Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Чайковский филиал

федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

(ЧФ ПНИПУ)

Кафедра автоматизации, информационных и инженерных технологий

МП12.8-2021

**Методические предписания**

по выполнению контрольной работы по дисциплине

«**Теоретические основы электротехники**» (4 семестр)

для студентов заочной формы обучения

по направлениям подготовки: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,

15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Чайковский, 2021

Методические предписания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники»(4 семестр) **/** Сост. М.А.Шергина. – Чайковский: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. – 32с.

Методические предписания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники» (4 семестр) предназначены для студентов заочной формы обучения, для направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Методические предписания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники» (4 семестр) включают в себя рекомендации по оформлению, краткие теоретические материалы, примеры расчета задач.

Рецензент: канд. техн.наук, доцент кафедры АИИТ Ковязин В.А.

Методические предписания по выполнению контрольной работыпо дисциплине «Теоретические основы электротехники»(4 семестр)рассмотрены и одобрены на заседании кафедры автоматизации, информационных и инженерных технологий 28.10.19 г., протокол № 9.

Методические предписания по выполнению контрольной работыпо дисциплине «Теоретические основы электротехники»(4 семестр) рекомендованы методической комиссией ЧФ ПНИПУ для использования в учебном процессе (протокол № 3 от 28.11.2019 г.)

**Содержание**

Предисловие………………………………………………………………………………...4

1. Методические предписания по выполнению задачи № 1 …………………………...5

«Определение параметров четырехполюсника».

2. Методические предписания по выполнению задачи № 2 ………………………..…14

«Расчет переходного процесса в цепи второго порядка».

3. Методические предписания по выполнению задачи № 3 ……………….….………22

«Расчет нелинейной цепи постоянного тока»

4. Список рекомендуемых источников…………………………………………….…….32

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с учебным планом направлений подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль: Электроснабжение), 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, (профиль: Автоматизация технологических процессов и производств в машиностроении и энергетике), дисциплина «Теоретические основы электротехники» изучается студентами в 3-ем и 4-ом семестрах.

Настоящие методические предписания составлены для выполнения контрольной работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники» в 4 семестре.

Контрольная работа 4 семестра состоит из 3 задач, по трем разным темам. Задание для задач выдается либо преподавателем, либо находятся в сборнике «Методические указания и контрольные задания для студентов технических специальностей вузов» (Л.А.Бессонов, И.Г.Демидова, М.Е.Заруди и др.– 2-е изд., перераб.–М.: Высш.шк., 2001 – 159 с.). Если на установочной сессии преподаватель не выдал номер варианта задания в сборнике, то для студентов группы ЭС вариант определяется по последним двум цифрам номера зачетной книжки; для студентов группы АТПП вариант определяется как сумма 20+ две последние цифры номера зачетной книжки.

***При решении и оформлении контрольной работы необходимо руководствоваться следующими правилами:***

1. Определить какие физические законы необходимо применять при решении задачи. Указать метод расчета.

2. Тщательно продумать, какие буквенные и цифровые обозначения удобнее использовать в решении задачи. При необходимости пояснить значение отдельного обозначения. Следить за соответствием обозначений на схемах с обозначениями в решении задачи.

3. В ходе решения задачи не следует изменять однажды принятые направления токов и наименования узлов, сопротивлений, а также обозначения, заданные условием. При решении одной и той же задачи различными методами одну и ту же величину надлежит обозначать одним и тем же символом.

4. Расчет каждой определяемой величины следует выполнить сначала в общем виде, затем в полученную формулу подставить числовые значения и записать ответ. В окончательном результате указать единицы измерения. Следить за тем, чтобы промежуточные вычисления (типа перевода комплексных чисел из одного вида в другой) не прерывали расчет определяемой величины. При необходимости указанные промежуточные вычисления привести в конце всей задачи.

5. Все схемы и графики должны быть выполнены аккуратно и в масштабе, удобном для чтения.

6. Если точность вычисления не указана, то вычисления должны быть сделаны с точностью до третьей значащей цифры.

7. В тетради следует оставлять поля шириной не менее 4 см для замечаний преподавателя.

8. Контрольные задания должны быть датированы и подписаны студентом.

9. Незачтенная контрольная работа должна быть выполнена заново и представлена на повторную проверку вместе с первоначальной работой и замечаниями преподавателя. Исправления ошибок в ранее проверенном тексте не допускаются. Если неправильно выполнена только часть работы, то исправленный и переработанный текст, следует записать в тетради под заголовком «Исправление ошибок».

**1. Методические предписания по выполнению задачи №1**

**«Определение параметров четырехполюсника».**

**Основные положения теории.**

При анализе электрических цепей в задачах исследования взаимосвязи между переменными (I, U, S и т.д.) двух каких-то ветвей схемы широко используется теория четырехполюсников.

**Четырехполюсник (ЧП)** – часть схемы произвольной конфигурации, имеющая две пары зажимов (отсюда и произошло его название), обычно называемые входными и выходными.

ЧП является передаточным звеном между источником питания и нагрузкой. Примерами ЧП являются трансформатор, усилитель, другие электротехнические устройства, у которых можно выделить 2 пары полюсов.

В общем случае ЧП можно разделить на **активные (А)**, в структуру которых входят источники энергии, и **пассивные (П),** ветви которых не содержат источников энергии.

В предлагаемом курсе ТОЭ рассматриваются пассивные ЧП.

I2

I1

U1

П

m

n

p

q

U2

m и n – входные полюса

I1 и U1 – входные параметры

p и q – выходные полюса

I2 и U2 – выходные параметры

П

Предполагается, что напряжения и токи на входе и выходе могут изменяться, но схема внутренних соединений ЧП и значения сопротивлений в ней остаются неизменными.

Выведем зависимость между четырьмя величинами: I1, U1, I2, U2.

К зажимам m – n подключим источник ЭДС , а к зажимам p – q нагрузку с сопротивлением Z2, при этом напряжение на нагрузке .

p

İ2

İ1

Ú 1

П

m

n

q

Ù2

Ė1

Z2

Согласно теореме компенсации нагрузку можно заменить на Ė2, направленную встречно току İ2 и численно равную Ú2.

p

İ2

İ1

Ú 1

П

m

n

q

Ù2

Ė1

Ė2

Используя метод наложения, определим токи İ1 и İ2:

, где - ток в 1 ветви от действия Ė1,



- ток в 1 ветви от действия Ė2

, где - ток в 2 ветви от действия Ė1,



- ток в 2 ветви от действия Ė2

, где

Y11 и Y22 – собственные проводимости 1 и 2 ветви соответственно.

Y12 = Y21 – взаимная проводимость1 и 2 ветви (коэффициент пропорциональности между I1 и E2 ;I2 и E1.

