

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессио-
нального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ЭЛТИ
_____ А.П.Суржиков
« ____ » _____ 2010 г.

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Рабочая программа, методические указания
и индивидуальные домашние задания № 1, № 2, №3 для
студентов, обучающихся по направлениям 140140 «Элек-
троэнергетика и электротехника» ЭНИН, 200100 «Прибо-
ростроение», 200200 «Оптотехника», 200300 «Биомеди-
цинская инженерия», 200500 «Метрология, стандартиза-
ция, сертификация», 210100 «Электроника, микроэлектро-
ника», по специальности 220501 «Управление качеством»
электрофизического факультета

Составители **С.В.Пустынников, С.А.Новиков**

Семестр	3
Лекции, часов	24
Практические занятия, часов	18
Лабораторные занятия, часов	18
Самостоятельная работа, часов	70
Формы контроля	экзамен

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 621.3.01/09

Общая электротехника: Раб. программа, метод. указ. и индивидуальные домашние задания № 1, № 2, №3 для студентов, обучающихся по направлениям направлениям 140140 «Электроэнергетика и электротехника», ЭНИН, 200100 «Приборостроение», 200200 «Оптитехника», 200300 «Биомедицинская инженерия», 200500 «Метрология, стандартизация, сертификация», 210100 «Электроника, микроэлектроника», по специальности 220501 «Управление качеством» ЭФФ / Сост. С.В.Пустынников, С.А.Новиков.– Томск: Изд. ТПУ, 20010. – 44 с.

Рабочая программа, методические указания и индивидуальные домашние задания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры теоретических основ электротехники «_____» _____ 2010 г, протокол № _____.

Зав. кафедрой, доцент, к.т.н. _____ А.В.Лукутин

Аннотация

Рабочая программа, методические указания и индивидуальные домашние задания по дисциплине «Общая электротехника.» предназначена для студентов обучающихся по направлениям 200100 «Приборостроение», 200200 «Оптитехника», 200300 «Биомедицинская инженерия», 200500 «Метрология, стандартизация, сертификация», 210100 «Электроника, микроэлектроника», по специальности 220501 «Управление качеством» ЭФФ. Данная дисциплина изучается в третьем семестре.

Приведен перечень основных тем дисциплины, указаны перечень лабораторных работ и темы практических занятий для третьего семестра. Приведены варианты индивидуальных домашних заданий №1, №2, №3. Даны методические указания по выполнению индивидуальных домашних заданий.

1. Цели и задачи учебной дисциплины

Курс "Общая электротехника" является одной из базовых дисциплин, обеспечивающих общетеоретическую и профессиональную подготовку инженеров, необходимую для освоения специальных дисциплин.

Цель изучения дисциплины: приобретение студентами знаний, навыков и умений по расчету и анализу магнитных, линейных и нелинейных электрических цепей в установившемся и переходном режимах, устройству и принципу действия электрических машин.

1.1. Цели преподавания дисциплины

Студент, изучивший курс "Общая электротехника" должен:

иметь представление:

- о роли курса для освоения специальных дисциплин;
- о программах для расчетов линейных и нелинейных электрических цепей в установившемся и переходном режимах.
- о видах и принципах действия электрических машин.

знать:

- основные законы и определения электрической и магнитной цепи,
- методы расчета электрической и магнитной цепи,
- методы расчета переходных процессов в цепях,
- принцип действия и устройство трансформатора,
- принцип действия асинхронных и синхронных машин, двигателя постоянного тока.

уметь:

- использовать полученные знания при освоении учебного материала последующих дисциплин;
- рассчитывать линейные и нелинейные электрические цепи в установившемся и переходном режимах;
- рассчитывать магнитные цепи.

иметь опыт:

- работы со справочной и учебной литературой;
- подготовки исходных данных для программ расчетов линейных и нелинейных электрических цепей в установившемся и переходном режимах.

1.2. Задачи изложения и изучения дисциплины

Для достижения, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств:

- лекции;

- практические занятия с опросом студентов и закреплением теоретического материала;
- лабораторные работы с индивидуальными заданиями и защитой выполненных исследований;
- индивидуальные и групповые консультации по теоретическим и практически вопросам курса;

Проверка приобретенных знаний, навыков и умений осуществляется посредством опроса студентов, при защите лабораторных работ, текущих тестовых испытаний и сдачи экзамена.

2. Содержание теоретического раздела дисциплины (лекции, 34 часа)

2.1. Электрические и магнитные цепи (28 час.)

2.1.1. Основные определения (4 часа)

Электрическая цепь и её элементы. Простейшие двухполюсники и их свойства. Источники электрической энергии, их характеристики и схемы замещения. Основные физические величины, характеризующие электромагнитные процессы. Понятие о сигналах и способах их математического описания. Основные законы электрической цепи. Символический метод расчета.

2.1.2. Топологические параметры и методы расчета электрических цепей (4 часа)

Топологические понятия электрической цепи: граф цепи, дерево графа, контур, узел, ветвь. Методы расчета: узловых потенциалы, контурные токи, эквивалентный генератор, метод наложения (2 час.). Эквивалентные преобразования электрических цепей. Баланс мощности (2 час.).

2.1.3. Линейные и нелинейные цепи (4 часа)

Цепи с индуктивно связанными элементами. (2 час.).

Основные понятия и определения резонансных явлений Последовательный и параллельный колебательный контуры. Определение и основные понятия нелинейных цепей (2 час.).

Графический метод расчета нелинейных цепей постоянного тока. Расчет по характеристикам для мгновенных значений (аналитический и графический способы) (2 час.).

2.1.4. Анализ и расчет магнитных цепей (4 часа)

Магнитные цепи и их схемы замещения. Закон полного тока и законы Кирхгофа в магнитных цепях. Расчет неразветвленной и разветвленной цепи при заданных геометрических параметрах и физических характеристиках цепи и заданных величинах намагничивающих сил или магнитного потока (индукции) в ветвях.

2.1.5. Переходные процессы (12 часов)

Физическая природа переходных процессов, законы коммутации, зависимые и независимые начальные условия. Классический метод расчета переходных процессов, свободные и принужденные составляющие токов и напряжений и их расчет, расчет корней характеристического уравнения (4 час.).

Переходные характеристики пассивных цепей, интеграл Дюамеля. Переходные процессы при источниках импульсных напряжений и токов произвольной формы (4 час.).

Операторный метод расчета переходных процессов. Операторные схемы замещения и их расчет (2 час.).

Метод переменных состояния (2 часа).

2.2. Электромагнитные устройства и электрические машины (6 часов)

2.2.1. Электромагнитные устройства (1 час)

Определение, принцип действия и область применения дросселей насыщения и магнитных усилителей.

2.2.2. Трансформаторы (2 часа)

Устройство и принцип действия трансформатора. Разновидности трансформаторов. Работа трансформатора.

2.2.3. Электродвигатели постоянного тока (1 час)

Общие сведения о двигателях постоянного тока. Пуск двигателей постоянного тока.

2.2.4. Асинхронные и синхронные машины (2 часа)

Общая классификация машин переменного тока. Принцип действия машин переменного тока. Вращающееся магнитное поле.

3. Содержание практического раздела дисциплины (36 часов)

3.1 Тематика практических занятий (18 часов)

3.1.1 Законы линейных электрических цепей и методы их расчета (4 часа) (2 час с.р.).

3.1.2 Линейные цепи синусоидального тока (с учётом явления взаимной индукции при расчёте). Векторные диаграммы и комплексный метод. Резонансные явления (2 часа) (1 час с.р.).

3.1.3. Расчет нелинейных электрических и магнитных цепей постоянного тока (2 часа) (1 час с.р.).

3.1.4. Нелинейные цепи переменного тока (4 часа) (2 час с.р.).

3.1.5. Расчет переходных процессов в линейных цепях классическим, операторным методами и с помощью интеграла Дюамеля (6 часов) (3 час с.р.).

3.2 Тематика лабораторных работ (18 часов)

- 3.2.1. Знакомство с лабораторным комплексом. Техника безопасности при выполнении лабораторных работ (2 ч.) (1 час с.р.).
- 3.2.2. Исследование линейной разветвленной цепи постоянного тока (2 ч.) (1 час с.р.).
- 3.2.3. Исследование активного двухполюсника (2 ч.) (1 час с.р.).
- 3.2.4. Простейшие цепи переменного тока (2 ч.) (1 час с.р.).
- 3.2.5. Линейный (воздушный) трансформатор (2 ч.) (1 час с.р.).
- 3.2.6. Исследование резонанса напряжений (2 ч.) (1 час с.р.).
- 3.2.7. Переходные процессы в простейших цепях (2 ч.) (1 час с.р.).
- 3.2.8. Переходные процессы в цепях второго порядка (2 ч.) (1 час с.р.).
- 3.2.9. Нелинейная цепь постоянного тока (2 ч.) (1 час с.р.).

