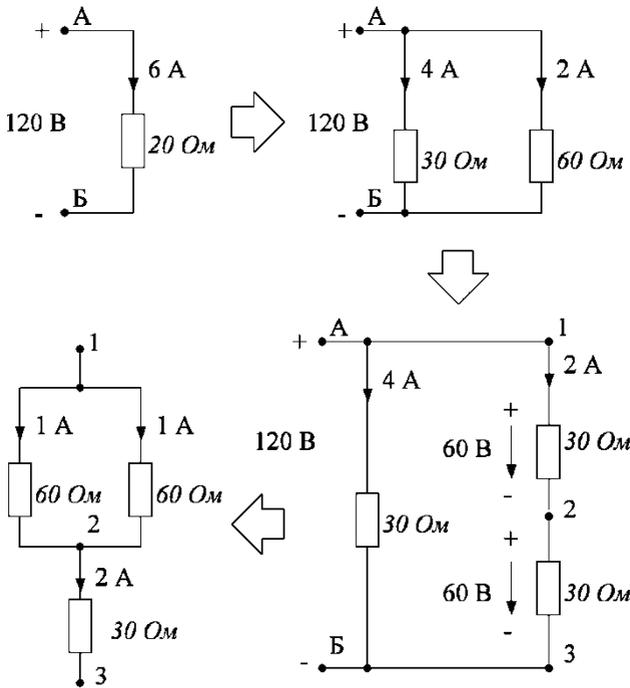


Рис. 24. Упрощенная схема цепи

Обратите внимание, что при этом выполняется второй закон Кирхгофа:

$$120 = 60 + 60.$$

Для простоты выделим участок цепи между узлами 1 и 3. На этом участке последовательно соединены сопротивление в 30Ω и два сопротивления по 60Ω , соединенные параллельно. По условию задачи требуется определить ток в одной из ветвей с сопротивлением 60Ω . Для этого поделим падение напряжения на участке цепи на величину сопротивления:

$$I = \frac{U_{12}}{6R} = \frac{60}{60} = 1 \text{ A}.$$

Следует отметить, что при одинаковых сопротивлениях в параллельных ветвях, токи делятся поровну.

Определим сопротивления относительно зажимов А и В (последовательность расчета представлена на рисунке 25) и относительно зажимов Б и В (рисунок 26).

Ответ: $R_{aб} = 2 \Omega$; $R_{ав} = 2 \Omega$; $R_{бв} = 2 \Omega$; $I = 1 \text{ A}$.

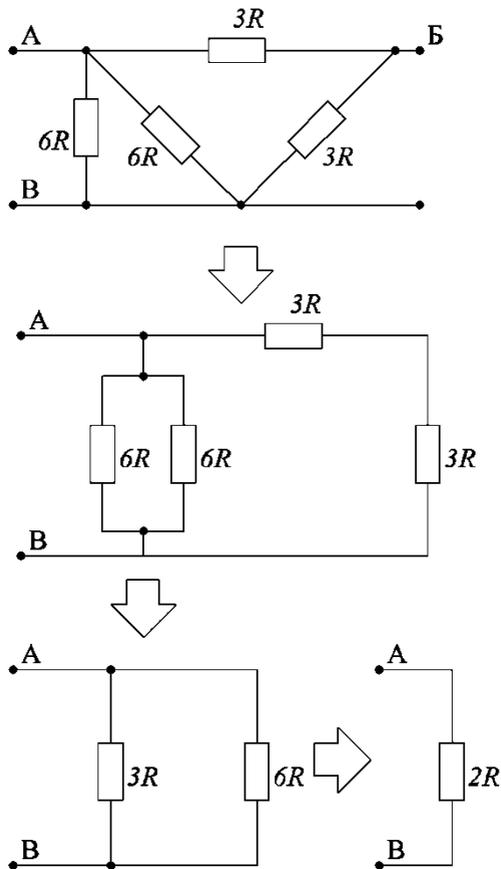


Рис. 25. Пример эквивалентирования сопротивлений относительно зажимов А и В

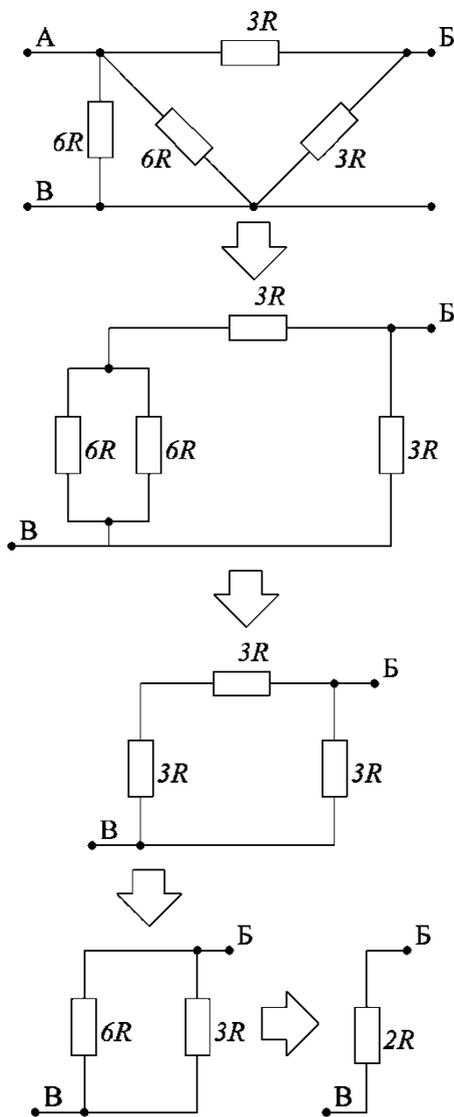
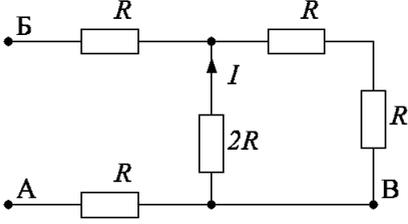
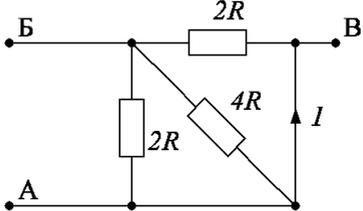
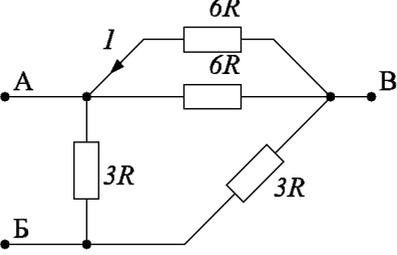
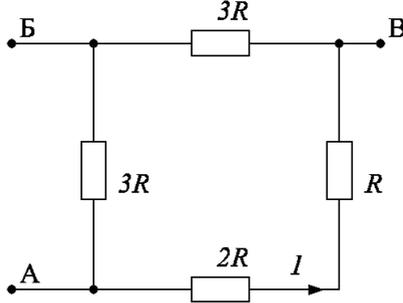


Рис. 26. Пример эквивалентирования сопротивления относительно зажимов Б и В

Варианты для задачи №1

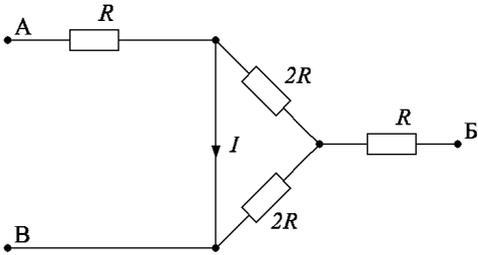
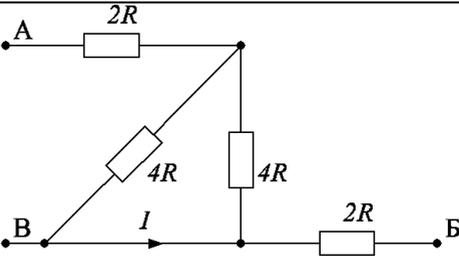
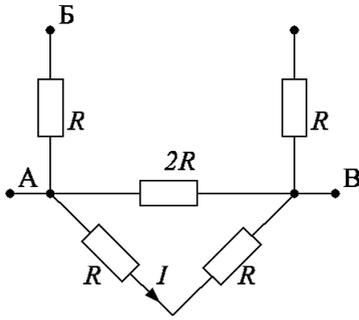
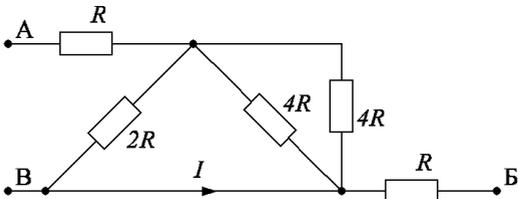
<p>Вариант 1</p> <p>Дано: $U_{ab} = 100 \text{ В}$, $R = 50 \Omega$</p>	
<p>Вариант 2</p> <p>Дано: $U_{ab} = 200 \text{ В}$, $R = 50 \Omega$</p>	
<p>Вариант 3</p> <p>Дано: $U_{ab} = 120 \text{ В}$, $R = 5 \Omega$</p>	
<p>Вариант 4</p> <p>Дано: $U_{ab} = 80 \text{ В}$, $R = 10 \Omega$</p>	