Выразим E1 из второго уравнения:





Обозначим







заменим E на U:



* основные уравнения ЧП.

Значения коэффициентовA, B, C, D зависят от схемы внутренних соединений ЧП, от значений сопротивлений схемы и от частоты.

Коэффициенты связаны соотношением:



Коэффициенты A и D безразмерны; B - [Ом]; С - [См] сименс.

**Определим связь между Ú1, İ1, Ú2 и İ2,**

Если теперь источник ЭДС присоединить к зажимам (p – q), они теперь будут первичными, соответственно и параметры будут первичными; а нагрузку к (m – n), они будут вторичными.

ЧП остался без изменений, поэтому проводимости Y11 и Y22 остаются на своих местах.

ZH

Ė2

I1

I2

q

p

n

m

П

Ė1

Y11

Y22

Заменим ZH на Ė2, направленную встречно току I2 и запишем выражения для токов I1 и I2.



Выразим Ė1 из первого уравнения; подставим во второе:



Подставив вместо проводимостей коэффициенты A, B, C, D, получим:



Четырехполюсник называют ***симметричным*,** если при перемене местами источника питания и нагрузки, токи в источнике питания и нагрузке не изменяются.

A = D

В симметричном ЧП

# Определение коэффициентов ЧП

При практическом использовании уравнений ЧП для анализа цепей необходимо знать значения его коэффициентов, которые могут быть определены экспериментальным или расчетным путями. При этом достаточно знать три любых коэффициента, четвертый определяется из соотношения:

**AD – BC = 1.**

Один из наиболее удобных экспериментальных методов определения коэффициентов ЧП основан на опытах Х.Х. и КЗ.

Определим комплекс входного сопротивления ЧП в трех режимах работы:

1. Со стороны m – n при коротком замыкании p – q: т.е Ù2=0.

Z1K = ?





1. Со стороны m – n при разомкнутой ветви p – q (режим Х.Х.)=> I2=0



1. При питании со стороны p – q, ветвь m – n - короткозамкнута, т.е. U2=0







Таким образом, для определения четырех неизвестных коэффициентов имеем четыре уравнения:





зная А, можно определить все

остальные коэффициенты.

При определении коэффициентов ЧП расчетным путем должны быть известны схема соединения и значения сопротивлений ЧП.

**Схемы замещения пассивного ЧП.**

Как было отмечено ранее, пассивный ЧП характеризуется тремя независимыми постоянными коэффициентами. Следовательно, пассивный ЧП можно представить в виде 3-х элементной эквивалентной *Т- или П-образной схемы замещения*.

Три сопротивления Т- и П- схем замещения должны быть рассчитаны с учетом того, что схема замещения должна обладать такими же коэффициентами A, B, C, D, что и заменяемый ею ЧП.

Определим через известные параметры A, B, C, D, сопротивления ***Т-схемы замещения***:

U1

I3

I2

I1

z2

z1

m

n

p

q

U2

z3

Выразим U1 и I1 в начале Т-схемы

через U2 и I2.

«подгоним» под основные

уравнения ЧП.

Используем законы Кирхгофа и Ома.







Данная задача может быть решена и другим путем:

При İ2 = 0 (х.х. со стороны p – q), в соответствии с основными уравнениями ЧП:

, получим

U1X = AU2

I1X = CU2, но из схемы видно, что



При U2 = 0 (КЗ на зажимах p – q)

U1K = BI2

I1K = DI2, из схемы видно, что



Таким образом, получены те же результаты.

Аналогично, для ***П-схемы замещения***

U1

z5

z4

I4

I2

I1

m

n

p

q

I5

I6

z6

U2

q

p

m

П

n



**Характеристические параметры ЧП.**

В электросвязи широко используется режим работы симметричного ЧП, при котором его входное сопротивление равно нагрузочному, т.е.



Это сопротивление обозначают как ZC и называют *характеристическим сопротивлением* симметричного четырехполюсника, а режим работы ЧП, для которого справедливо:

ZH = ZC = ZBX,

называется *режимом согласованной нагрузки*.

При согласованном режиме для симметричного четырехполюсника (А=D) на основании основных уравнений ЧП, можно записать:

, если , то



,

с другой стороны, отношение тоже будет равно zC, поэтому:



zC(CzC + A) = AzC + B

zC2C + zCA – AzC = B





Определим связь между U1 и U2, а также между токами на входе I1 и выходе ЧП I2 у симметрично согласованно нагруженного ЧП (A = D).



т.к. U2 = I2zC, то



Коэффициент связи между напряжениями Ù1 и Ù2, а также токамиİ1 и İ2 полагают равным числу еГ, где Г – постоянная (мера) передачи – это еще один характеристический параметр.



аналогично для тока:



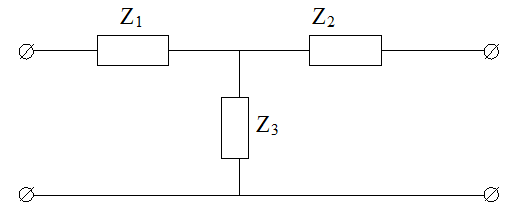
Величина ***а*** называется коэффициентом затухания, показывает, на сколько изменяется по модулю при переходе через ЧП напряжение или ток.

Величина ***b*** называется коэффициентом фазы и показывает, на сколько изменяется фаза напряжения или тока.

Для несимметричного ЧП: 