4. Программа самостоятельной познавательной деятельности (70 часов)

Программа самостоятельной деятельности включает:

- подготовку к практическим занятиям – 9 часов;
- обработку результатов лабораторных работ и их оформление – 9 часов;
- выполнение двух индивидуальных домашних заданий:
 - 1. Расчет линейной цепи постоянного тока – (11 ч.)
 - 2. Расчет линейной цепи синусоидального тока – (11 ч.).
 - 3. Расчет переходного процесса в линейной цепи – (12 ч.).
- проработку теоретических разделов дисциплины – 18 часов.

5. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ДОМАШНИЕ ЗАДАНИЯ

5.1. Общие методические указания

К представленным на рецензию индивидуальным домашним заданиям предъявляются следующие требования:

1. Задания должны быть выполнены на чистых листах бумаги четвертого формата, обязательно сшитых.
2. Основные действия при выполнении задания должны сопровождаться достаточно подробными пояснениями.
3. Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены на отдельном листе бумаги (странице) аккуратно и в удобном для чтения масштабе.

4. Вычисления должны быть выполнены с точностью до третьей значащей цифры.
5. Задание должно быть подписано студентом и указана дата.

Незачтенные задания должны быть исправлены и сданы на повторную рецензию вместе с первоначальным вариантом работы и замечаниями преподавателя. Исправление ошибок в отрецензированном тексте не допускается. Все исправления должны быть выполнены под заголовком «Исправление ошибок».

При изучении курса «Общая электротехника» и выполнении индивидуальных домашних заданий рекомендуются учебники и учебные пособия, выпущенные в последние годы, так как в старых изданиях изложение ряда новых вопросов может отсутствовать. Рекомендуется пользоваться одним учебником при изучении всего курса, но когда какой-либо вопрос изложен в нем недостаточно ясно или вовсе не нашел отражения, использовать другой учебник. Целесообразность такого подхода обусловлена и тем, что в учебниках имеется небольшая разница в обозначениях и это может вызвать некоторые затруднения при переходе от одного учебника к другому. Так, например, в одних книгах ЭДС обозначается буквой E , а в других – \mathcal{E} ; потенциал – буквой ϕ или U . В одних книгах положительное направление отсчета для напряжения между двумя узлами или точками схемы указывается с помощью индексов этих узлов или точек, в других – индексы узлов у напряжения не ставятся, а ставится стрелка и один индекс и т.д.

Рекомендуется, прорабатывая материал, составлять конспект, в который полезно выписывать основные законы, определения и формулы. Конспект оказывает большую помощь при выполнении контрольных заданий и при подготовке к экзаменам.

Работа над индивидуальным домашним заданием помогает студентам проверить степень усвоения ими курса, вырабатывает у них навык четко и кратко излагать свои мысли. Для успешного достижения этой цели необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Начиная решение задачи, указать, какие физические законы или расчетные методы предполагается использовать при решении, привести математическую запись этих законов и методов.
2. Тщательно продумать, какие буквенные или цифровые обозначения предполагается использовать в решении. Пояснить значение каждого обозначения.
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 буквенным символом.

4. Расчет каждой исходной величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученную формулу подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения. При решении системы уравнений целесообразно воспользоваться известными методами упрощения расчета определителей (например, вынесение за знак определителя общего множителя и др.), а иногда и еще проще методом подстановки.
5. Промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть ясно выделены из общего текста.
6. Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов.
7. Для элементов электрических схем рекомендуется пользоваться обозначениями, применяемыми в учебниках по электротехнике.
8. Каждому этапу решения задачи нужно давать пояснения.
9. При построении кривых выбрать такой масштаб, чтобы на 1 см оси координат приходилось $1 \cdot 10^{\pm n}$ или $2 \cdot 10^{\pm n}$ единиц измерения физической величины, где n – целое число. Градуировку осей выполнять, начиная с нуля, равномерно через один или через два сантиметра. Числовые значения координат точек, по которым строятся кривые, не приводить. Весь график в целом и отдельные кривые на нем должны иметь названия.

Внимание! К сдаче экзамена допускаются студенты, выполнившие три индивидуальных домашних задания, решившие все задачи по основным темам курса, и защитившие курс лабораторных работ.

5.2. Индивидуальное домашнее задание №1.

Расчет линейной цепи постоянного тока

На рис.1 представлен граф электрической цепи. Граф содержит 4 узла – а, b, с, d, между которыми включены 6 ветвей – ab, ac, bc, bd, da, dc. Ветви содержат активные и пассивные элементы электрической цепи и обозначены номерами 1...6 (рис.2). В таблице №1 заданы параметры источников электрической цепи **E1, E2, J**, в таблице №2 заданы параметры пассивных элементов – **R, L, C**, в таблице №3 заданы варианты компоновки электрической цепи.

Номер варианта каждого студента содержит 4 цифры – первая цифра соответствует данным из табл.№1, вторая цифра – данным из табл.№2, третья и четвертая цифра соответствуют варианту схемы из табл.№3.

1. Полагая, что в цепи с постоянными токами и напряжениями индуктивность имеет нулевое сопротивление, а емкость – нулевую проводимость, изобразить схему, достаточную для расчета параметров режима цепи при постоянных во времени источниках энергии: $e_1(t)=E_1$, $e_2(t)=E_2$, $J(t)=J$.
2. Преобразовать схему до трех контуров, заменив ветви с параллельным и последовательным соединениями резисторов на эквивалентные.
3. Выбрать направления токов в ветвях схемы (в ветвях с источниками ЭДС токи задать по направлению ЭДС).
4. Составить полную систему уравнений состояния цепи по законам Кирхгофа, рассчитать токи всех ветвей и напряжение на источнике тока.
5. Методом контурных токов рассчитать токи всех ветвей и (по второму закону Кирхгофа) напряжение на источнике тока.
6. Методом узловых потенциалов (напряжений) рассчитать токи всех ветвей и (по второму закону Кирхгофа) напряжение на источнике тока.
7. Составить баланс мощностей, вычислив суммарную мощность источников энергии, и суммарную мощность, потребляемую резисторами. Небаланс не должен превышать 3 %.
8. Представить схему относительно ветви №5 с сопротивлением $2R$ эквивалентным генератором и определить его параметры (E_g , R_g , $I_{кз}$). Графически и аналитически определить ток в сопротивлении $2R$.
9. Построить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, не содержащего источника тока.
10. Результаты расчета токов по трем методам свести в таблицу и сравнить между собой.

5.3. Индивидуальное домашнее задание №2.

Расчет линейной цепи синусоидального тока

Для электрической цепи, схема и параметры которой соответствуют номеру варианта, при параметрах источников $e_1(t) = E_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 90^\circ)$ В, $e_2(t) = E_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t - 45^\circ)$ В, $J(t) = J \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ)$ А, $f = 50$ Гц выполнить следующее:

1. Изобразить схему цепи и обозначить индуктивную связь между катушками, полагая взаимную индуктивность равной $M = 0.5 \cdot L$.

2. Преобразовать схему, заменив ветви с параллельным и последовательным соединениями резисторов на эквивалентные и в общем (буквенном) виде составить полную систему уравнений состояния цепи по законам Кирхгофа в дифференциальной форме.
3. Представить сопротивления ветвей и действующие значения ЭДС и тока источников в комплексной форме и изобразить комплексную схему замещения цепи.
4. В полученной схеме методом уравнений Кирхгофа рассчитать комплексы действующих значений токов ветвей и напряжения на источнике тока.
5. Составить баланс активных и реактивных мощностей источников и потребителей электрической энергии. Небаланс как по активной, так и по реактивной мощностям не должен превышать 3 %.
6. Сделать развязку индуктивной связи, представить схему относительно ветви №5 с сопротивлением $2R$ эквивалентным генератором и определить его параметры (E_g, Z_g), Рассчитать ток в сопротивлении $2R$.
7. Определить показание вольтметра включенного параллельно ветви №6.
8. Построить топографическую векторную диаграмму напряжений, совмещенную с лучевой векторной диаграммой токов для контура с индуктивной связью.