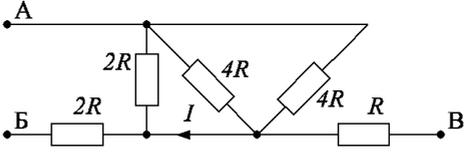
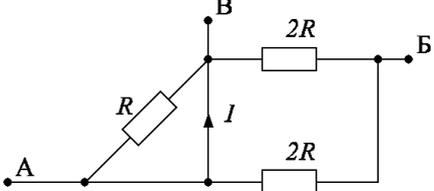
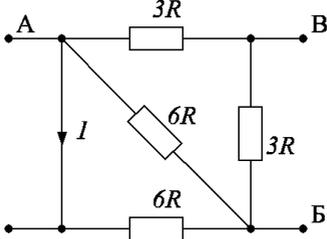
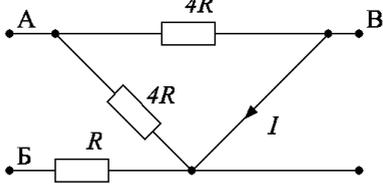
<p>Вариант 5</p> <p>Дано: $U_{ab} = 150 \text{ В}$, $R = 5 \Omega$</p>	
<p>Вариант 6</p> <p>Дано: $U_{ab} = 100 \text{ В}$, $R = 50 \Omega$</p>	
<p>Вариант 7</p> <p>Дано: $U_{ab} = 120 \text{ В}$, $R = 5 \Omega$</p>	
<p>Вариант 8</p> <p>Дано: $U_{ab} = 180 \text{ В}$, $R = 10 \Omega$</p>	

<p>Вариант 9</p> <p>Дано: $U_{ab} = 120 \text{ В}$, $R = 3 \Omega$</p>	
<p>Вариант 10</p> <p>Дано: $U_{ab} = 150 \text{ В}$, $R = 5 \Omega$</p>	
<p>Вариант 11</p> <p>Дано: $U_{ab} = 400 \text{ В}$, $R = 5 \Omega$</p>	
<p>Вариант 12</p> <p>Дано: $U_{ab} = 80 \text{ В}$, $R = 10 \Omega$</p>	

<p>Вариант 13</p> <p>Дано: $U_{ab} = 120 \text{ В}$, $R = 10 \text{ }\Omega$</p>	
<p>Вариант 14</p> <p>Дано: $U_{ab} = 320 \text{ В}$, $R = 20 \text{ }\Omega$</p>	
<p>Вариант 15</p> <p>Дано: $U_{ab} = 400 \text{ В}$, $R = 10 \text{ }\Omega$</p>	
<p>Вариант 16</p> <p>Дано: $U_{ab} = 150 \text{ В}$, $R = 25 \text{ }\Omega$</p>	

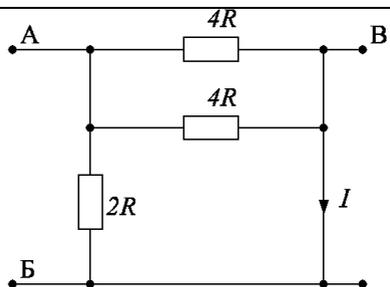
<p><i>Вариант 17</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 200 \text{ В}$, $R = 50 \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 18</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 240 \text{ В}$, $R = 5 \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 19</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 320 \text{ В}$, $R = 10 \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 20</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 120 \text{ В}$, $R = 2 \Omega$</p>	

<p><i>Вариант 21</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 300 \text{ В}$, $R = 50 \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 22</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 360 \text{ В}$, $R = 15 \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 23</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 300 \text{ В}$, $R = 50 \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 24</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 360 \text{ В}$, $R = 10 \Omega$</p>	

<p><i>Вариант 25</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 300 \text{ В}$, $R = 10 \ \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 26</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 120 \text{ В}$, $R = 60 \ \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 27</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 120 \text{ В}$, $R = 10 \ \Omega$</p>	
<p><i>Вариант 28</i></p> <p>Дано: $U_{ab} = 180 \text{ В}$, $R = 10 \ \Omega$</p>	

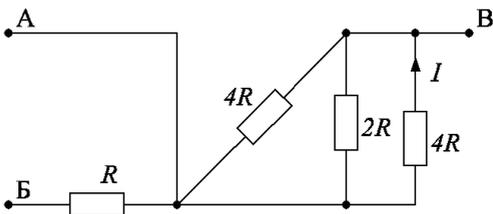
Вариант 29

Дано:
 $U_{ab} = 200 \text{ В}$,
 $R = 25 \Omega$



Вариант 30

Дано:
 $U_{ab} = 100 \text{ В}$,
 $R = 5 \Omega$



Задача №2

Выполните преобразование $\Delta \rightarrow Y$ и $Y \rightarrow \Delta$, для расчетов используйте данные из таблицы 2 и схемы, представленные на рисунке 27.

Пример решения задачи

Дано: В треугольник соединены сопротивления $R_1 = 75 \Omega$, $R_2 = 150 \Omega$ и $R_3 = 25 \Omega$, требуется преобразовать их в звезду. В то же время в звезду соединены сопротивления $R_4 = 45 \Omega$, $R_5 = 15 \Omega$ и $R_6 = 7.5 \Omega$, требуется преобразовать схему в эквивалентный треугольник.

Рассчитаем сопротивления R_{12} , R_{23} и R_{31} эквивалентной звезды по известным формулам:

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{75 \cdot 150}{75 + 150 + 25} = 45 \Omega,$$

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{150 \cdot 25}{75 + 150 + 25} = 15 \Omega,$$

$$R_{31} = \frac{R_3 R_1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{25 \cdot 75}{75 + 150 + 25} = 7.5 \Omega.$$

Рассчитаем проводимости эквивалентного треугольника по известным формулам:

$$G_{64} = \frac{G_6 G_4}{G_4 + G_5 + G_6} = \frac{\frac{1}{7.5} \cdot \frac{1}{45}}{\frac{1}{45} + \frac{1}{15} + \frac{1}{7.5}} = \frac{1}{75} \text{ сим},$$

$$G_{45} = \frac{G_5 G_4}{G_4 + G_5 + G_6} = \frac{\frac{1}{15} \cdot \frac{1}{45}}{\frac{1}{45} + \frac{1}{15} + \frac{1}{7.5}} = \frac{1}{150} \text{ сим},$$

$$G_{56} = \frac{G_5 G_6}{G_4 + G_5 + G_6} = \frac{\frac{1}{15} \cdot \frac{1}{7.5}}{\frac{1}{45} + \frac{1}{15} + \frac{1}{7.5}} = \frac{1}{25} \text{ сим.}$$

Тогда сопротивления эквивалентного треугольника:

$$R_{64} = \frac{1}{G_{64}} = 75 \text{ } \Omega,$$

$$R_{45} = \frac{1}{G_{45}} = 150 \text{ } \Omega,$$

$$R_{56} = \frac{1}{G_{56}} = 25 \text{ } \Omega.$$

Ответ: $R_{12} = 45 \text{ } \Omega$, $R_{23} = 15 \text{ } \Omega$, $R_{31} = 7.5 \text{ } \Omega$,

$R_{64} = 75 \text{ } \Omega$, $R_{45} = 150 \text{ } \Omega$ и $R_{56} = 25 \text{ } \Omega$.

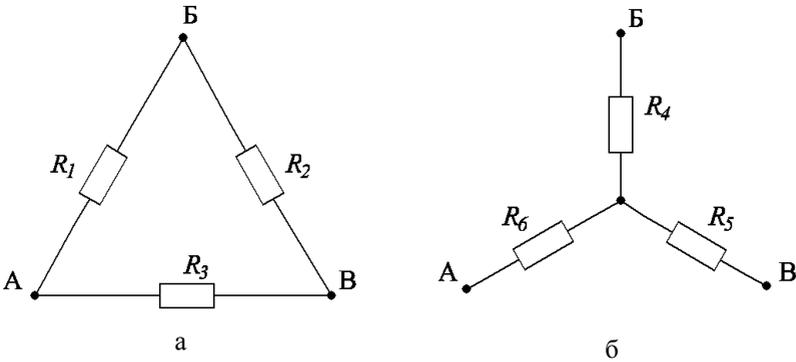


Рис. 27. Соединение резистивных элементов: а – треугольником, б – звездой

Таблица 2

Варианты для задачи №2

№ п/п	R_1, Ω	R_2, Ω	R_3, Ω	R_4, Ω	R_5, Ω	R_6, Ω
1	20	40	40	100	50	100
2	80	40	80	36	16	72
3	90	135	180	60	80	120
4	180	60	120	40	10	40
5	30	60	90	40	60	48
6	100	200	100	8	1,6	32
7	50	50	100	2	30	7,5
8	54	72	36	9	12	12
9	200	400	200	120	60	10
10	10	10	5	72	36	16
11	300	150	450	75	150	50
12	80	160	160	12	18	7,2
13	108	144	72	60	40	48
14	120	60	120	18	6	18
15	20	10	20	20	60	30
16	200	10	40	30	60	40
17	10	40	150	8	16	8
18	30	30	40	4	4	8
19	150	900	75	4	2	2
20	120	270	60	10	30	15
21	150	450	300	50	50	25
22	24	60	36	12,5	25	25
23	180	150	120	24	16	12
24	90	30	30	16	16	32
25	60	120	180	32	64	32
26	400	200	200	30	20	60
27	270	60	120	100	100	50
28	270	180	360	48	32	24
29	240	60	60	24	24	48
30	120	150	180	50	75	150

Задача №3

Выполните эквивалентирование цепи с нелинейным элементом методом сложения ВАХ. Определите указанные в задании ток и падение напряжения. Варианты задач для самостоятельного решения представлены в таблице 3, требуемые схемы цепей и ВАХ представлены в приложениях А и Б.

Пример решения задачи

Выполнить эквивалентирование цепи с нелинейным элементом методом сложения ВАХ. Определить ток I и напряжение U_{ab} в схеме, представленной на рисунке 28 а.

Дано: $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 10 \Omega$, $U_0 = 120 \text{ В}$. ВАХ $U(I)_1$ и $U(I)_2$ представлены на рисунках 29 и 30.