***Пример выполнения задачи №1***

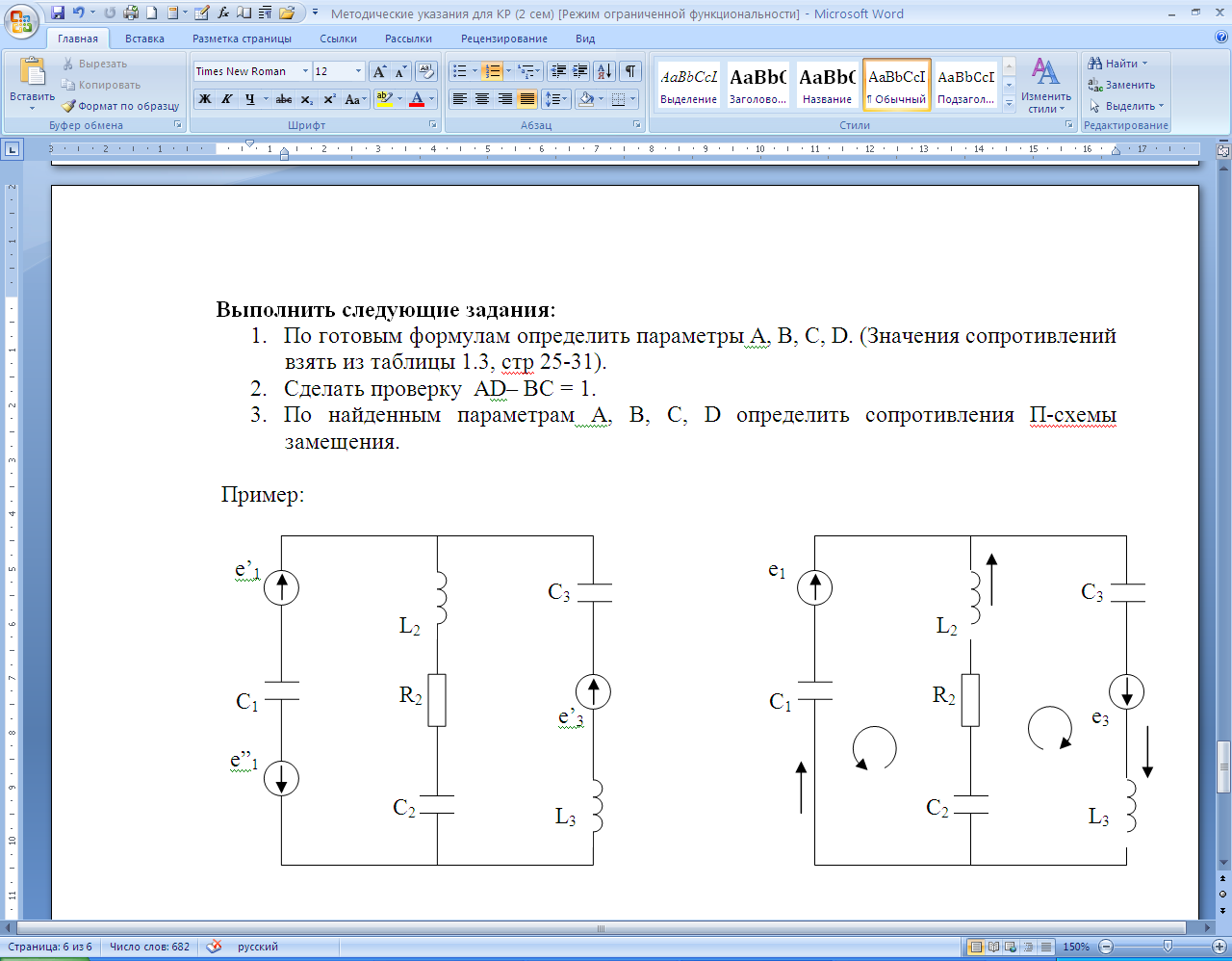
Схему задачи 1.2 (стр. 20 «Методические указания и контрольные задания для студентов технических специальностей вузов» (Л.А.Бессонов, И.Г.Демидова, М.Е.Заруди и др.– 2-е изд., перераб.–М.: Высш.шк., 2001 – 159 с.), своего варианта, представить как Т-схему замещения пассивного четырехполюсника. С этой целью все источники ЭДС в схеме закоротить, а левую (первую) и правую (третью) ветви разомкнуть. Разомкнутые зажимы левой ветви считать входными, правой – выходными. Сопротивления левой ветви обозначить Z1, правой – Z2, средней – Z3.



**Выполнить следующие задания:**

1. По готовым формулам определить параметры А, B, C, D. (Значения сопротивлений взять из таблицы 1.3, стр. 25-31).
2. Сделать проверку АD– BC = 1.
3. По найденным параметрам А, B, C, D определить сопротивления П-схемы замещения.

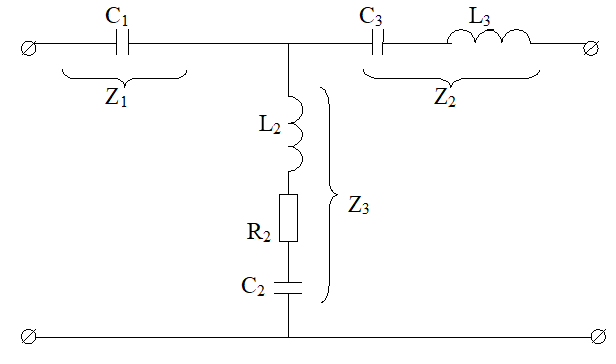
**З**адана схема:



*L2*=4,98\*10-3 [Гн]; ; ; ; ;

*R2*=25 [Ом]; f=800 [Гц];

Получаем Т-схему четырехполюсника:



; ; ; ; ; R2=25 [Ом].

Z1=199eј-90=–ј199

Z2= ј251–ј497 = –ј246 = 246e-ј90

Z3= 25 +ј25–ј25 = 25

**Решение**:

1. *Для определения параметров используем формулы:*

A=1+ Z1/Z3=1+(199eј-90)/25=1+7,96 eј-90=1–ј7,96=8,0226 eј-82,84

B=Z1+Z2+(Z1\*Z2)/Z3=–ј199–ј246+(199eј-90\*246e-ј90)/25=–1958,16– ј445

C=1/Z3=1/25=0,04

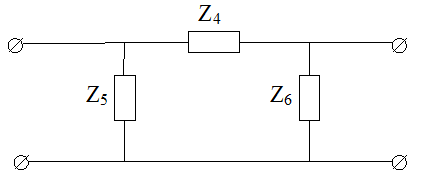
D=1+ Z2/Z3=1+246e-ј90/25=1+9,84 e-ј90=1– ј9,84

1. *Проводим проверку: АD – BC = 1*

(1–ј7,96)\*(1– ј9,84) – (–1958,16– ј445)\*0,04= (1– ј9,84– ј7,96–78,33) – (–78,33– ј17,8)= 1– ј17,8–

–78,33+78,33+ ј17,8 = 1.

1. *Для определения сопротивлений П-схемы замещения используем формулы*:



Z4=B =–1958,16– ј445 = 2008,09 e-ј167,2 (Ом)

Z5=B/(D–1)= 2008,09 e-ј167,2 / (1– ј9,84 – 1) = 2008,09 e-ј167,2 /9,84 e-ј90 = 204,1e-ј77,2 (Ом)

Z6=B/(A–1)= 2008,09 e-ј167,2 / (1– ј7,96 – 1) = 2008,09 e-ј167,2 /7,96 e-ј90 = 252,3e-ј77,2 (Ом)

**2. Методические предписания по выполнению задачи №2**

**«Расчет переходного процесса в цепи второго порядка».**

**Основные положения теории.**

**Переходной процесс** – процесс перехода от одного установившегося режима к другому.

При **установившихся режимах** токи и напряжения в цепи могут существовать неограниченно долго, не изменяя своего характера.