Таблица №1

№ вар	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_1, В$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
$E_2, В$	100	120	150	180	200	220	250	50	60	80
$J, А$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Таблица №2

№ вар	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R, Ом$	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
$L, мГн$	31,84	63,7	95,54	127,3	159,2	191	254,7	318,4	382,1	445,8
$C, мкФ$	318,4	159,23	106,1	79,62	63,7	53,08	39,8	31,847	26,54	22,74

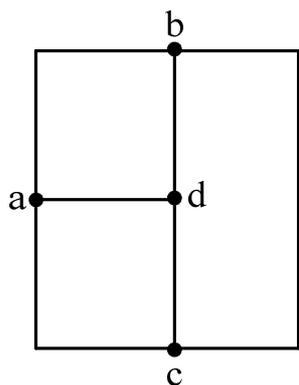


Рис.1. Граф электрической цепи

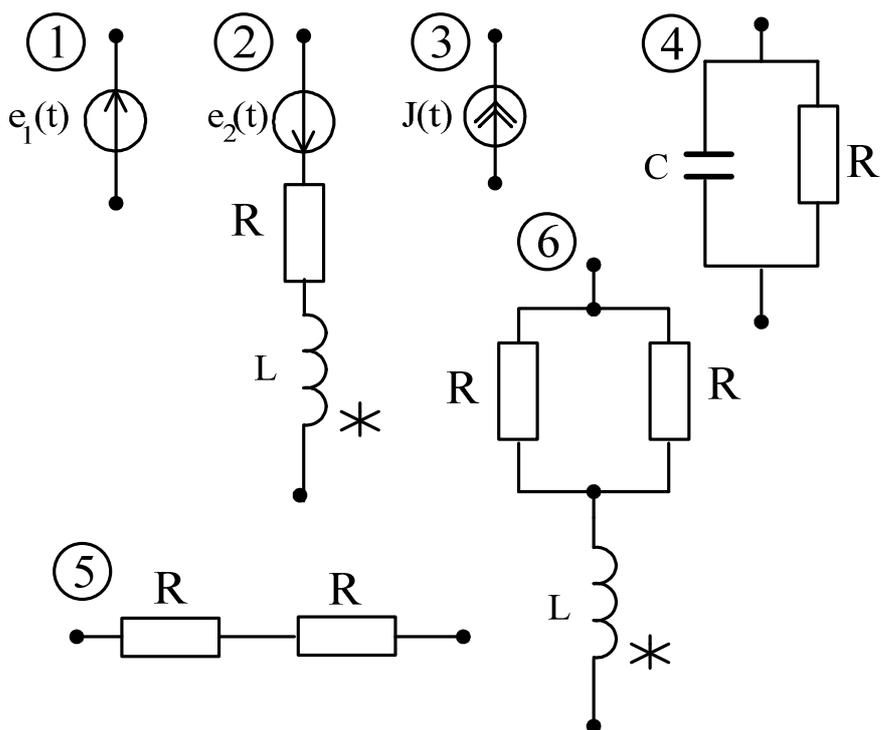


Рис.2. Элементы электрической цепи

Таблица №3

Ветви	ab	ac	bc	bd	da	dc
№ вар.						
01	2	6	1	3	5	4
02	1	3	2	6	5	4
03	1	3	5	4	2	6
04	6	2	1	3	5	4
05	1	3	6	2	5	4
06	1	3	5	4	6	2
07	2	6	3	1	5	4
08	3	1	2	6	5	4
09	3	1	5	4	2	6
10	6	2	3	1	5	4
11	3	1	6	2	5	4
12	3	1	5	4	6	2
13	2	6	1	5	3	4
14	1	5	2	6	3	4
15	1	5	3	4	2	6
16	6	2	1	5	3	4
17	1	5	6	2	3	4
18	1	5	3	4	6	2

19	2	6	1	3	4	5
20	1	3	2	6	4	5
21	1	3	4	5	2	6
22	6	2	1	3	4	5
23	1	3	6	2	4	5
24	1	3	4	5	6	2
25	2	6	4	1	3	5
26	4	1	2	6	3	5
27	4	1	3	5	2	6
28	6	2	4	1	3	5
29	4	1	6	2	3	5
30	4	1	3	5	6	2

5.4. Индивидуальное домашнее задание №3

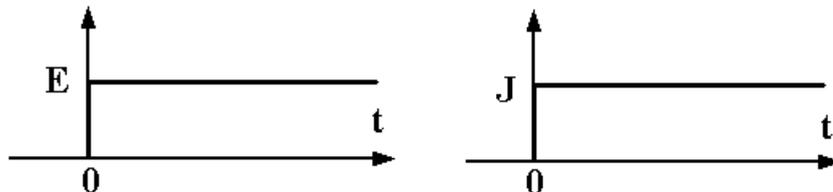
Переходные процессы в линейных электрических цепях

На рис.3 представлены схемы электрических цепей, на вход которых воздействуют сигналы различной формы, на рис.4 изображен сигнал непериодической формы, в таблице 4 заданы параметры электрических цепей.

Номер варианта каждого студента содержит 4 цифры – первая цифра соответствует номеру схемы (рис.3), вторая цифра соответствует сигналу непериодической формы, одинаковому для всех вариантов (рис.4), третья и четвертая цифры соответствуют данным из табл.4.

Для схемы, изображенной на рис.3, рассчитать ток или напряжение переходного процесса:

а) классическим и операторным методами при включении в момент времени $t = 0_+$ постоянного источника ЭДС или источника тока:



Построить график $i(t)$ или $u(t)$ на интервале $0 \leq t \leq 4 \cdot \tau$, где τ - постоянная времени переходного процесса.

б) **методом интеграла Дюамеля** при воздействии сигнала непериодической формы, изображенного на рис.4а,б (форма сигнала выбирается по согласованию с преподавателем).

Примечание: $\mathbf{A} = \mathbf{E}$ (для цепей с источником ЭДС)

$\mathbf{A} = \mathbf{J}$ (для цепей с источником тока)

$t_1 = 3\tau$ (τ - постоянная времени переходного процесса)

Построить график $i(t)$ или $u(t)$ на интервалах $0 \leq t \leq t_1, t \geq t_1$.

в) **классическим методом** при гармоническом источнике:

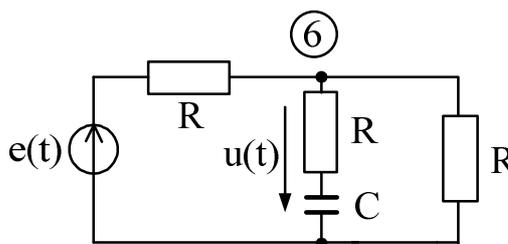
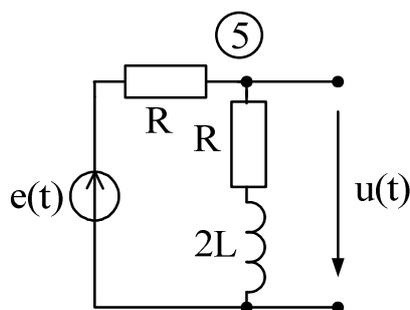
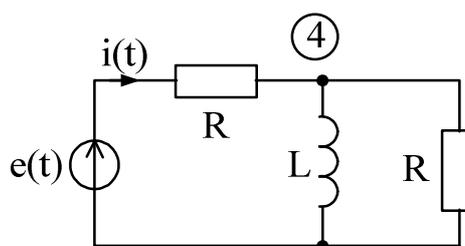
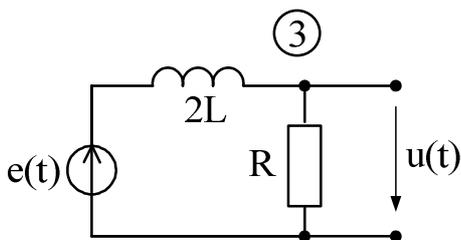
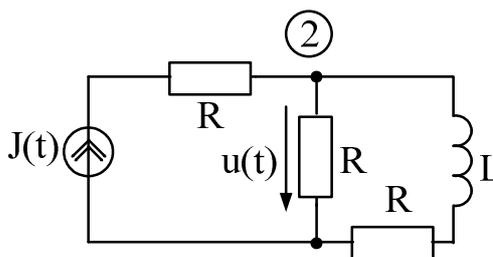
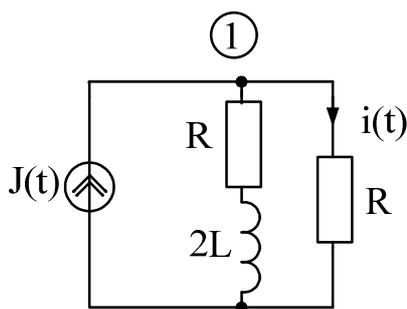
$e(t) = E \sin(\omega t + \alpha), j(t) = J \sin(\omega t + \alpha)$, на интервале времени

$0 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}$.