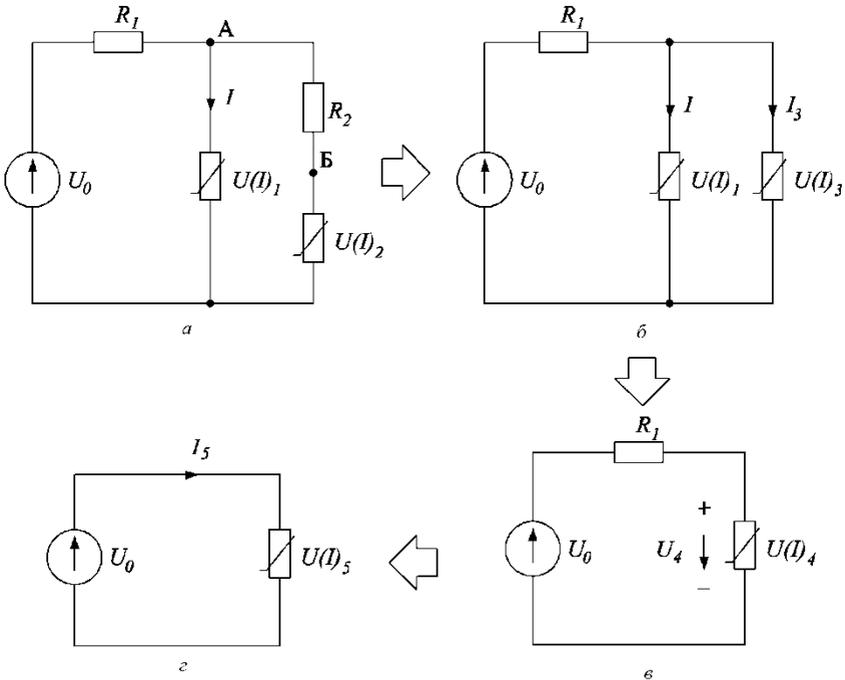


Рис. 28 Резистивная схема с нелинейным элементом

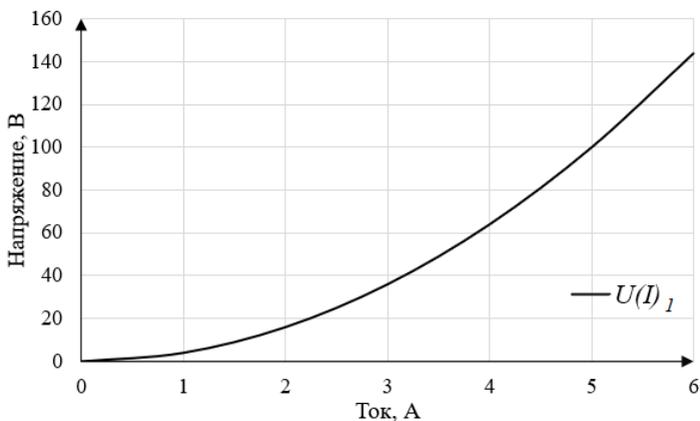


Рис. 29. Характеристика $U(I)_1$

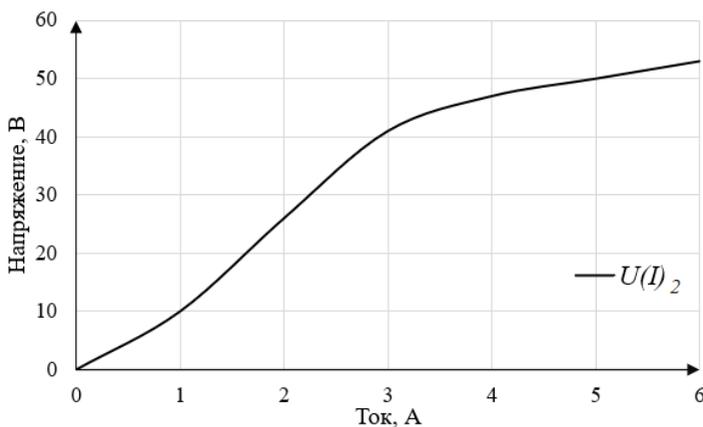


Рис. 30. Характеристика $U(I)_2$

Для решения задачи сначала выполним эквивалентное преобразование цепи к одному нелинейному элементу, затем поэтапно графически определим токи в ветвях и напряжения на участках схемы.

Сперва сложим последовательно ВАХ элементов $U(I)_2$ и R_2 , таким образом переходя к характеристике $U(I)_3$ и схеме, показанной на рисунке 28 б.

Процесс сложения характеристик показан на рисунке 31.

Элементы $U(I)_2$ и R_2 соединены последовательно, поэтому сложение ВАХ производится по напряжению при одинаковых величинах тока.

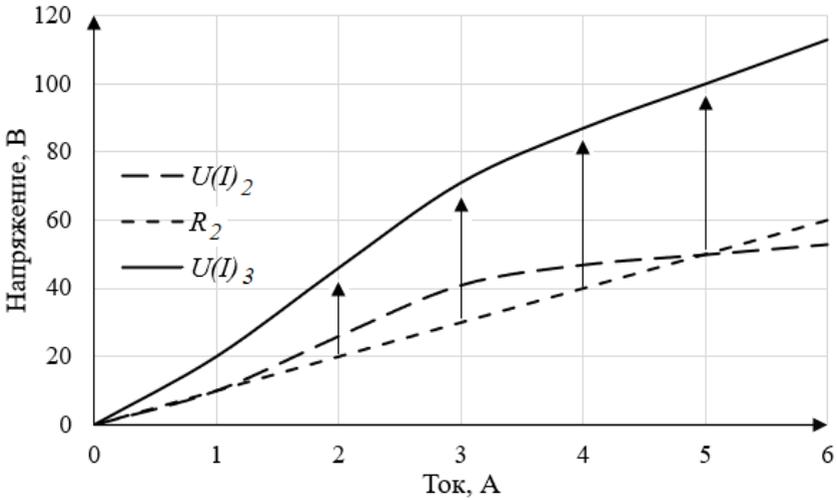


Рис. 31. Получение характеристики $U(I)_3$

Далее осуществим переход к состоянию схемы, показанному на рисунке 28 в. Для этого выполним сложение ВАХ элементов $U(I)_1$ и $U(I)_3$, соединенных параллельно. Процесс сложения характеристик продемонстрирован на рисунке 32. Элементы соединены параллельно, поэтому следует выполнять сложение токов элементов при одинаковых значениях напряжения. На рисунке 32 хорошо видно, что эквивалентная характеристика смещается вправо по оси токов. При одном и том же напряжении токи складываются и возрастают, поэтому можно сказать, что при параллельном соединении резистивных элементов, эквивалентное сопротивление увеличивается.

Теперь можно выполнить завершающий этап преобразования, путем сложения характеристик $U(I)_4$ и R_1 . Элементы соединены последовательно, поэтому и сложение следует производить по напряжению, при одинаковых значениях тока. Процесс сложения проиллюстрирован на рисунке 33.

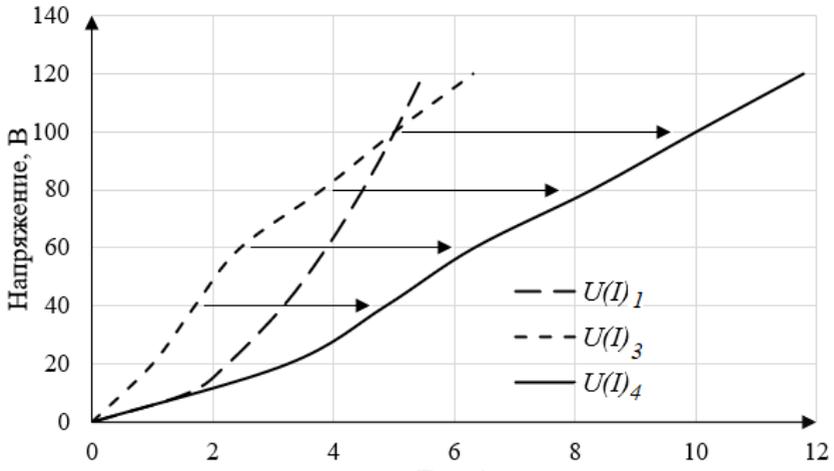


Рис. 32. Получение характеристики $U(I)_4$

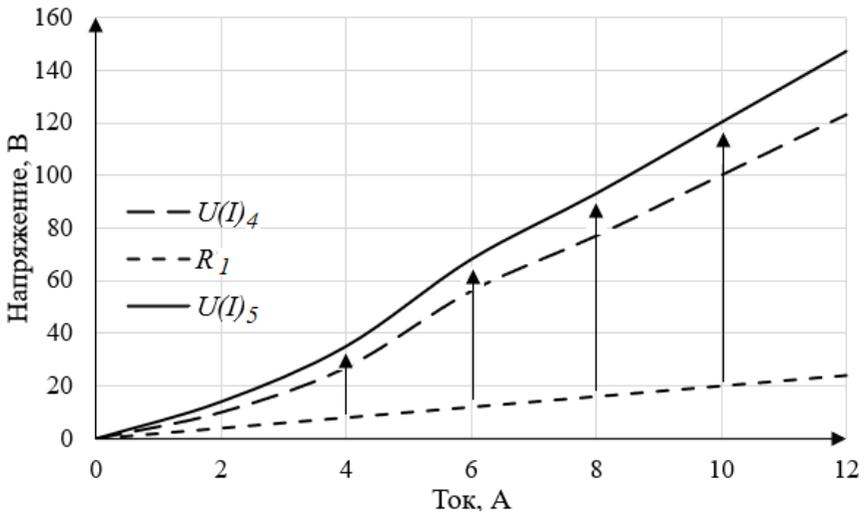


Рис. 33. Получение характеристики $U(I)_5$

Теперь можно определить величину тока I_5 , протекающего через источник питания U_0 . Для этого проведем горизонтальную линию на уровне 120 В (смотрите рисунок 34).