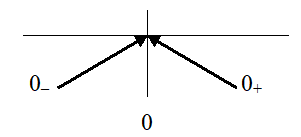
Любое скачкообразное изменение в цепи, приводящее к нарушению установившегося режима (подключение или отключение отдельных ветвей схемы, изменение параметров пассивных элементов или параметров источника энергии), называют **коммутацией**. Будем считать, что коммутация происходит мгновенно.

Физически переходные процессы представляют собой процессы перехода от одного энергетического состояния, соответствующего докоммутационному режиму, к энергетическому состоянию, соответствующему послекоммутационному режиму.

Длительность переходных процессов – часто десятые, сотые, а иногда даже миллиардные доли секунды, тем не менее изучение переходных процессов позволяет выявить возможные превышения напряжения на отдельных участках цепи, которые могут оказаться опасными для изоляции установки, а также выяснить возможные увеличения амплитуд токов, которые могут в десятки раз превышать амплитуду тока в установившемся периодическом процессе.

Анализ переходных процессов основывается на решении дифференциального уравнения, составленного относительно искомой функции для исследуемой схемы после произведенной в ней коммутации. Решение полученного дифференциального уравнения будет единственным, если оно удовлетворяет начальным условиям задачи. Число необходимых начальных условий соответствует порядку дифференциального уравнения.

Различают докоммутационные (независимые) начальные условия – значения токов и напряжений в последний момент перед коммутацией (при t=0–), и послекоммутационные (зависимые) начальные условия - значения токов и напряжений в первый момент после коммутации (при t=0+).



Если к началу переходного процесса непосредственно перед коммутацией все токи и все напряжения на пассивных элементах схемы равны нулю, то в схеме имеют место **нулевые начальные условия**. Если же к началу переходного процесса токи и напряжения в схеме не равны нулю, то в схеме имеют место **ненулевые начальные условия**. При нулевых начальных условиях токи в индуктивностях и напряжения на емкостях начнут изменяться с нуля, при ненулевых условиях – с тех значений, которые они имели непосредственно до коммутации.

Законы (правила) коммутации отражают принцип, что магнитная и электрическая энергия могут изменяться только плавно, без скачков. Различают два закона (правила) коммутации: один относится к индуктивности L, а другой к емкости С.

I закон:

***Ток через индуктивность непосредственно до коммутации равен току через ту же индуктивность непосредственно после коммутации:***

***iL(0–) = iL(0+)***

II закон:

***Напряжение на емкости в последний момент до коммутации равно напряжению на той же емкости в первый момент после коммутации:***

***uC(0–) = uC(0+)***

**Расчет классическим методом переходных процессов**

**в цепях второго порядка**

**с источником постоянного воздействия*.***

Классический метод расчета переходных процессов в любой сколь угодно сложной линейной электрической цепи заключается в составлении дифференциального уравнения цепи относительно искомой переменной.

Решением неоднородного дифференциального уравнения является сумма частного решения неоднородного уравнения и общего решения соответствующего однородного уравнения.

В качестве частного решения неоднородного уравнения принимают установившийся режим после коммутации: **iLуст, uCуст,** отчего токи и напряжения в этом режиме называют установившимися или принужденными. В качестве общего решения соответствующего однородного уравнения принимают токи и напряжения в отсутствии в исследуемой схеме источников энергии, поэтому ток и напряжение этого режима называют свободными: **iLсв, uCсв.** Свободный ток возникает вследствие того, что при любом внезапном изменении режима имеющиеся запасы энергии в полях цепи от предыдущего установившегося режима не соответствуют запасам энергии в полях, которые должны были бы быть в новом установившемся режиме.

**iL = iLуст + iLсв,**

**uC = uCуст +uCсв**

**Алгоритм расчета переходных процессов классическим методом**

1. В послекоммутационной схеме известными методами находят установившиеся (принужденные) составляющие искомых токов и напряжений.

2. Составляют характеристическое уравнение и определяют его корни. Исходя из характера корней, записывают выражение для искомых свободных составляющих токов и напряжений через постоянные интегрирования:

2.1. Если корни характеристического уравнения (третьего порядка) отрицательные, действительные и неравные, т.е. р1 = -а, р2 = -b, р3 = -c, то вид свободной составляющей будет следующий:

iСВ = А1е -аt + А2е -bt + А3е -ct

2.2. Если корни характеристического уравнения отрицательные, действительные и равные, т.е. р1 = р2 = р3 = -d, то вид свободной составляющей (для уравнения третьего порядка) будет следующий

iСВ = (А1+ А2t+ А3t2) е -dt

2.3. Если один корень характеристического уравнения отрицательный, действительный, а два корня комплексные сопряженные (действительные части всегда отрицательные), т.е.р1 = р2 = -b ± jω, р3 = -d, то вид свободной составляющей (для уравнения третьего порядка) будет следующий

iСВ = А1е -dt + (А2соs ωt + А3 sinе ωt ) е -bt

3. Рассчитывают токи до коммутации в индуктивных и напряжения в емкостных элементах, в соответствии с которыми по законам коммутации определяют независимые начальные условия: **iL(0–) = iL(0+); uC(0–) = uC(0+).**

4. Зависимые начальные условия находят для послекоммутационной схемы с учетом независимых начальных условий. Постоянные интегрирования вычисляют с помощью начальных условий для искомых функций и их производных.

### Операторный метод расчета переходных процессов

C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\w.gif Сущность операторного метода заключается в том, что функции C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image002.gifвещественной переменной t, которую называют **оригиналом,** ставится в соответствие функция C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image004.gifкомплексной переменной C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image006.gif, которую называют **изображением.** В результате этого производные и интегралы от оригиналов заменяются алгебраическими функциями от соответствующих изображений (дифференцирование заменяется умножением на оператор р, а интегрирование – делением на него), что в свою очередь определяет переход от системы интегро-дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений относительно изображений искомых переменных. При решении этих уравнений находятся изображения и далее путем обратного перехода – оригиналы. Важнейшим моментом при этом в практическом плане является необходимость определения только независимых начальных условий, что существенно облегчает расчет переходных процессов в цепях высокого порядка по сравнению с классическим методом.

Изображение C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image007.gif заданной функции C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image008.gif определяется в соответствии с **прямым преобразованием Лапласа:**

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image010.gif. |  |

В сокращенной записи соответствие между изображением и оригиналом обозначается, как:

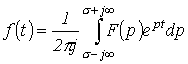
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image012.gif | или | C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image014.gif. |

Следует отметить, что если оригинал C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image015.gif увеличивается с ростом t, то для сходимости интеграла необходимо более быстрое убывание модуля C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image017.gif. Функции, с которыми встречаются на практике при расчете переходных процессов, этому условию удовлетворяют.