Частота ω определяется из условия $R = X_L$ или $R = X_C$.

Построить график выходного напряжения $u(t)$ или тока $i(t)$.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ



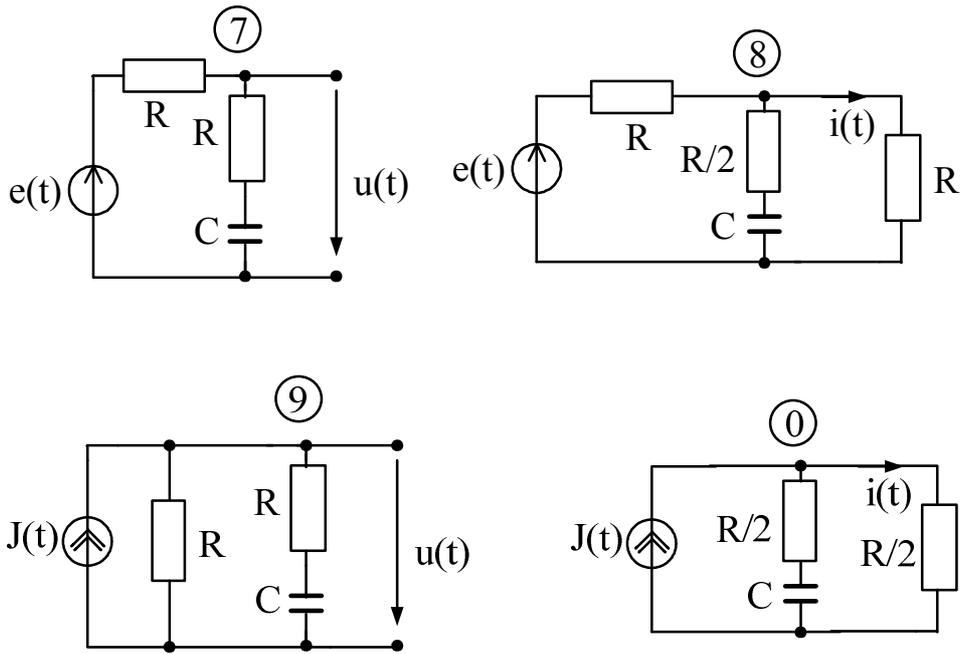


Рис.3

СИГНАЛ НЕПЕРИОДИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

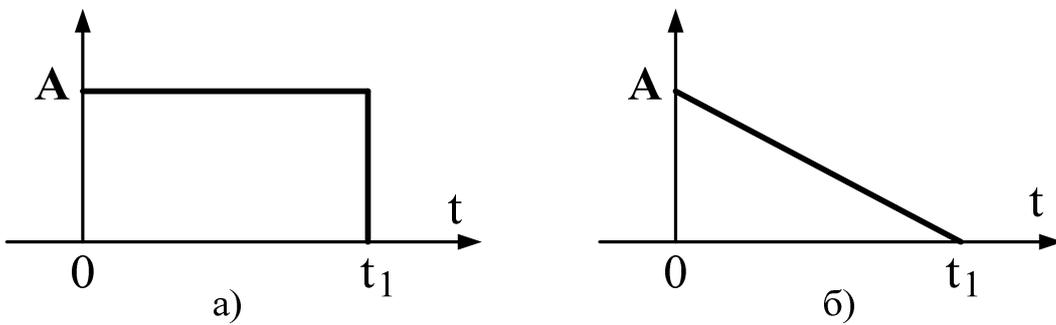


Рис.4

Таблица №4

№ вар	Е	Ј	R	L	С	α
	В	А	Ом	Гн	мкФ	град
01	10	1	20	0.2	500	30
02	20	2	30	0.3	333.33	60
03	30	3	40	0.4	250	90
04	40	4	50	0.5	200	-30
05	50	5	60	0.6	166.6	-60

06	60	6	70	0.7	142.85	-90
07	70	7	80	0.8	125	45
08	80	8	90	0.9	111.11	-45
09	90	9	100	1	100	120
10	100	10	120	1.2	83.33	150
11	15	1.5	12	0.24	1666.66	30
12	25	2.5	22	0.44	909.1	-120
13	35	3.5	32	0.64	625	-150
14	45	4.5	42	0.84	476.2	30
15	55	5.5	52	1.04	384.61	60
16	65	6.5	62	1.24	322.58	90
17	75	7.5	72	1.44	277.77	45
18	85	8.5	82	1.64	243.9	120
19	95	9.5	92	1.84	217.39	150
20	105	10.5	110	2.2	181.82	-30
21	12	1.2	16	0.48	1875	-60
22	22	2.2	26	0.78	1153.84	-90
23	32	3.4	36	1.08	833.33	-120
24	42	4.2	46	1.38	652.17	-150
25	52	5.2	56	1.68	535.71	-45
26	62	6.2	66	1.98	454.54	30
27	72	7.2	76	2.28	394.73	60
28	82	8.9	86	2.58	348.83	90
29	92	9.2	96	2.88	312.5	120
30	110	10.2	106	3.18	283.02	150

Методические указания к расчету индивидуального домашнего задания №1.

Свойства линейных электрических цепей и методы их расчета подробно изложены в [1 - 4].

Порядок решения задания №1 следующий.

1. Допустим, для Вашего варианта из табл.1 Вы нашли, что структура Вашей цепи следующая (пример условный, на самом деле такой структуры в табл.1 нет):

Ветви	ab	ac	bc	bd	da	dc
№ вар.	1	6	4	3	5	2

Из табл.2 находим параметры элементов цепи (параметры также условные):

№ вар.	E_1 В	E_2 В	J А	R Ом	L мГн	C мкФ
	100	50	2	110	350	28.95

По заданному графу построим схему электрической цепи (рис.5).

Примечание: поскольку индуктивности и емкость при воздействии на электрическую цепь постоянных сигналов обладают соответственно нулевым сопротивлением и нулевой проводимостью, на схеме они не указаны.

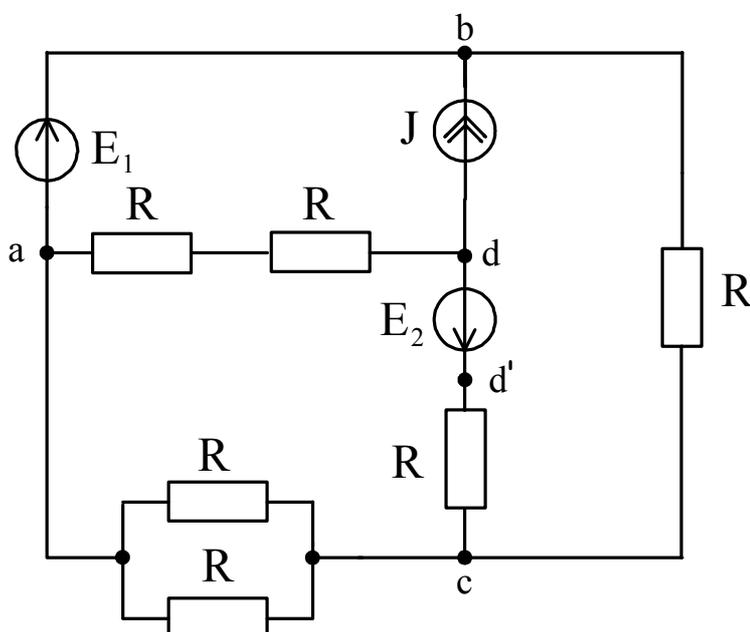


Рис.5. Схема электрической цепи

2. Преобразуем схему до трех контуров:

В ветви **da** сопротивления включены последовательно, а в ветви **ac** – параллельно, поэтому

$$R_{da} = R + R'' = 110 + 110 = 220 \text{ Ом};$$

$$R_{ac} = \frac{R \cdot R}{R' + R} = \frac{110 \cdot 110}{110 + 110} = 55 \text{ Ом}$$

1. Выбираем положительные направления токов. В ветвях, содержащих ЭДС – по направлению ЭДС, в остальных ветвях – произвольно. Расчетная трехконтурная схема электрической цепи с указанными направлениями токов в ветвях, напряжения на источнике тока и контурных токов приведена на рис.б.