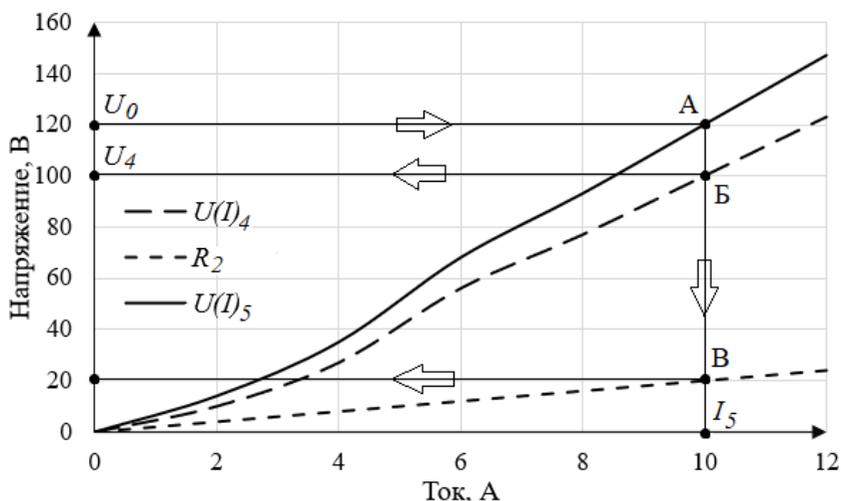


Рис. 34. Определение напряжения U_4

Точкой А обозначено пересечение характеристики $U(I)_5$ и горизонтали 120 В. Это рабочая точка, которая определяет ток источника. Если провести вертикальную линию вниз, можно определить, что ток источника равен 10 А. Таким образом, через источник напряжения 120 В протекает ток 10 А. То же самое справедливо и для эквивалентного резистивного элемента с ВАХ, обозначенной $U(I)_5$.

Вертикальная линия, проведенная на уровне 10 А также определяет режимы работы резистивных элементов $U(I)_4$ и R_1 . Действительно, если через сопротивление 2 Ω , протекает ток 10 А, то падение напряжения на нем равно 20 В, что соответствует точке В на рисунке 34. Буквой В на графике обозначена рабочая точка нелинейного резистивного элемента с ВАХ $U(I)_4$. В соответствии с графиком, падение напряжение U_4 на элементе составляет 100 В.

Зная это, определим ток I , протекающий в ветви с резистивным элементом, обозначенным $U(I)_1$. Последовательность действий, необходимых для этого, проиллюстрирована на рисунке 35.

Проведем вертикальную линию на уровне тока I_5 . Буквой А на рисунке 35 обозначена рабочая точка резистивного элемента

$U(I)_4$, которая соответствует точке Б на рисунке 34.

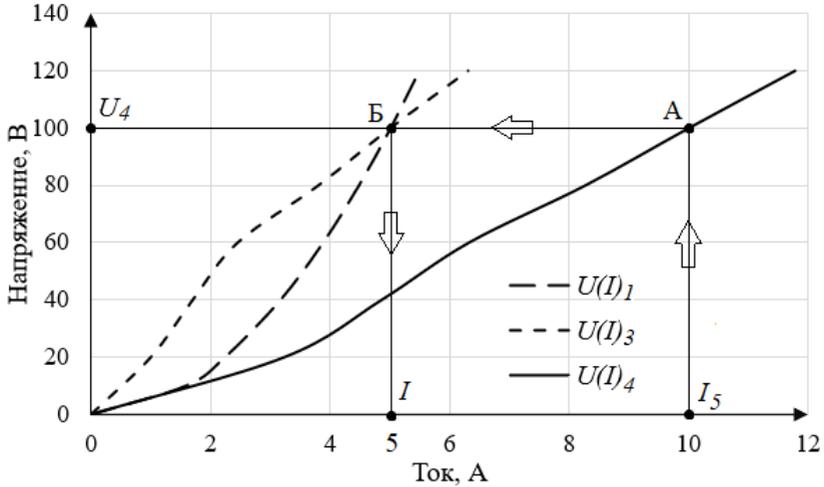


Рис. 35. Определение тока I

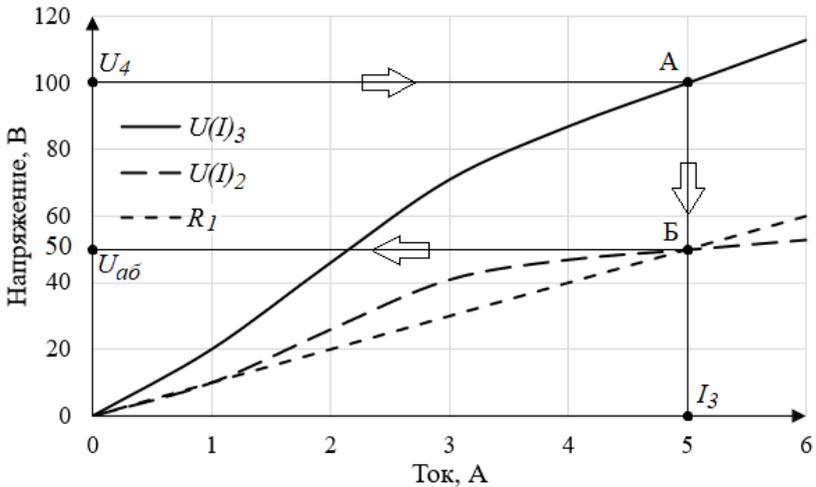


Рис. 36. Определение напряжения U_{aob}

На уровне 100 В также расположена точка Б, являющаяся рабочей точкой одновременно для элементов $U(I)_3$ и $U(I)_1$. Проведя от этой точки вниз вертикальную линию, можно определить ток I ,

протекающий через нелинейный резистивный элемент $U(I)_3$. Ток I равен 5 А.

На завершающем этапе определим напряжение на участке А-Б, отмеченном на рисунке 28 а. Для этого следует рассмотреть график с вольт-амперными характеристиками элементов R_1 и $U(I)_2$ и их эквивалентной вольт-амперной характеристикой $U(I)_3$. Последовательность действий по определению этого падения напряжения представлена на рисунке 3б.

Напряжение на резистивных элементах $U(I)_4$ и R_1 , соединенных последовательно, составляет 100 В (напряжение U_4). Рабочая точка А лежит на пересечении прямой, проведенной на этом уровне и эквивалентной ВАХ ветви. Если провести из этой точки линию вертикально вниз, можно определить, что ток I_3 в ветви составляет 5 А, а напряжение на обоих элементах равно 50 В (точка Б совпадает для характеристик $U(I)_4$ и R_1).

Ответ: $I = 5$ А, $U_{аб} = 50$ В.

Таблица 3

Варианты для задачи №3

№ п/п	Источник	Схема №	ВАХ №	R_1, Ω	R_2, Ω
1	$U_0 = 90 \text{ В}$	1	1	15	30
2	$U_0 = 60 \text{ В}$	1	2	1	27
3	$U_0 = 60 \text{ В}$	1	3	3	15
4	$U_0 = 100 \text{ В}$	1	4	4	15
5	$U_0 = 80 \text{ В}$	1	5	5	7
6	$I_0 = 8 \text{ А}$	2	1	23	2
7	$I_0 = 12 \text{ А}$	2	2	8	5
8	$I_0 = 9 \text{ А}$	2	3	11	10
9	$I_0 = 12 \text{ А}$	2	4	11	8
10	$I_0 = 11 \text{ А}$	2	5	9	25
11	$U_0 = 60 \text{ В}$	3	1	15	30
12	$U_0 = 90 \text{ В}$	3	2	18	18
13	$U_0 = 80 \text{ В}$	3	3	18	12
14	$U_0 = 100 \text{ В}$	3	4	20	10
15	$U_0 = 100 \text{ В}$	3	5	40	8
16	$I_0 = 5 \text{ А}$	4	1	5	10
17	$I_0 = 4 \text{ А}$	4	2	10	10
18	$I_0 = 7 \text{ А}$	4	3	15	7
19	$I_0 = 8 \text{ А}$	4	4	20	10
20	$I_0 = 11 \text{ А}$	4	5	10	2
21	$U_0 = 20 \text{ В}$	5	1	3	11
22	$U_0 = 40 \text{ В}$	5	2	5	12.5
23	$U_0 = 60 \text{ В}$	5	3	5	45
24	$U_0 = 55 \text{ В}$	5	4	10	15
25	$U_0 = 90 \text{ В}$	5	5	11	35
26	$I_0 = 5 \text{ А}$	6	1	14	15
27	$I_0 = 4 \text{ А}$	6	2	20	20
28	$I_0 = 10 \text{ А}$	6	3	6	5
29	$I_0 = 5 \text{ А}$	6	4	5	7.5
30	$I_0 = 10 \text{ А}$	6	5	1	8

Задача №4

Постройте зависимость от времени напряжения/тока на зажимах двухполюсника при подаче на вход нелинейного элемента: а – импульса напряжения/тока, б – периодически изменяющегося напряжения/тока. Варианты задачи для самостоятельного решения представлены в таблице 4. Для расчетов используйте ВАХ из приложения А и импульсы из приложения В.

Пример решения задачи

Дано: Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента представлена на рисунке 37, импульс тока представлен на рисунке 38. Периодический сигнал задан функцией $u = 60\sin(314t)$.

От встречавшихся ранее задач эта отличается тем, что напряжение или ток на входе цепи изменяются во времени. Графически этот процесс можно изобразить совокупностью рисунков 37, 38 и 39.