**Переход от изображений к оригиналам**

Переход от изображения искомой величины к оригиналу может быть осуществлен следующими способами:

**1**. **Посредством обратного преобразования Лапласа**

,

которое представляет собой решение интегрального уравнения и сокращенно записывается, как:

C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image128.gif.

На практике этот способ применяется редко.

**2**. **По таблицам соответствия между оригиналами и изображениями**

В специальной литературе имеется достаточно большое число формул соответствия, охватывающих практически все задачи электротехники. Согласно данному способу необходимо получить изображение искомой величины в виде, соответствующем табличному, после чего выписать из таблицы выражение оригинала.

**3**. **С использованием формулы разложения**

Пусть изображение C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image136.gif искомой переменной определяется отношением двух полиномов

C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image138.gif, где C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image140.gif.

Если один из корней уравнения C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image169.gif равен нулю, т.е. C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image171.gif, то уравнение сводится к виду:

C:\Documents and Settings\admin_i26\My Documents\~Dima\Институт\ТОЭ\toe\images27\image173.gif.

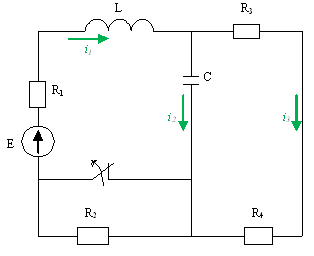
Далее рассматриваются примеры расчета переходных процессов в цепях второго порядка двумя методами: классическим и операторным

***Пример выполнения задачи №2***

Задание 3.1 на стр.55 «Методические указания и контрольные задания для студентов технических специальностей вузов» (Л.А.Бессонов, И.Г.Демидова, М.Е.Заруди и др.– 2-е изд., перераб.–М.: Высш.шк., 2001 – 159 с.

Дано: Е=50 (В); L=2 мГн; С=1670 мкФ; R1 = 1 (Ом); R2 = 2 (Ом); R3 = 1 (Ом); R4 = 5 (Ом).

Определить: *i1(t)*-?



I. Расчет классическим методом:

Составим характеристическое уравнение и найдем его корни:

Дробь равна нулю, если числитель равен нулю, а знаменатель отличен от нуля:

Корни действительные и разные, значит, переходной процесс будет апериодическим, тогда вид свободной составляющей:

Общее решение примет вид:

где – это установившийся ток в первой ветви ДО КОММУТАЦИИ:

тогда:

Две неизвестные постоянные интегрирования , поэтому нужно второе уравнение.

В качестве второго уравнения записываем производную первого уравнения, тогда получим систему:

Полученные выражения справедливы для любого момента времени, значит и для t=0+:

или

определим по закону коммутации:

Для определения составим для контура с разомкнутым ключом уравнение по второму закону Кирхгофа:

или

по второму закону коммутации:

тогда:

Полученные значения подставляем в систему:

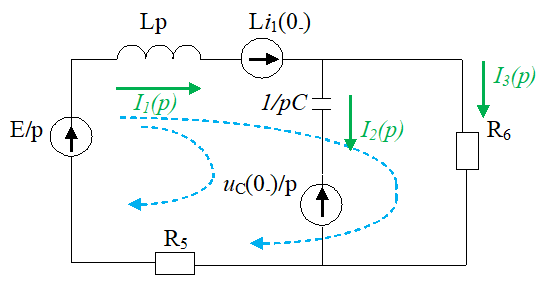
Получаем ответ:

II. Расчет операторным методом:

Составим операторную схему для изображений для момента времени

Схему немного упростим:

Начальные условия определили в классическом методе:



Составим систему уравнений на основании первого и второго законов Кирхгофа (для контуров, выделенных голубым пунктиром):

Решив систему в общем виде относительно I1 (из второго уравнения выразить I2, из третьего – I3, все подставить в первое уравнение; а лучше для этого воспользоваться любой математической программой), получим выражение:

Подставив значения и упростив выражение, получим:

Для определения корней решим уравнение :

По известному изображению найдем оригинал по формуле:

В нашем случае два корня, значит формула примет вид:

Определяем каждую из составляющих полученной формулы:

Найденные значения подставляем в формулу:

Ответ получен такой же, как в классическом методе!

**3. Методические предписания по выполнению задачи № 3**

**«Расчет нелинейной цепи постоянного тока»**

**Основные положения теории.**

**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: http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image002.gif . Для несимметричной характеристики это условие не выполняется, т.е. http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image004.gif . 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 http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image006.gif, у которой каждому значению х соответствует единственное значение y и наоборот. В случае неоднозначной характеристики каким-то значениям х может соответствовать два или более значения y или наоборот. У нелинейных резисторов неоднозначность характеристики обычно связана с наличием падающего участка, для которого http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image008.gif , а у нелинейных индуктивных и емкостных элементов – с гистерезисом.

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**

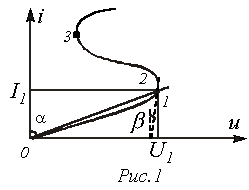
Нелинейные свойства таких цепей определяет наличие в них нелинейных резисторов.

В связи с отсутствием у нелинейных резисторов прямой пропорциональности между напряжением и током их нельзя охарактеризовать одним параметром (одним значением http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image010.gif ). 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

http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image014.gif .

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

http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image016.gif .

Следует отметить, что у неуправляемого нелинейного резистора http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image018.gif всегда, а http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image020.gif может принимать и отрицательные значения (участок 2-3 ВАХ на рис. 1).

В случае инерционного нелинейного резистора вводится понятие динамического сопротивления

http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image022.gif ,

определяемого по динамической ВАХ. В зависимости от скорости изменения переменной, например тока, может меняться не только величина, но и знак http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image024.gif .

**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:

* графическим;
* графо-аналитическим;
* итерационным.

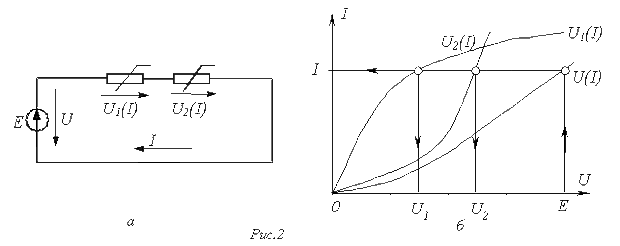
**Графические методы расчета**

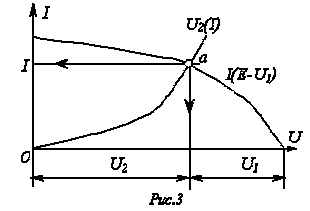
При использовании этих методов задача решается путем графических построений на плоскости. При этом характеристики всех ветвей цепи следует записать в функции одного общего аргумента. Благодаря этому система уравнений сводится к одному нелинейному уравнению с одним неизвестным. Формально при расчете различают 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 http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image026.gif отдельных резисторов в системе декартовых координат http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image028.gif строится результирующая зависимость http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image030.gif . Затем на оси напряжений откладывается точка, соответствующая в выбранном масштабе заданной величине напряжения на входе цепи, из которой восстанавливается перпендикуляр до пересечения с зависимостью http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image032.gif . Из точки пересечения перпендикуляра с кривой http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image033.gif опускается ортогональ на ось токов – полученная точка соответствует искомому току в цепи, по найденному значению которого с использованием зависимостей http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image034.gif определяются напряжения http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image036.gif на отдельных резистивных элементах.