4. В общем (буквенном) виде составляем полную систему уравнений состояния цепи по законам Кирхгофа для расчета токов всех ветвей и напряжения на источнике тока.

Схема содержит $Y = 4$ узла и $B = 6$ ветвей. Следовательно, по первому закону Кирхгофа можно составить $Y - 1 = 4 - 1 = 3$ независимых уравнения, а по второму закону Кирхгофа - $B - Y + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ независимых уравнения.

При составлении уравнений по законам Кирхгофа следует руководствоваться следующими правилами. Ток, направленный к узлу, в уравнении по первому закону Кирхгофа учитывается со знаком "+", направленный от узла - со знаком "-". Ток в потребителях электроэнергии (пассивных элементах электрической схемы) течет от узла с более высоким потенциалом к узлу с более низким потенциалом. Поэтому в уравнениях по второму закону Кирхгофа падение напряжения учитывается со знаком «+», если направление тока в пассивном элементе совпадает с направлением обхода контура. Напряжение на источнике тока направлено в противоположную току сторону, поскольку ток в этом элементе протекает от точки с более низким потенциалом к точке с более высоким потенциалом (за счет работы сторонних сил). ЭДС записываются в правой части уравнения, причем со знаком "+" учитываются ЭДС, направление которых совпадает с направлением обхода контура.

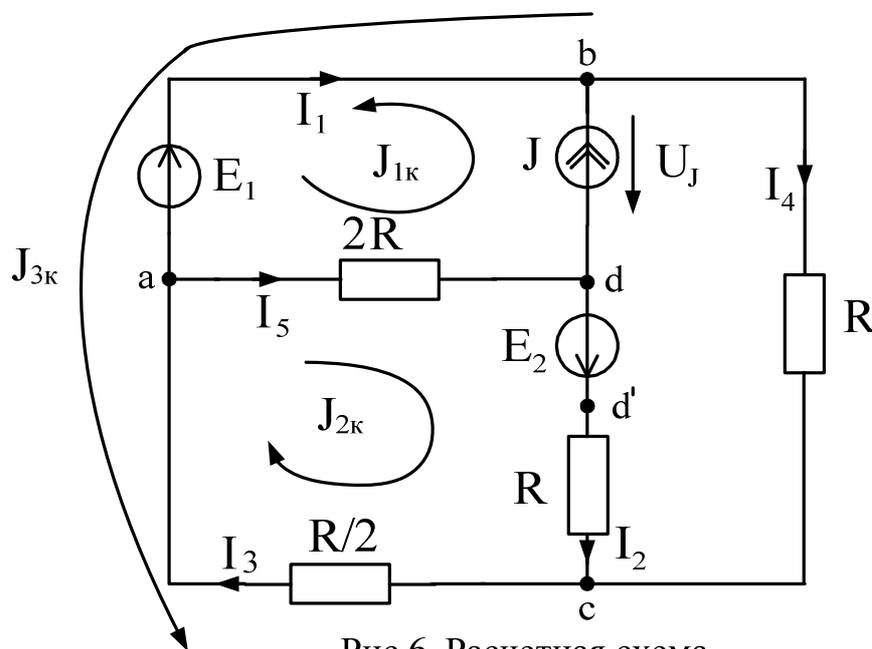


Рис.6. Расчетная схема

Узел b :	$I_1 - I_4 = -J$
Узел c :	$I_2 + I_4 - I_3 = 0$
Узел a :	$I_3 - I_1 - I_5 = 0$

$$\begin{array}{ll}
\text{Контур 1:} & U_J - I_5 \cdot 2R = E_1 \\
\text{Контур 2:} & I_2 \cdot R + I_3 \cdot R/2 + I_5 \cdot 2R = E_2 \\
\text{Контур 3:} & I_2 \cdot R - I_4 \cdot R + U_J = E_2
\end{array}$$

С помощью программы **MATSHAD** производим расчет уравнений в матричной форме:

$$a := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -220 & 1 \\ 0 & 110 & 55 & 0 & 220 & 0 \\ 0 & 110 & 0 & -110 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad b := \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \\ 50 \\ 50 \end{pmatrix} \quad i := a^{-1} \cdot b \quad i = \begin{pmatrix} -1.009 \\ -1.155 \\ -0.164 \\ 0.991 \\ 0.845 \\ 286 \end{pmatrix}$$

Значение токов ветвей схемы и напряжение на источнике тока:

$$I_1 = -1.009 \text{ A}, I_2 = -1.155 \text{ A}, I_3 = -0.164 \text{ A}, I_4 = 0.991 \text{ A}, I_5 = 0.845 \text{ A}, U_J = 286 \text{ B}$$

5. Методом контурных токов определяем токи в ветвях.

Выбираем независимые контуры. В рассматриваемой схеме их три (рис.6). При этом, поскольку ветвь **bd** содержит идеальный источник тока, эта ветвь может входить только в один контур. Ток этого контура равен току источника: $J_{1к} = J = 2 \text{ A}$. Для остальных контурных токов составляем уравнения:

$$\begin{cases} J_{2к} \cdot (2R + R + \frac{R}{2}) + J_{1к} \cdot 2R - J_{3к} \cdot \frac{R}{2} = E_2 \\ J_{3к} \cdot (R + \frac{R}{2}) + J_{1к} \cdot 0 - J_{2к} \cdot \frac{R}{2} = -E_1 \end{cases}$$

После переноса в правую часть постоянных коэффициентов уравнения примут вид:

$$\begin{cases} J_{2к} \cdot (2R + R + \frac{R}{2}) - J_{3к} \cdot \frac{R}{2} = E_2 - J \cdot 2R \\ -J_{2к} \cdot \frac{R}{2} + J_{3к} \cdot (R + \frac{R}{2}) = -E_1 \end{cases}$$

Численно получим:

$$\begin{cases} 385J_{2к} - 55J_{3к} = -390 \\ -55J_{2к} + 165J_{3к} = -100 \end{cases}$$

В матричной форме уравнения будут иметь вид:

$$\begin{pmatrix} 385 & -55 \\ -55 & 165 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} J_{2к} \\ J_{3к} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -390 \\ -100 \end{pmatrix}$$

После расчета получим:

$$J_{2к} = -1.155 \text{ A}; J_{3к} = -0.991 \text{ A}.$$

Определяем токи ветвей:

$$I_1 = -J_{1к} - J_{3к} = -2 + 0.991 = -1.009 \text{ A};$$

$$I_2 = J_{2к} = -1.155 \text{ A};$$

$$I_3 = J_{2к} - J_{3к} = -1.155 + 0.991 = -0.164 \text{ A}.$$

$$I_4 = -J_{3к} = 0.991 \text{ A};$$

$$I_5 = J_{1к} + J_{2к} = 2 - 1.155 = 0.845 \text{ A};$$

Согласно второму закону Кирхгофа,

$$U_J - I_5 \cdot R_5 + I_1 \cdot 0 = E_1.$$

Отсюда

$$U_J = I_5 \cdot 2R + E_1 = 0.845 \cdot 220 + 100 = 286 \text{ B}.$$

б. Определим токи в ветвях схемы методом узловых потенциалов.

Между узлами **a** и **b** включена ветвь с идеальным источником ЭДС без сопротивления. Поэтому в качестве базисного ($\varphi = 0$) удобно принять узел **a**, тогда $\varphi_a = 0$; $\varphi_b = E_1 = 100 \text{ B}$.