Начнем анализ с рисунка 38. Этот график показывает, как ток на входе цепи изменяется от времени. Ток нарастает сначала быстро (0 – 10 мс), потом медленнее (10 – 20 мс), и затем в течение 10 миллисекунд спадает до нуля (20 – 30 мс). В качестве примера рассмотрим решение задачи для моментов времени 5, 10 и 15 миллисекунд. Пользуясь графиком на рисунке 38, определим значения тока в эти моменты времени. В рассматриваемом случае это 1, 2 и 2.5 А соответственно.

Теперь перейдем к ВАХ нелинейного элемента (рисунок 37). С помощью ВАХ определим какие напряжения соответствуют току в 1, 2 и 2.5 А. Процесс определения этих значений в моменты времени 5, 10 и 15 мс проиллюстрирован на рисунке 37 тремя точками, отмеченными в начале графика. Видно, что значениям тока в 1, 2 и 2.5 А соответствуют величины напряжения в 2, 8 и 12.5 В. Т.е в моменты 5, 10 и 15 мс, напряжение на входных зажимах нелинейного резистивного элемента равно 2, 8 и 12.5 В, так как в эти моменты времени ток равен 1, 2 и 2.5 А соответственно. Соотнеся таким образом ряд значений напряжения с рядом значений тока, можно график, представленный на рисунке 39.

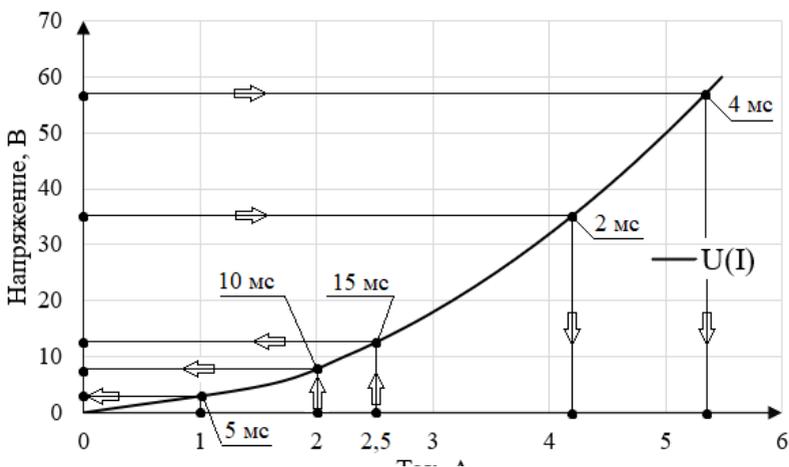


Рис. 37. Вольт-Амперная характеристика нелинейного элемента

Теперь найдем ток, протекающий через нелинейный резистивный элемент при подаче на него переменного синусоидального напряжения. От предыдущей ситуации отличается только тем, что воздействие в рассматриваемом случае длительное и периодическое.

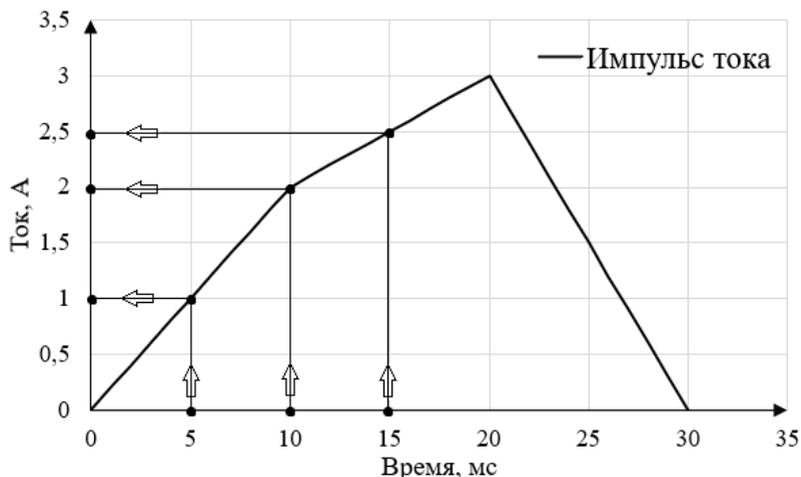


Рис. 38. Импульс тока нелинейного резистивного элемента

Периодичность процесса позволяет построить по точкам только некоторую часть периода колебания тока, значения тока в остальные моменты времени достроить по аналогии.

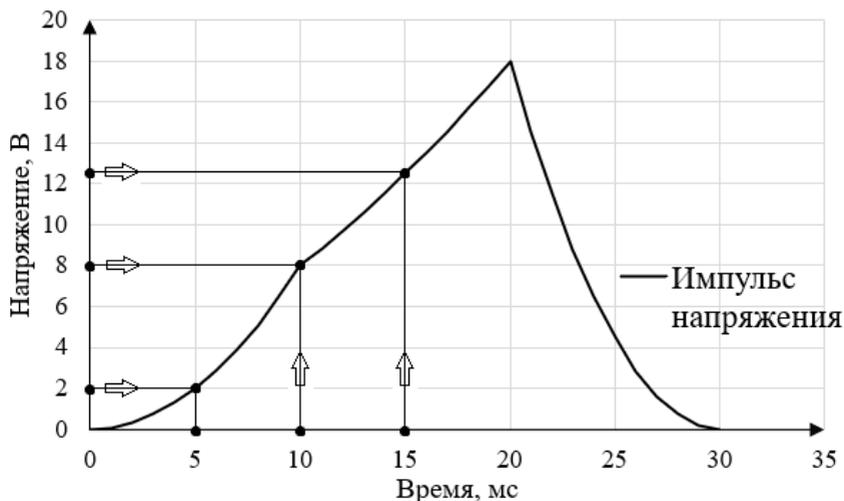


Рис. 39. Импульс напряжения нелинейного резистивного элемента

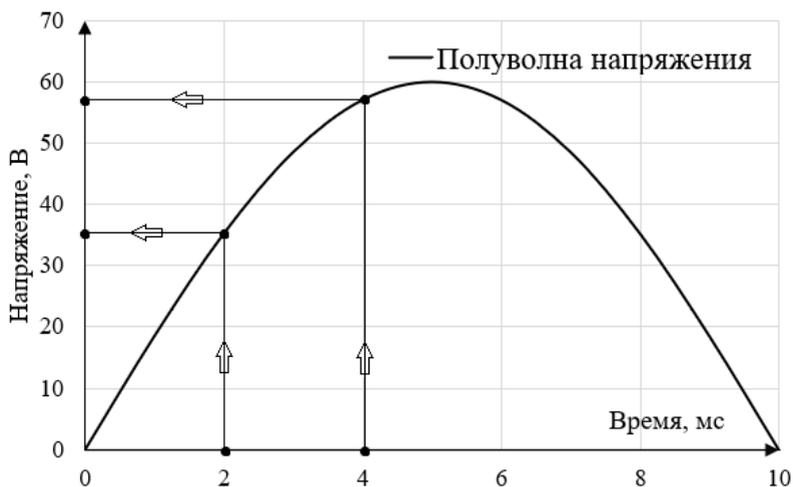


Рис. 40. Полуволна напряжения, подаваемого на нелинейный резистивный элемент

Так же как и в предыдущем случае выполним построение только для нескольких точек. На рисунке 40 показано пол периода напряжения, подаваемого на нелинейный резистивный элемент. По графику определим чему равно напряжение в моменты времени 2 и 4 мс.

Следует сказать, что двух точек недостаточно, чтобы выполнить требуемые построения. Ограниченное число точек взято только для примера, для нормального решения этой задачи требуется рассмотреть по крайней мере десятков таких точек.

На рисунке 40 видно, что в моменты времени 2 и 4 мс напряжение, подаваемое на нелинейный элемент равно 35 и 58 В соответственно. Зная это, перейдем к ВАХ на рисунке 37, чтобы определить ток в те же моменты времени.

На рисунке 37 эти соответствующие моментам 2 и 4 мс точки отмечены на восходящей ветви графика. Видно, что напряжениям 35 и 58 В соответствуют токи 4.2 и 5.4 А соответственно.

Зная это, можно отметить соответствующие точки на графике тока от времени, показанном на рисунке 41.

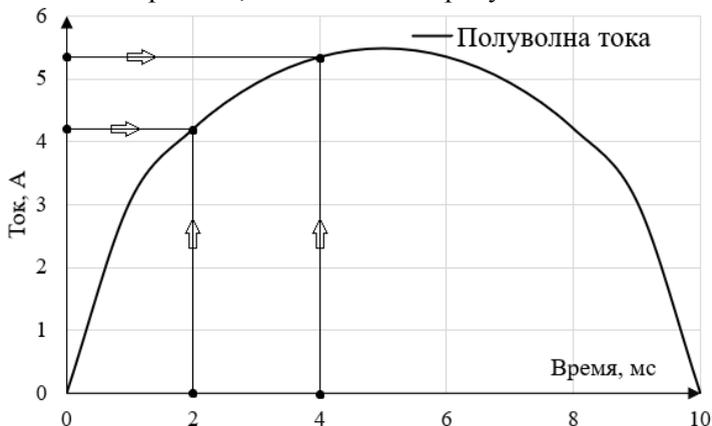


Рис. 41. Полуволна тока нелинейного резистивного тока

Построив таким образом четверть, или половину периода тока, можно распространить полученный результат на остальную часть периода и дальнейшие моменты времени. Получившаяся

зависимость показана на рисунке 42.