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



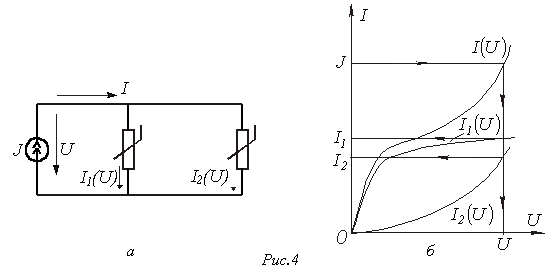
Графическое решение для последовательной нелинейной цепи с двумя резистивными элементами может быть проведено и другим методом –**методом пересечений.** В этом случае один из нелинейных резисторов, например, с ВАХ http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image042.gif на рис.2,а, считается внутренним сопротивлением источника с ЭДС Е, а другой – нагрузкой. Тогда на основании соотношения http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image044.gif точка а (см. рис.3) пересечения кривыхhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image046.gifиhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image048.gifопределяет режим работы цепи. Криваяhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image049.gifстроится путем вычитания абсцисс ВАХhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image050.gif из ЭДС Е 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 http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image052.gif отдельных резисторов в системе декартовых координатhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image053.gifстроится результирующая зависимостьhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image055.gif. 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 ВАХhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image056.gif, из которой восстанавливается перпендикуляр до пересечения с зависимостьюhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image058.gif. Из точки пересечения перпендикуляра с кривойhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image059.gifопускается ортогональ на ось напряжений – полученная точка соответствует напряжению на нелинейных резисторах, по найденному значению которого с использованием зависимостейhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image060.gifопределяются токиhttp://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image062.gifв ветвях с отдельными резистивными элементами.

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



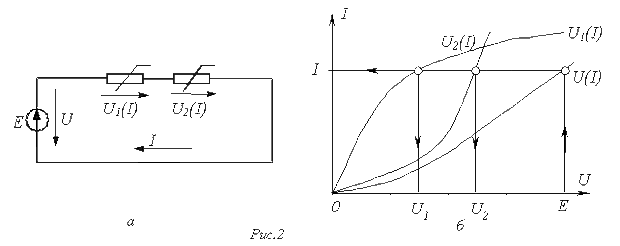
в) Цепи с последовательно-параллельным (смешанным) соединением резистивных элементов.

Расчет таких цепей производится в следующей последовательности:

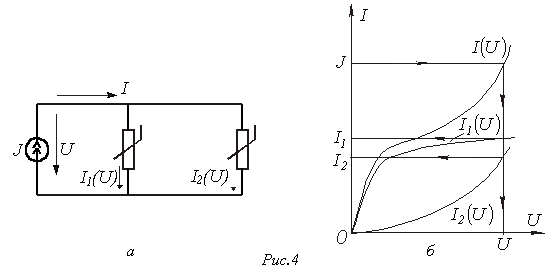
1. Исходная схема сводится к цепи с последовательным соединением резисторов, для чего строится результирующая ВАХ параллельно соединенных элементов, как это показано в пункте б).

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

1. При *последовательном* соединении нелинейных элементов для построения зависимости I(U), необходимо задаться любым значением тока и сложить напряжения U1 и U2 как показано на рисунке:

****

2. При *параллельном* соединении нелинейных элементов для построения зависимости I(U), необходимо задаться любым значением напряжения и сложить токи I 1 и I 2 как показано на рисунке:

****

3. Цепи со *смешанным* соединением резистивных элементов рассчитывают 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 2.

– проводится расчет полученной схемы с последовательным соединением резистивных элементов (см. пункт 1), на основании которого затем определяются токи в исходных параллельных ветвях.

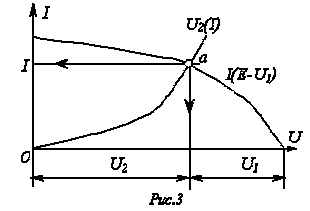
Если в нелинейной цепи есть линейные элементы, то необходимо построить ВАХ линейного элемента (прямая линия), которая строится по двум точкам. Линейный элемент подчиняется закону Ома, поэтому при заданном R определяют координаты точек по формуле: U = I R. Далее расчет производится в соответствии с пунктами 1,2,3.

**Метод двух узлов**

Для цепей, содержащих два узла или сводящихся к таковым, можно применять метод двух узлов. При полностью графическом способе реализации метода он заключается в следующем:

Строятся графики зависимостей http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image066.gif токов во всех i-х ветвях в функции общей величины – напряжения http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image068.gif между узлами m и n, для чего каждая из исходных кривых http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image070.gifсмещается вдоль оси напряжений параллельно самой себе, чтобы ее начало находилось в точке, соответствующей ЭДС http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image072.gif в i-й ветви, а затем зеркально отражается относительно перпендикуляра, восстановленного в этой точке.

Определяется, в какой точке графически реализуется первый закон Кирхгофа http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image074.gif . Соответствующие данной точке токи являются решением задачи.

Метод двух узлов может быть реализован и в другом варианте, отличающемся от изложенного выше меньшим числом графических построений.

В качестве примера рассмотрим цепь на рис. 5. Для нее выражаем напряжения на резистивных элементах в функции http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image077.gif :

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image079.gif ; | (1) |

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image081.gif ; | (2) |

|  |  |
| --- | --- |
| http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image083.gif . | (3) |

Далее задаемся током, протекающим через один из резисторов, например во второй ветви http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image085.gif , и рассчитываем http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image086.gif , а затем по http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image087.gif с использованием (1) и (3) находим http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image089.gif и http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image091.gifи по зависимостям http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image093.gif и http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image095.gif - соответствующие им токи http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image097.gif и http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image099.gif и т.д. Результаты вычислений сводим в табл. 1, в последней колонке которой определяем сумму токов

http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image101.gif .