Для узлов **c** и **d** составляем узловые уравнения:

$$\begin{cases} \varphi_c \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{2}{R} \right) - \varphi_d \cdot \frac{1}{R} - \varphi_b \cdot \frac{1}{R} = \frac{E_2}{R} \\ -\varphi_c \cdot \frac{1}{R} + \varphi_d \cdot \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2R} \right) = -J - \frac{E_2}{R} \end{cases}$$

Перенеся слагаемое $\varphi_b \cdot \frac{1}{R}$ в правую часть уравнения и подставив

известные числовые значения, получаем:

$$\begin{cases} \varphi_c \cdot \left(\frac{1}{110} + \frac{1}{110} + \frac{2}{110} \right) - \varphi_d \cdot \frac{1}{110} = \frac{50}{110} + 100 \cdot \frac{1}{110} \\ -\varphi_c \cdot \frac{1}{110} + \varphi_d \cdot \left(\frac{1}{110} + \frac{1}{220} \right) = -2 - \frac{50}{110} \end{cases}$$

В матричной форме уравнения будут иметь вид:

$$\begin{pmatrix} 0.03636 & -0.00909 \\ -0.00909 & 0.0136363 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \varphi_c \\ \varphi_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.3636 \\ -2.4545 \end{pmatrix}$$

После расчета получим:

$$\varphi_c = -9 \text{ B}, \varphi_d = -186 \text{ B}$$

Токи в ветвях схемы определяются по обобщенному закону Ома:

$$I_2 = \frac{\varphi_d - \varphi_c + E_2}{R} = \frac{-186 + 9 + 50}{110} = -1.154 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{2 \cdot \varphi_c}{R} = \frac{2(-9)}{110} = -0.163 \text{ A}$$

$$I_4 = \frac{\varphi_b - \varphi_c}{R} = \frac{100 + 9}{110} = 0.991 \text{ A}$$

$$I_5 = -\frac{\varphi_d}{2R} = \frac{186}{220} = 0.845 \text{ A}$$

$$U_J = \varphi_b - \varphi_d = 100 + 186 = 286 \text{ B}$$

Ветвь **ab** содержит только одну ЭДС E_1 и проводимость этой ветви равна ∞ , поэтому ток I_1 невозможно определить через потенциалы узлов. Для узла "а" составим уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$I_1 = I_3 - I_5 = -0.163 - 0.845 = -1.008 \text{ A}.$$

6. Составляем уравнение баланса мощности.

Мощность источников:

$$P_u = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + U_J \cdot J = 100 \cdot (-1.009) + 50 \cdot (-1.155) + 286 \cdot 2 = 413.35 \text{ Вт}$$

Мощность потребителей:

$$P_n = I_2^2 \cdot R + I_3^2 \cdot \frac{R}{2} + I_4^2 \cdot R + I_5^2 \cdot 2R =$$

$$= (-1.155)^2 \cdot 110 + (-0.164)^2 \cdot 55 + 0.991^2 \cdot 110 + 0.845^2 \cdot 220 = 413.336 \text{ Вт}.$$

Погрешность расчета (небаланс) составила

$$\delta = \left| \frac{P_u - P_n}{P_u} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{413.36 - 413.336}{413.36} \right| \cdot 100\% = 0,0058\%.$$

Таким образом, небаланс в пределах допуска ($\delta \leq 1\%$).

8. Определим ток I_5 в ветви с сопротивлением $2R$ методом эквивалентного генератора.

Изобразим схему относительно ветви **ad** в виде эквивалентного генератора в режиме холостого хода (рис.7).

Из схемы рис.7 определим ЭДС эквивалентного генератора $E_{\Gamma} = U_{XX}$.

Согласно второму закону Кирхгофа, $U_{XX} - J \cdot R + I_{3XX} \cdot \frac{R}{2} = E_2$, от-

куда $E_{\Gamma} = U_{XX} = E_2 + J \cdot R - I_{3XX} \cdot \frac{R}{2}$.

Для определения тока I_{3XX} воспользуемся методом контурных токов: $J_{1K} = J = 2 \text{ A}$, $J_{2K} \cdot (R + \frac{R}{2}) + J_{1K} \cdot R = E_1$

Подставляя численные значения, получим:

$$I_{3XX} = J_{2K} = \frac{E_1 - J_{1K} \cdot R}{R + \frac{R}{2}} = \frac{100 - 2 \cdot 110}{110 + 55} = -0.727 \text{ A, тогда}$$

$$E_{\Gamma} = U_{XX} = 50 + 2 \cdot 110 + 0.727 \cdot 55 = 310 \text{ B}$$

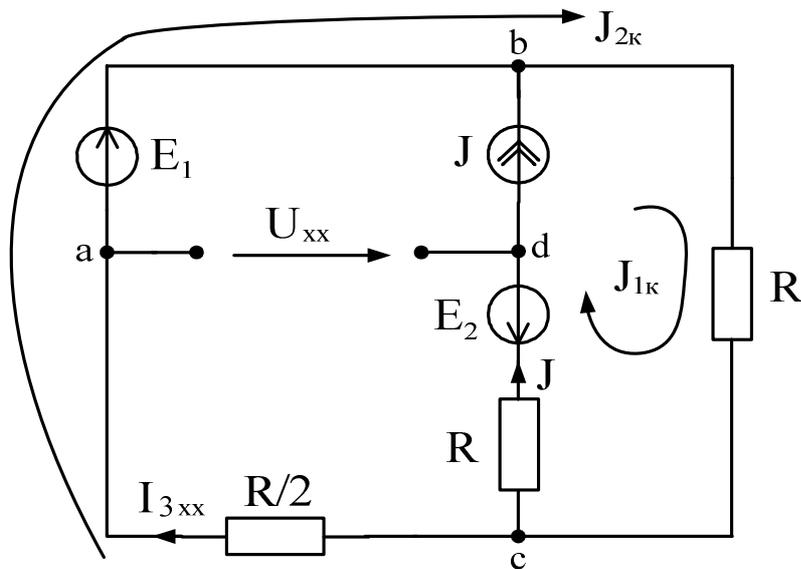


Рис.7. Эквивалентный генератор в режиме холостого хода

Для определения R_{Γ} рисуем вспомогательную схему (рис.8), в которой источники ЭДС замкнуты, а источники тока разомкнуты.

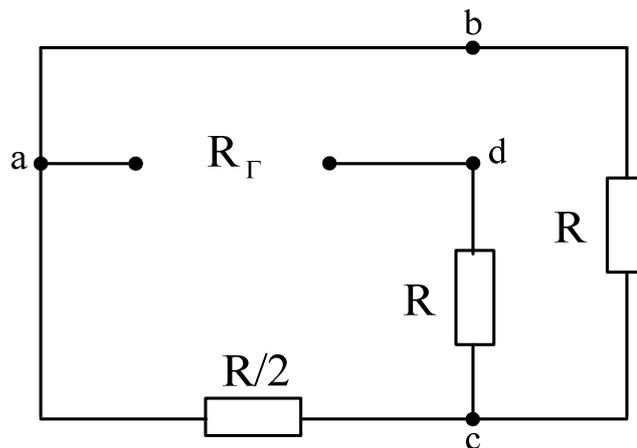


Рис.8. К определению сопротивления эквивалентного генератора

Из расчета схемы получаем:

$$R_{\Gamma} = R + \frac{R \cdot \frac{R}{2}}{R + \frac{R}{2}} = 110 + \frac{110 \cdot 55}{110 + 55} = 146.66 \text{ Ом.}$$

По формуле Тевенена-Гельмгольца определяем ток в сопротивлении нагрузки:

$$I_5 = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + 2R} = \frac{310}{146.66 + 220} = 0.845 \text{ А}$$

Ток короткого замыкания эквивалентного генератора определится как

$$I_{кз} = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma}} = \frac{310}{146.66} = 2.113 \text{ А .}$$

Определим ток I_5 графически. Для этого построим в одних осях внешнюю характеристику эквивалентного генератора и вольтамперную характеристику нагрузки (сопротивления $2R$). Внешняя характеристика является линейной и пересекает оси координат в точках U_{xx} и $I_{кз}$, а вольтамперная характеристика нагрузки также линейна и строится по закону Ома: $U_5 = I_5 \cdot 2R$. При этом достаточно задать два значения тока, например $I_5 = 0$ и $I_5 = 1 \text{ А}$. Точка пересечения характеристик будет рабочей точкой генератора, нагруженного на сопротивление $2R$, а ее проекция на оси координат – искомыми током и напряжением (рис.9). Получаем графические значения $U_5 \approx 186 \text{ В}$, $I_5 \approx 0.85 \text{ А}$.