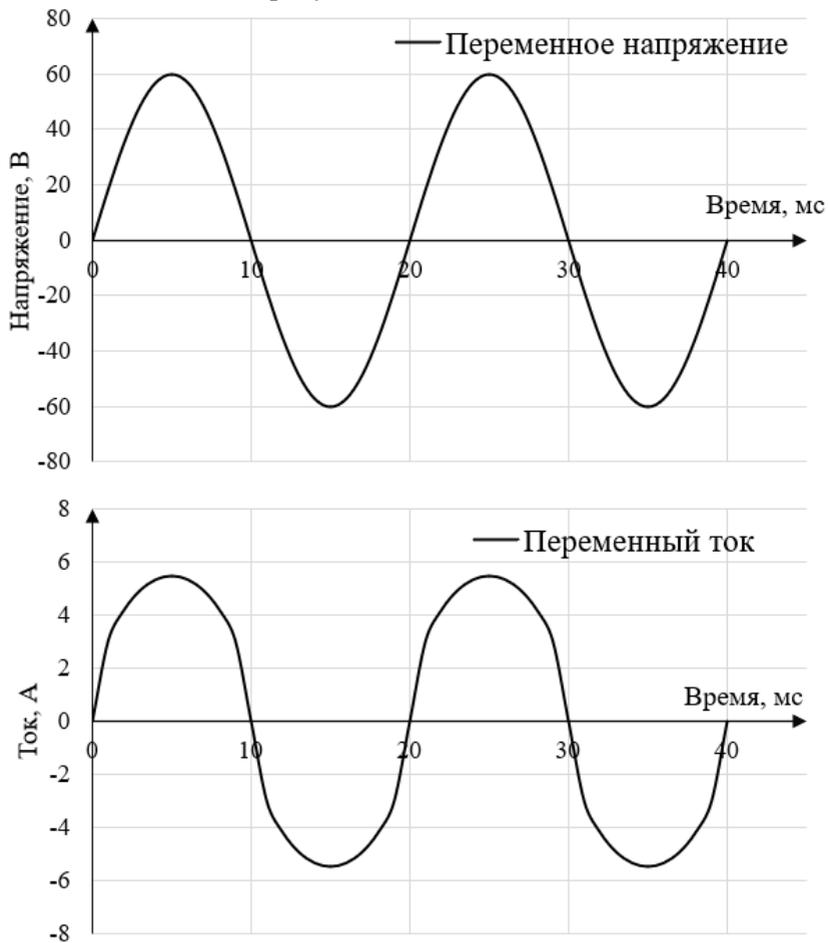


Рис. 42. Периодически изменяющееся напряжение и соответствующий ему ток нелинейного элемента

Таблица 4

Варианты для задачи №4

№ п/п	Амплитуда источника	Импульс №	ВАХ №	Определить
1	$u = 30\sin(314t)$	1	1	$i(t)$
2	$u = 40\sin(314t)$	3	2	$i(t)$
3	$i = 3\sin(314t)$	2	3	$u(t)$
4	$i = 3.5\sin(314t)$	4	4	$u(t)$
5	$u = 50\sin(314t)$	5	5	$i(t)$
6	$i = 4\sin(314t)$	6	1	$u(t)$
7	$u = 55\sin(314t)$	1	2	$i(t)$
8	$i = 4.5\sin(314t)$	2	3	$u(t)$
9	$u = 60\sin(314t)$	3	4	$i(t)$
10	$i = 5\sin(314t)$	4	5	$u(t)$
11	$u = 30\sin(157t + \pi/2)$	5	1	$i(t)$
12	$u = 40\sin(157t + \pi/2)$	1	2	$i(t)$
13	$i = 3\sin(157t + \pi/2)$	6	3	$u(t)$
14	$i = 3.5\sin(157t + \pi/2)$	2	4	$u(t)$
15	$u = 50\sin(157t + \pi/2)$	3	5	$i(t)$
16	$i = 4\sin(157t + \pi/2)$	4	1	$u(t)$
17	$u = 55\sin(157t + \pi/2)$	5	2	$i(t)$
18	$i = 4.5\sin(157t + \pi/2)$	6	3	$u(t)$
19	$u = 60\sin(157t + \pi/2)$	1	4	$i(t)$
20	$i = 5\sin(157t + \pi/2)$	2	5	$u(t)$
21	$u = 30\sin(628t - \pi/2)$	3	1	$i(t)$
22	$u = 40\sin(628t - \pi/2)$	5	2	$i(t)$
23	$i = 3\sin(628t - \pi/2)$	4	3	$u(t)$
24	$i = 3.5\sin(628t - \pi/2)$	6	4	$u(t)$
25	$u = 50\sin(628t - \pi/2)$	1	5	$i(t)$
26	$i = 4\sin(628t - \pi/2)$	2	1	$u(t)$
27	$u = 55\sin(628t - \pi/2)$	3	2	$i(t)$
28	$i = 4.5\sin(628t - \pi/2)$	4	3	$u(t)$
29	$u = 60\sin(628t - \pi/2)$	5	4	$i(t)$
30	$i = 5\sin(628t - \pi/2)$	6	5	$u(t)$

Задача № 5

Построить эквивалентную ВАХ заданной цепи относительно зажимов А и Б. Считать диод идеальным. ВАХ идеального диода представлена на рисунке 43. Данные задачи по вариантам для самостоятельного решения перечислены в таблице 5. Схемы представлены в приложении Г.

Пример решения задачи

Выполнить эквивалентирование цепи с нелинейными резистивными элементами, обладающими несимметричными вольт-амперными характеристиками.

Дано: $R_1 = 3 \text{ } \Omega$, $R_2 = 6 \text{ } \Omega$, $R_3 = 3 \text{ } \Omega$, заданная схема представлена на рисунке 44 а.

Обратите внимание на то, что при решении данной задачи оси напряжения и тока расположены не так как в предыдущих случаях. Это обусловлено тем, что в электронике принято располагать напряжения на оси абсцисс, а тока на оси ординат.

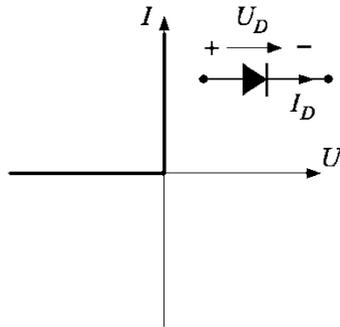


Рис. 43. Вольт-амперная характеристика идеального диода

Порядок эквивалентирования обозначен последовательностью схем а-г на рисунке 44. Первый шаг заключается в переходе к схеме, обозначенной на рисунке 44 б. Выполним сложение ВАХ последовательно соединенных резистивных элементов в ветвях, в которых протекают токи I_1 и I_2 . Сложение ВАХ линейного резистивного элемента R_2 и идеального диода проиллюстрировано рисунком 45.

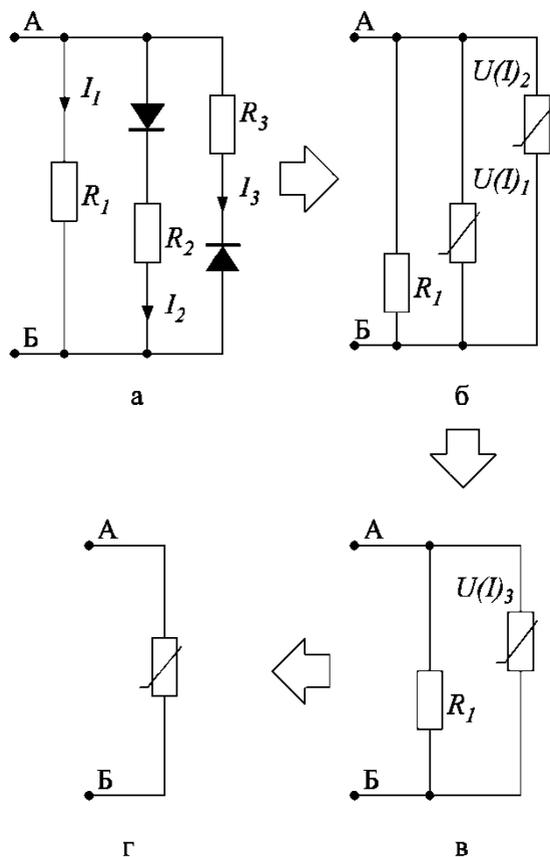


Рис. 44. Схема с идеальными диодами: а – исходная схема; б – первое преобразование; в – второе преобразование; г – финальное преобразование

Так как элементы соединены последовательно, сложение осуществляется по напряжению. Особенность решения этой задачи заключается в том, что сложение характеристик осуществляется в первом и в третьем квадранте, так как характеристика идеального диода нелинейна и результаты для различных квадрантов будут также различаться.

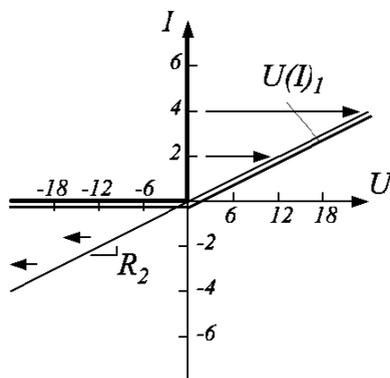


Рис. 45. Последовательное сложение ВАХ резистивного элемента и идеального диода

В первом квадранте падение напряжения на диоде всегда равно нулю, (аналогичная ВАХ получается при нулевом активном сопротивлении, например у *закоротки*). Действительно, в прямом направлении идеальный диод может пропустить ток любой величины, даже бесконечно большой, в то время как падение напряжения на нем останется нулевым, поэтому ток в ветви оказывается ограничен только линейным резистивным элементом R_2 . Это видно и на графике: при сложении эквивалентная ВАХ повторяет ВАХ линейного резистивного элемента.

В третьем квадранте, когда на диод подается обратное напряжение, ток через диод всегда равен нулю. На идеальном диоде может падать бесконечно большое обратное напряжение, а ток, в то же время останется нулевым. Аналогичная характеристика получается, когда рассматривается *разрыв* в электрической цепи. По этой причине отрицательная ветвь вольт-амперной характеристики устремлена в бесконечность. Активное сопротивление идеального диода в этом квадранте бесконечно велико, поэтому при сложении с любым конечным сопротивлением получается бесконечно большая величина. На рисунке эквивалентная ВАХ $U(I)_1$ обозначена дополнительной линией.