Таблица 3. **Таблица результатов расчета методом двух узлов**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image102.gif | http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image103.gif | http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image105.gif | http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image106.gif | http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image107.gif | http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image109.gif | http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image111.gif |
|  |  |  |  |  |  |  |

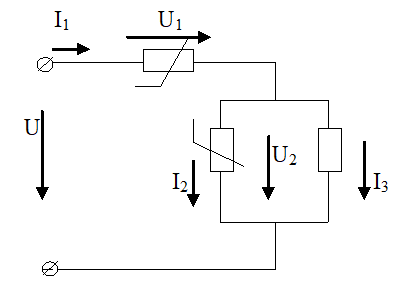
Алгебраическая сумма токов в соответствии с первым законом Кирхгофа должна равнять нулю, поэтому получающаяся в последней колонке табл. 3 величина http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image113.gif указывает, каким значением http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image114.gif следует задаваться на следующем шаге.

В осях http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image116.gif строим кривую зависимости http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image118.gif и по точке ее пересечения с осью напряжений определяем напряжение http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image119.gif между точками m и n. Для найденного значения http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image120.gif по (1)…(3) рассчитываем напряжения на резисторах, после чего по заданным зависимостям http://www.bez-dvoek.ru/education/Golubev/images30/image121.gif определяем токи в ветвях схемы.

***Пример выполнения задачи №3***

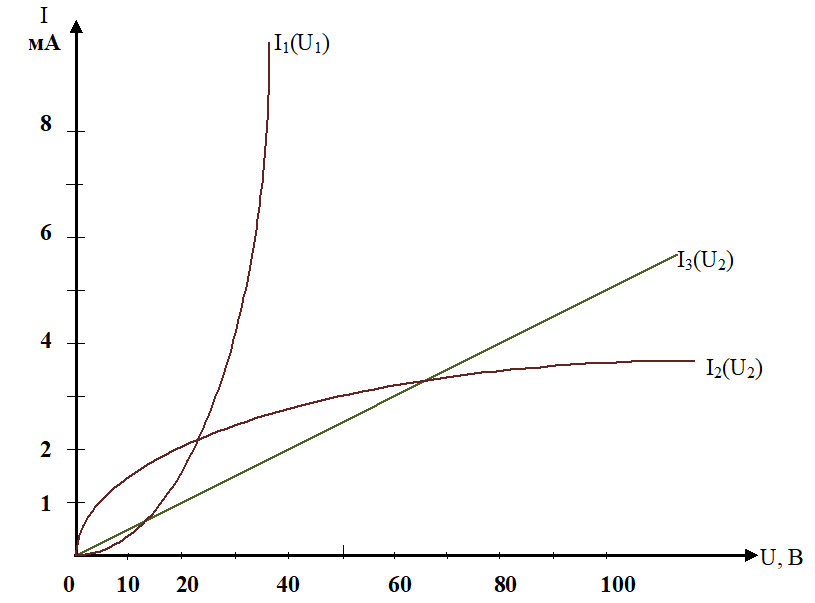
**Задание необходимо взять у преподавателя.**

**Пример**: В предложенной схеме для нелинейных элементов заданы зависимости I1(U1), I2(U2), а также значение линейного сопротивления R = 20 кОм.

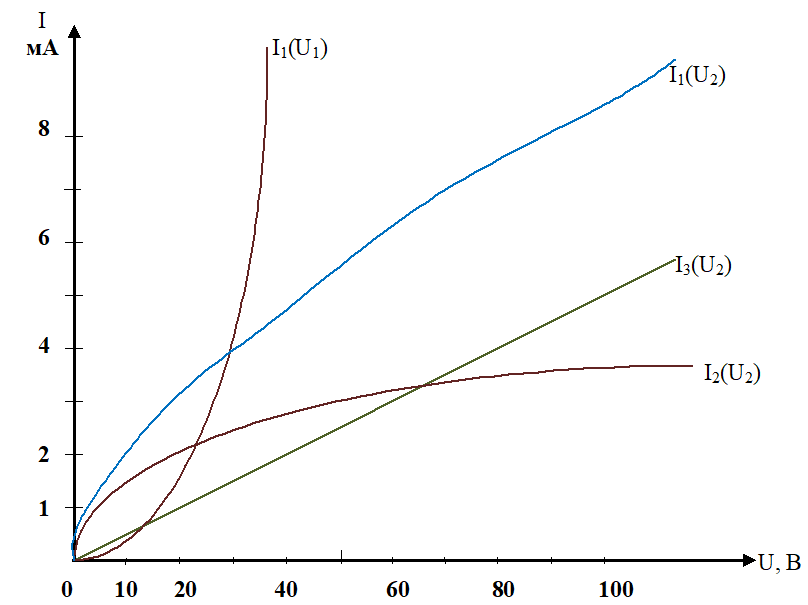


Строим прямую I3(U2) по закону Ома U = I R:

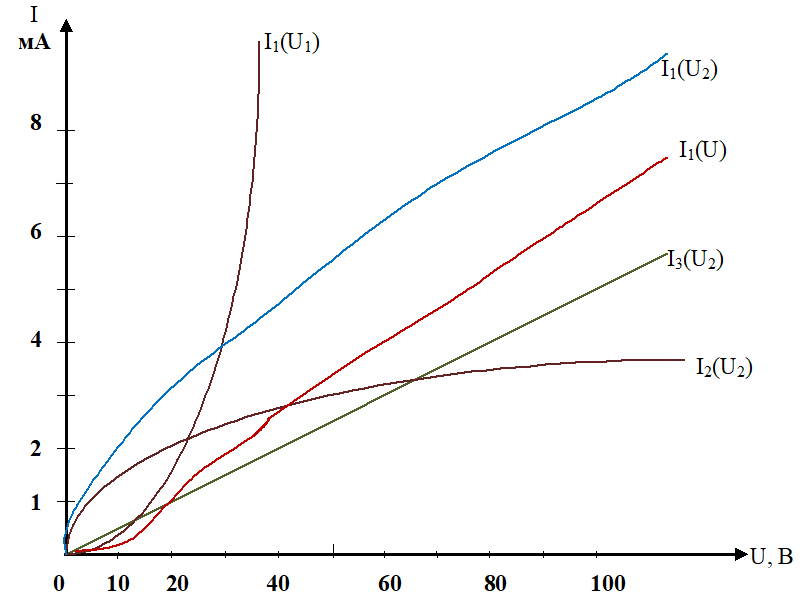
первая точка с координатами (0,0), вторая – (80В, 4мА) т.к. U=4мА\*20 кОм =80В, где значение тока 4мА выбрали произвольно.