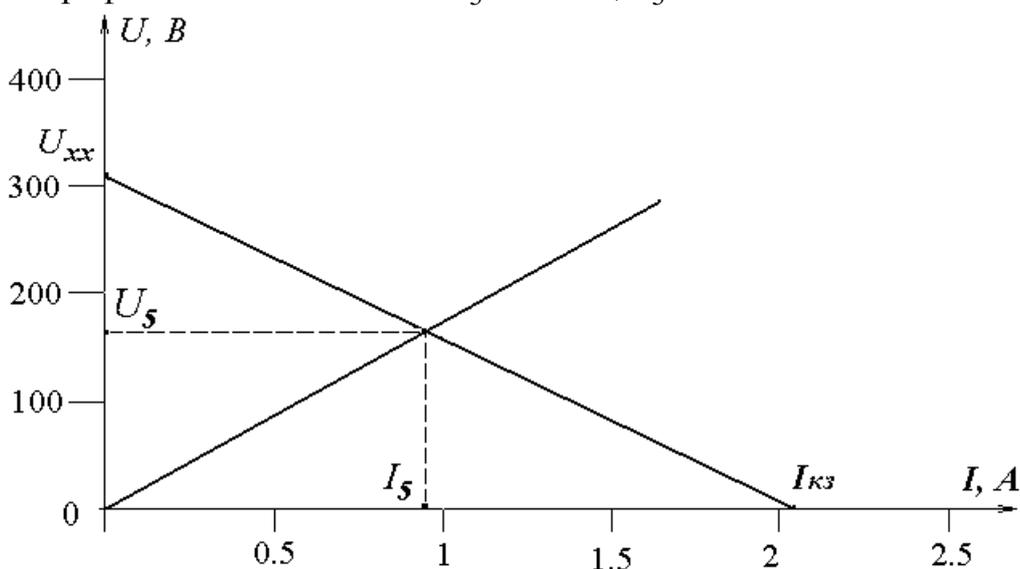


Рис. 9. Графическое определение тока I_5 и напряжения U_5 на сопротивлении $2R$

Построим потенциальную диаграмму для контура **add'c** (рис.6), не содержащего источника тока.

Принимаем $\varphi_a = 0$

$$\text{Тогда } \varphi_d = \varphi_a - I_5 \cdot 2R = 0 - 0.845 \cdot 220 = -185.9 \text{ В}$$

$$\varphi_{d'} = \varphi_d + E_2 = -185.9 + 50 = -135.9 \text{ В}$$

$$\varphi_c = \varphi_{d'} - I_2 \cdot R = -135.9 + 1.155 \cdot 110 = -8.85 \text{ В}$$

$$\varphi_a = \varphi_c - I_3 \cdot R/2 = -8.85 + 0.164 \cdot 55 \approx 0.$$

Диаграмма приведена на рис.10.

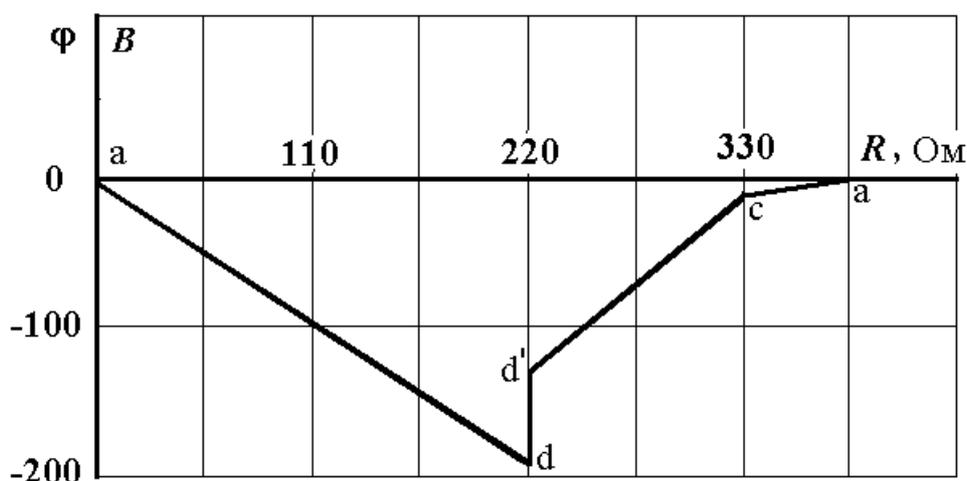


Рис.10. Потенциальная диаграмма для контура **add'ca**

Методические указания к расчету индивидуального домашнего задания №2.

1. Изобразим схему электрической цепи для условного варианта, рассмотренного в методических указаниях к заданию №1 (рис.11).

2. В общем (буквенном) виде составляем полную систему уравнений состояния цепи по законам Кирхгофа для расчета токов всех ветвей и напряжения на источнике тока.

Схема содержит $Y = 4$ узла и $B = 7$ ветвей. Следовательно, по первому закону Кирхгофа можно составить $Y - 1 = 4 - 1 = 3$ независимых уравнения, а по второму закону Кирхгофа $B - Y + 1 = 7 - 4 + 1 = 4$ независимых уравнения.

В индуктивных элементах токи $i_2(t)$, $i_3(t)$ ориентированы одинаковым образом относительно одноименных зажимов, обозначенных звездочками, поэтому имеем вариант **согласного включения**.

$$\underline{Z}_1 = 0$$

$$\underline{Z}_2 = R + j \cdot x_L = 110 + j \cdot 110 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_3 = \frac{R}{2} + j \cdot x_L = 55 + j \cdot 110 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_4 = \frac{R \cdot (-j \cdot x_C)}{R - j \cdot x_C} = R_4 - j \cdot X_{C4} = \frac{110 \cdot (-j \cdot 110)}{110 - j \cdot 110} = 55 - j \cdot 55 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_5 = 2 \cdot R = 220 \text{ Ом}$$

Комплексы действующих значений ЭДС и тока источников:

$$\underline{E}_1 = 100 \cdot e^{j90^\circ} = (0 + j \cdot 100) \text{ В}$$

$$\underline{E}_2 = 50 \cdot e^{-j45^\circ} = (35.35 - j \cdot 35.35) \text{ В}; \quad \underline{J} = 2 \cdot e^{j30^\circ} = (1.732 + j \cdot 1) \text{ А}$$

Расчетная схема с комплексными источниками ЭДС и тока и комплексными сопротивлениями ветвей показана на рис.12.

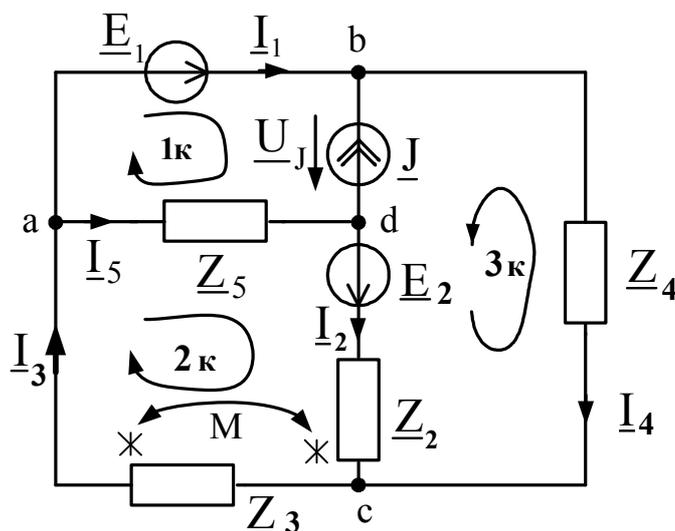


Рис.12. Расчетная комплексная схема замещения электрической цепи

4. Составляем систему уравнений в комплексной форме по законам Кирхгофа для расчета токов ветвей и напряжения на источнике тока:

Узел **b**: $\underline{I}_1 - \underline{I}_4 = -\underline{J}$

Узел **c**: $\underline{I}_2 + \underline{I}_4 - \underline{I}_3 = 0$

Узел **a**: $\underline{I}_3 - \underline{I}_1 - \underline{I}_5 = 0$

Контур 1: $\underline{U}_J - \underline{I}_5 \cdot 2R = \underline{E}_1$

Контур 2: $\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{I}_3 \cdot j \cdot X_M + \underline{I}_3 \cdot \underline{Z}_3 + \underline{I}_2 \cdot j \cdot X_M + \underline{I}_5 \cdot \underline{Z}_5 = \underline{E}_2$

Контур 3: $\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{I}_3 \cdot j \cdot X_M - \underline{I}_4 \cdot \underline{Z}_4 + \underline{U}_J = \underline{E}_2$