Далее выполним сложение ВАХ сопротивлений в ветви, по которой протекает ток I_2 (рисунок 46).

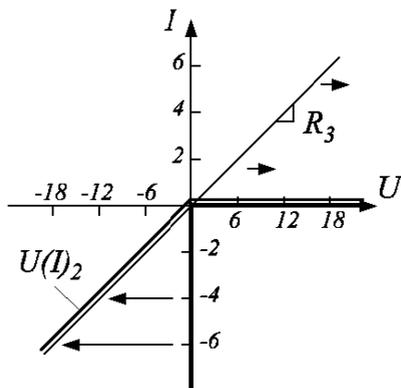


Рис. 46. Последовательное сложение ВАХ резистивного элемента и идеального диода

Проведем аналогичные преобразования, однако в этот раз диод установлен в направлении, противоположном протеканию тока, поэтому при сложении вольт-амперная характеристика отражена относительно нуля. Как и в предыдущем случае на рисунке 46 эквивалентная ВАХ $U(I)_2$ обозначена дополнительной линией.

Для перехода к эквивалентной схеме, показанной на рисунке 44 в, сложим характеристики элементов $U(I)_1$ и $U(I)_2$, соединенные параллельно. В этом случае сложение характеристик осуществляется по току. Оригинальные характеристики $U(I)_1$ и $U(I)_2$ отмечены дополнительными линиями, а результирующая линия $U(I)_3$ обведена.

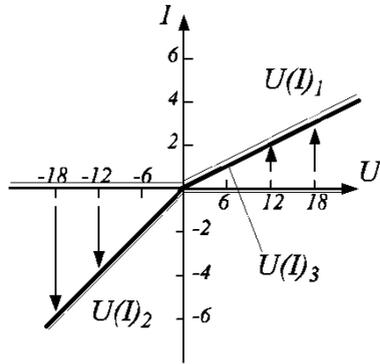


Рис. 47. Параллельное соединение двух элементов с нелинейной ВАХ

На завершительном этапе решения, чтобы перейти к виду схемы, изображенному на рисунке 44 г сложим ВАХ линейного и нелинейного сопротивлений, соединенных параллельно. ВАХ в этом случае складываются по току.

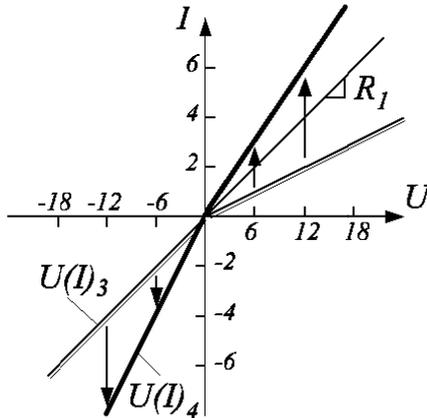


Рис. 48. Эквивалентная ВАХ заданной цепи относительно зажимов А и Б

Таблица 5

Варианты для задачи №5

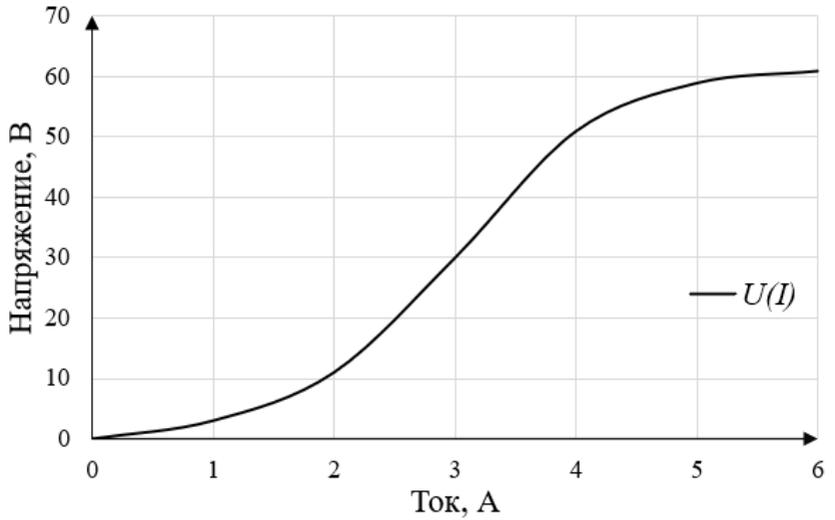
№ п/п	Схема №	R_1, Ω	R_2, Ω	R_3, Ω
1	1	40	30	60
2	2	4	5	6
3	3	12	24	12
4	4	5	5	10
5	5	20	10	10
6	6	2	8	10
7	1	20	80	80
8	2	4	2	4
9	3	30	30	15
10	4	10	20	30
11	5	20	10	10
12	6	10	30	40
13	1	40	60	120
14	2	20	30	30
15	3	300	600	200
16	4	50	50	100
17	5	120	60	60
18	6	50	25	150
19	1	10	20	20
20	2	40	10	50
21	3	150	300	100
22	4	2	2	4
23	5	40	20	20
24	6	10	5	30
25	1	2	6	6
26	2	50	100	150
27	3	100	100	50
28	4	100	100	200
29	5	60	30	30
30	6	200	400	300

Рекомендуемый библиографический список

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Гардарики, 2007. 451 с.
2. *Бычков Ю.А.* Сборник задач и практикум по основам теории электрических цепей / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышев // СПб: Питер, 2007. 300 с.
3. *Бычков Ю.А.* Основы теории электрических цепей / Ю.А. Бычков, В.М. Золотницкий, Э.П. Чернышев. СПб: Лань, 2004. 495 с.
4. *Демирчан К.С.* Теоретические основы электротехники / К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.К. Чечурин // СПб: Питер, 2009. 534 с.
5. *Матханов П.Н.* Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. М.: Высшая школа, 1990. 267 с.
6. *Шонин О.Б.* Теоретические основы электротехники. Временной анализ линейных электрических цепей. РИНЦ СПГГУ, 2005. 64с.
7. *Шонин О.Б.* Методы расчета электрических цепей. РИНЦ СПГГУ, 2015. 84с.

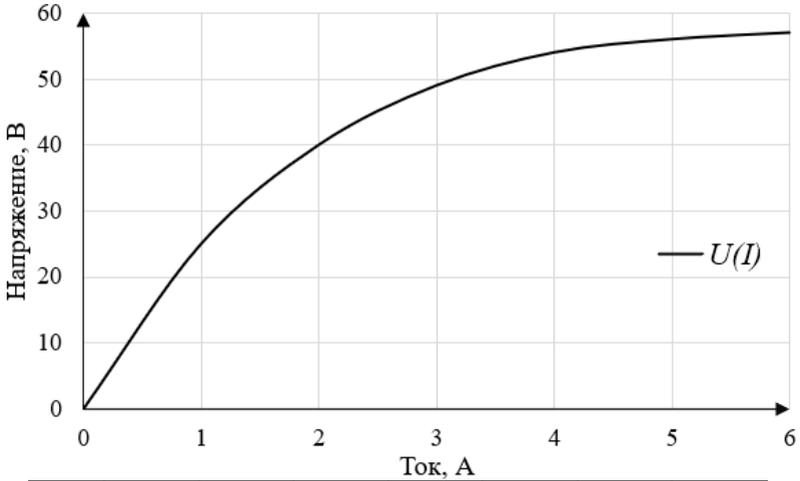
ПРИЛОЖЕНИЕ А
ВОЛЬТ АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ №3 И №4