****

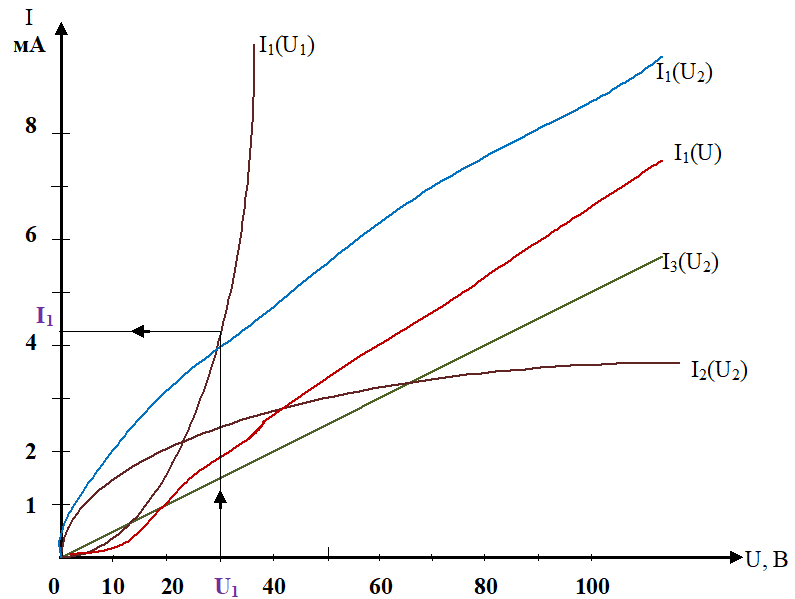
Результатом сложения кривых I2(U2) и I3(U2) (сложение параллельно соединенных элементов) стала кривая I1(U2).

****

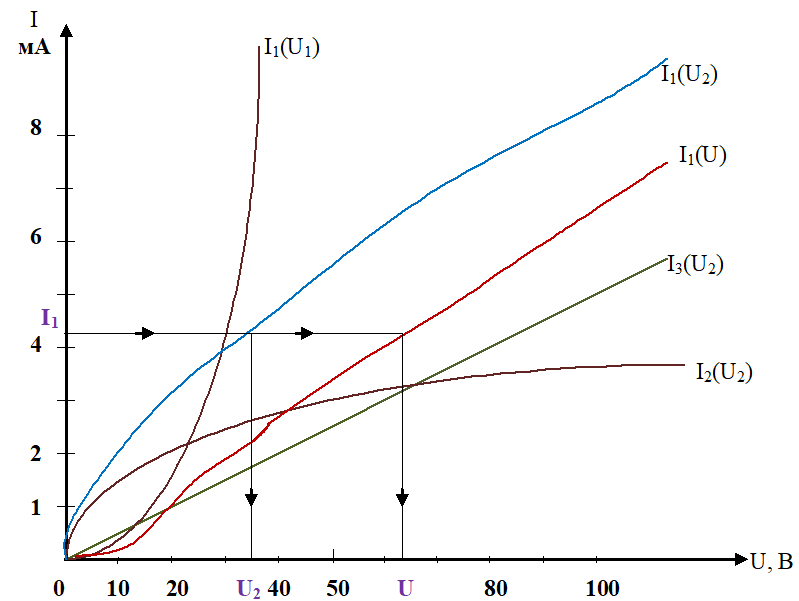
Результатом сложения кривых I1(U1) и I1(U2) (сложение последовательно соединенных элементов) стала кривая I1(U)

****

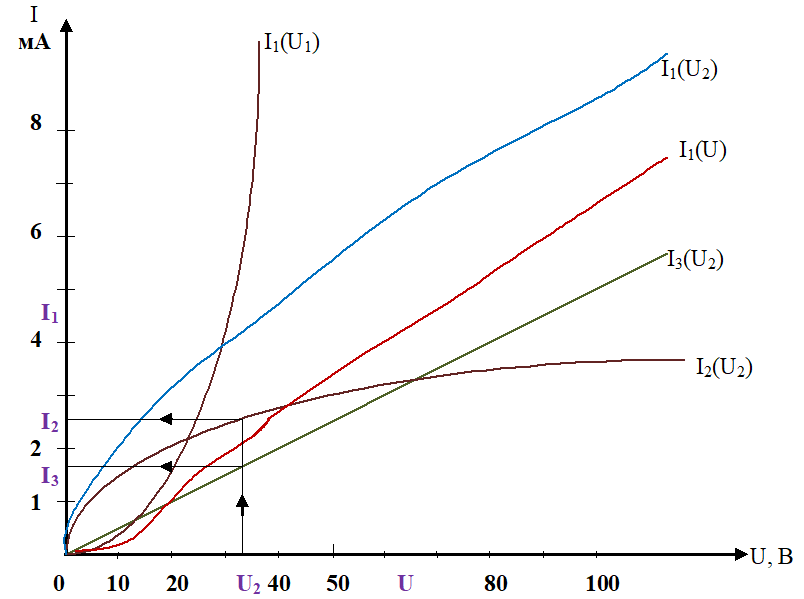
По заданному параметру U1 = 30 В определяем по зависимости I1(U1) ток I1:

****

По найденному току I1 по зависимостям I1(U2) и I1(U) определяем напряжения U2 и U:



По известному напряжению U2  определяем по зависимостям I3(U2) и I2(U2) токи I3  и I2:



Список рекомендуемых источников:

1. Попов, В.П. Основы теории цепей: учебник для бакалавров / В.П. Попов.–7-е изд., перераб и допол.–М.: Издательство Юрайт, 2013.–696с.
2. Башарин, С.А. Теоретические основы электротехники: учебник /С.А. Башарин, В.В. Федоров.–5-е изд., перераб и допол.–М.: Издательский центр « Академия », 2013.– 384с.
3. Иванов, И.И.Электротехника и основы электроники: учебное пособие / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я. Фролов. – 7- е изд. – СПб: Лань,2012. – 736с.
4. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника: учебное пособие / М.А. Жаваронков. - М.: Изд. центр « Академия»,2013. - 400с.
5. Аполлонский, С.М. Теоретические основы электротехники: учебное пособие / С.М. Аполлонский, А.Л. Виноградов.– М.: КНОРУС,2016.–250с.
6. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л.А. Бессонов.–11-е изд., перераб и доп.– М.: Издательство Юрайт,2013.–701с.
7. Теоретические основы электротехники. Сборник задач: учебное пособие для бакалавров / Л.А.Бессонов; под ред. Л.А. Бессонова.–5-е изд., испр. и допол.–М.: Издательство Юрайт, 2014.–528с.
8. Попов, В.П. Основы теории цепей: учебник.– В 2ч / В.П. Попов. – М.: Изд-во Юрайт,2017.
9. Немцов, М.В. Электротехника и электроника: учебник / М.В. Немцов.– М.: КНОРУС,2016.–560с.