ВАХ нелинейного элемента №1



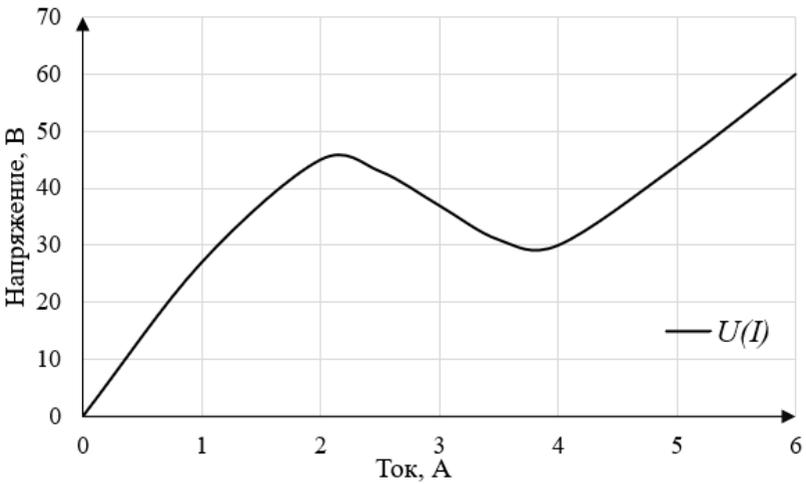
I	0	1	2	3	4	5	6
U	0	3	11	30	51	59	61

ВАХ нелинейного элемента №2



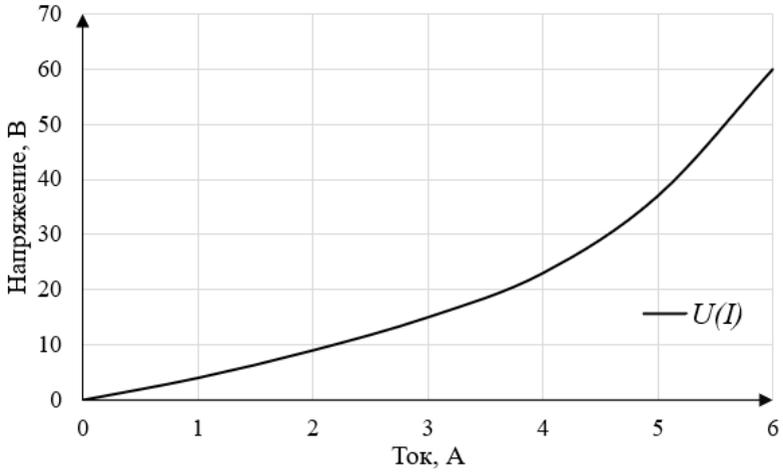
I	0	1	2	3	4	5	6
U	0	25	40	49	54	56	57

ВАХ нелинейного элемента №3



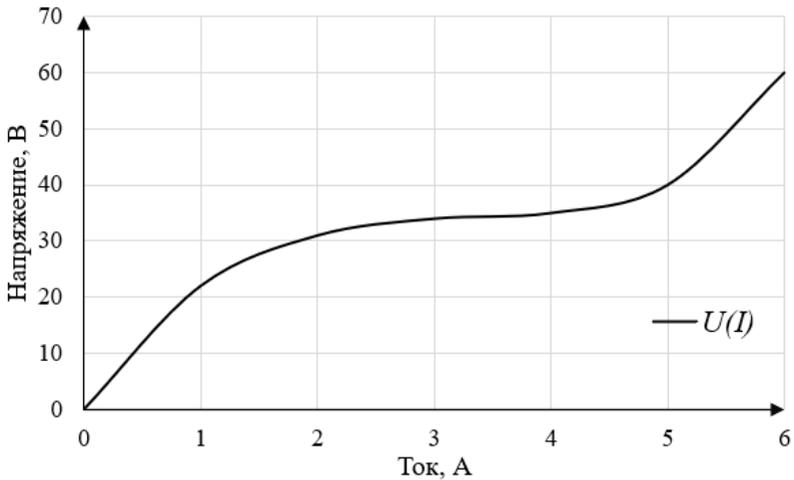
I	0	1	2	2,5	3	3,5	4	5	6
U	0	27	45	43	36	31	30	44	60

ВАХ нелинейного элемента №4



I	0	1	2	3	4	5	6
U	0	4	9	15	23	37	60

ВАХ нелинейного элемента №5



I	0	1	2	3	4	5	6
U	0	22	31	34	35	40	60

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
СХЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ № 3

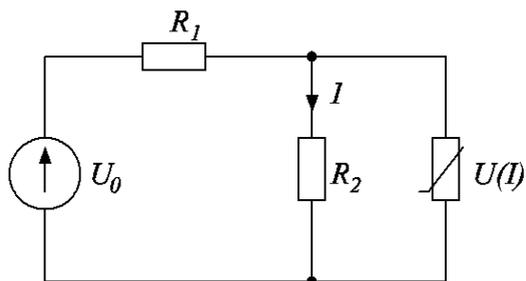


Схема №1

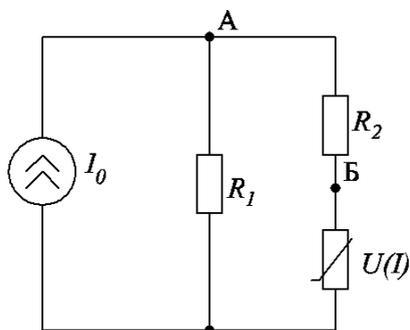


Схема №2

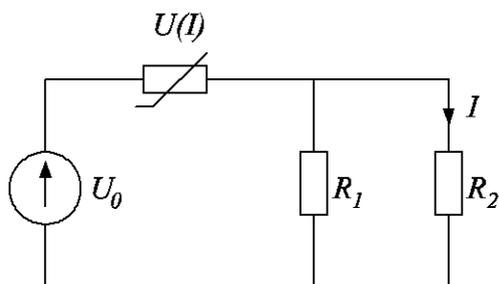
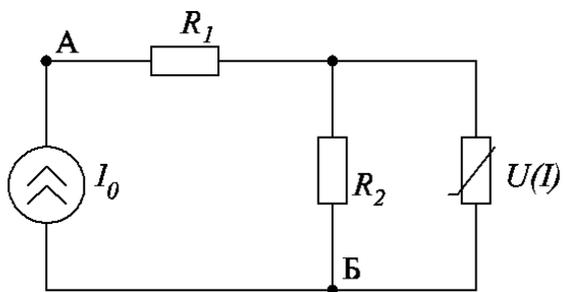
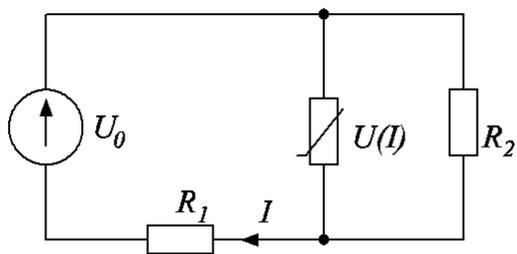
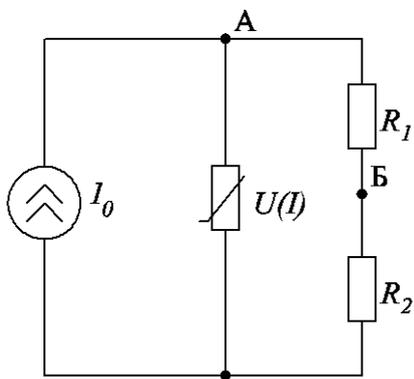
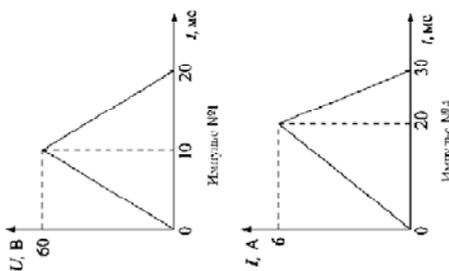
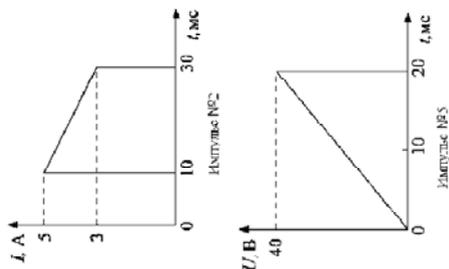
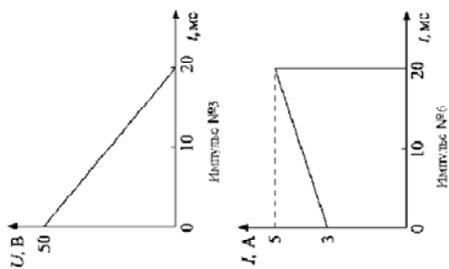


Схема №3



ПРИЛОЖЕНИЕ В ФОРМЫ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ЗАДАЧИ № 4



ПРИЛОЖЕНИЕ Г
СХЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧИ № 5

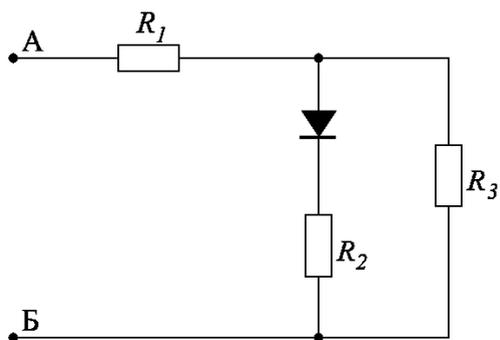


Схема №1

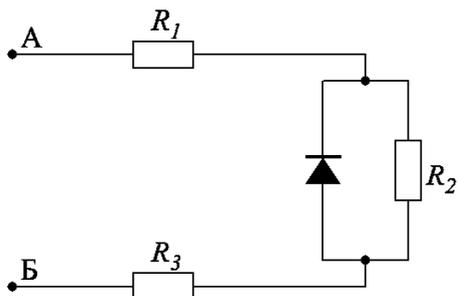


Схема №2

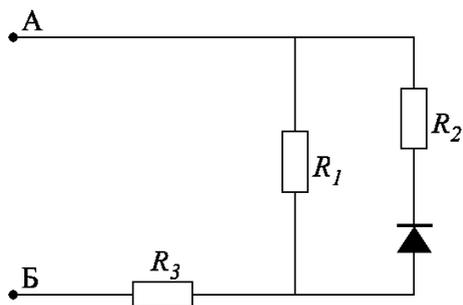


Схема №3

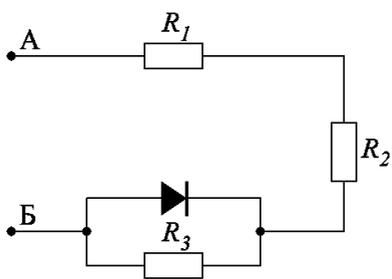


Схема №4

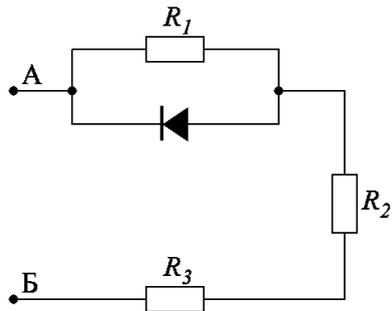


Схема №5

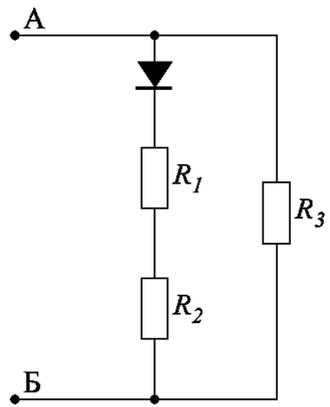


Схема №6

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**РЕЗИСТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ**

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.02*

Сост.: *Я.Э. Шклярский, А.И. Барданов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
общей электротехники

Ответственный за выпуск *Я.Э. Шклярский*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 25.01.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 4,0. Усл.кр.-отт. 4,0. Уч.-изд.л. 3,6. Тираж 75 экз. Заказ 43.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2