Подставляя численные значения, получим:

$$\text{Узел б: } \underline{I}_1 - \underline{I}_4 = -\underline{J}$$

$$\text{Узел с: } \underline{I}_2 + \underline{I}_4 - \underline{I}_3 = 0$$

$$\text{Узел а: } \underline{I}_3 - \underline{I}_1 - \underline{I}_5 = 0$$

$$\text{Контур 1: } \underline{U}_J - \underline{I}_5 \cdot 220 = j \cdot 100$$

$$\text{Контур 2: } \underline{I}_2 \cdot (110 + j \cdot 165) + \underline{I}_3 \cdot (55 + j \cdot 165) + \underline{I}_5 \cdot 220 = 35.35 - j \cdot 35.35$$

$$\text{Контур 3:}$$

$$\underline{I}_2 \cdot (110 + j \cdot 110) + \underline{I}_3 \cdot j \cdot 55 - \underline{I}_4 \cdot (55 - j \cdot 55) + \underline{U}_J = 35.35 - j \cdot 35.35$$

С помощью программы MATCHAD производим расчет уравнений в матричной форме:

$$a := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -220 & 1 \\ 0 & 110 + 165i & 55 + 165i & 0 & 220 & 0 \\ 0 & 110 + 110i & 55i & -55 + 55i & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad b := \begin{pmatrix} -1.732 - i \\ 0 \\ 0 \\ 100i \\ 35.35 - 35.35i \\ 35.35 - 35.35i \end{pmatrix}$$

$$d := a^{-1} \cdot b \quad d = \begin{pmatrix} -1.322 + 0.931i \\ -0.625 - 0.579i \\ -0.215 + 1.352i \\ 0.41 + 1.931i \\ 1.107 + 0.421i \\ 243.538 + 192.623i \end{pmatrix}$$

Следует учесть, что мнимая единица в программе MATCHAD обозначается как i вместо обозначения j , применяемого в электротехнике.

Значение токов ветвей схемы и напряжение на источнике тока в алгебраической и в показательной формах:

$$\underline{I}_1 = -1.322 + j \cdot 0.931 = 1.617 \cdot e^{j144.8^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_2 = -0.625 - j \cdot 0.579 = 0.852 \cdot e^{-j137.2^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_3 = -0.215 + j \cdot 1.352 = 1.369 \cdot e^{j99^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_4 = 0.41 + j \cdot 1.931 = 1.974 \cdot e^{j78^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{I}_5 = 1.107 + j \cdot 0.42 = 1.183 \cdot e^{j20.7^\circ} \text{ A}$$

$$\underline{U}_J = 243.358 + j \cdot 192.623 = 310.5 \cdot e^{j38.34^\circ} \text{ В}$$

5. Составим баланс активной и реактивной мощностей.

Полная мощность источников составит:

$$\begin{aligned} \underline{S}_И = P_И + j \cdot Q_И &= \underline{E}_1 \cdot \underline{I}_1^* + \underline{E}_2 \cdot \underline{I}_2^* + \underline{U}_J \cdot \underline{J}^* \\ &= j \cdot 100 \cdot (-1.322 - j \cdot 0.931) + (35.35 - j \cdot 35.35) \cdot (-0.625 + j \cdot 0.579) + \\ &+ (243.538 + j \cdot 192.623) \cdot (1.732 - j \cdot 1) = 705.905 + j \cdot 0.446 \text{ ВА} \end{aligned}$$

Здесь \underline{I}^* – сопряженный комплекс тока.

Таким образом, активная мощность источников энергии составит

$$P_И = 705.905 \text{ Вт}; \text{ реактивная мощность} - Q_И = 0.446 \text{ вар}.$$

Активная мощность потребителей:

$$\begin{aligned} P_П &= I_2^2 \cdot R + I_3^2 \cdot \frac{R}{2} + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot 2R = \\ &= 0.852^2 \cdot 110 + 1.369^2 \cdot 55 + 1.974^2 \cdot 55 + 1.183^2 \cdot 220 = 705.13 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Реактивная мощность потребителей при согласном включении индуктивностей с токами $\underline{I}_2, \underline{I}_3$:

$$\begin{aligned} Q_П &= I_2^2 \cdot X_L + I_3^2 \cdot X_L - I_4^2 \cdot X_{C4} + 2 \cdot I_2 \cdot I_3 \cdot X_M \cdot \cos(\psi_2 - \psi_3) = \\ &= 0.852^2 \cdot 110 + 1.369^2 \cdot 110 - 1.974^2 \cdot 55 + \\ &+ 2 \cdot 0.852 \cdot 1.369 \cdot 55 \cdot \cos(-137.2^\circ - 99^\circ) = 0.435 \text{ вар} \end{aligned}$$

Погрешность расчета (небаланс) составила:

по активной мощности

$$\delta_P = \left| \frac{P_И - P_П}{P_И} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{705.905 - 705.13}{705.905} \right| \cdot 100 \% = 0,11 \%$$

по реактивной мощности

$$\delta_Q = \left| \frac{Q_И - Q_П}{Q_И} \right| = \left| \frac{0.446 - 0.435}{0.446} \right| \cdot 100 \% = 2.4 \%$$

Таким образом, небаланс как по активной, так и по реактивной мощности в пределах допуска ($\delta \leq 3 \%$).

6. Сделаем развязку индуктивной связи и определим ток \underline{I}_5 в сопротивлении $2R$ методом эквивалентного генератора. На рис.13 представлена схема опыта холостого хода с развязкой индуктивной связи при подключении индуктивностей к узлу “с” разноименными зажимами.

Напряжение \underline{U}_{XX} определим по второму закону Кирхгофа:

$$\underline{U}_{xx} = \underline{E}_2 + \underline{J} \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_M) - \underline{I}_1^1 \cdot (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_M) = 35.35 - j \cdot 35.35 + 2 \cdot e^{j30^\circ} \cdot (110 + j \cdot 165) - 2.54 \cdot e^{j104.54^\circ} \cdot (55 + j \cdot 165) = 501.59 + j \cdot 330.43 = 600.646 \cdot e^{j33.37^\circ} \text{ В}$$

Здесь ток \underline{I}_1^1 определим методом контурных токов (рис.13):

$$\underline{J}_{1K} = \underline{J} = 2 \cdot e^{j30^\circ} \text{ А}$$

$\underline{J}_{2K} \cdot (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_M + \underline{Z}_4 - \underline{Z}_M) + \underline{J}_{1K} \cdot (\underline{Z}_4 - \underline{Z}_M) = \underline{E}_1$, подставляя численные значения, получим:

$$\underline{J}_{2K} \cdot (110 + j \cdot 55) = j \cdot 100 - 2 \cdot e^{j30^\circ} \cdot (55 - j \cdot 110)$$

$$\underline{I}_1^1 = \underline{J}_{2K} = \frac{312.377 \cdot e^{j131.1^\circ}}{122.983 \cdot e^{j26.56^\circ}} = 2.54 \cdot e^{j104.54^\circ} \text{ А}$$

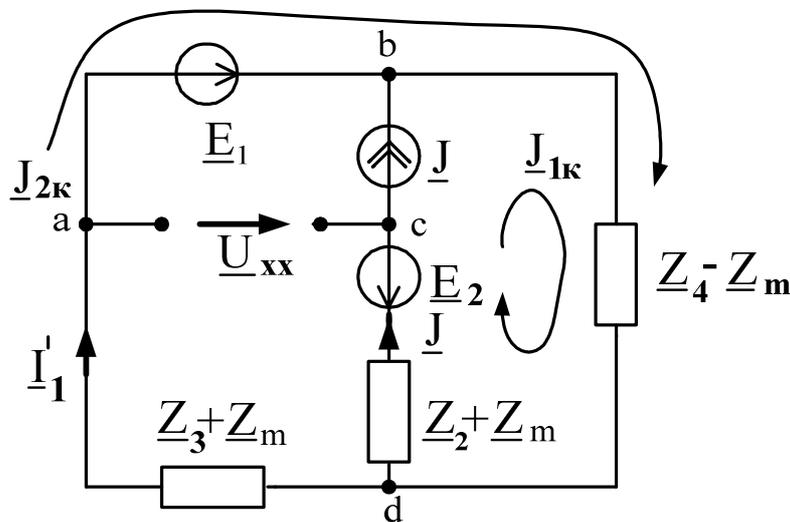


Рис.13. Схема опыта холостого хода

Для определения сопротивления эквивалентного генератора $\underline{Z}_Г$ рисуем вспомогательную схему, в которой шунтируем источники ЭДС и размыкаем источники тока (рис.14):

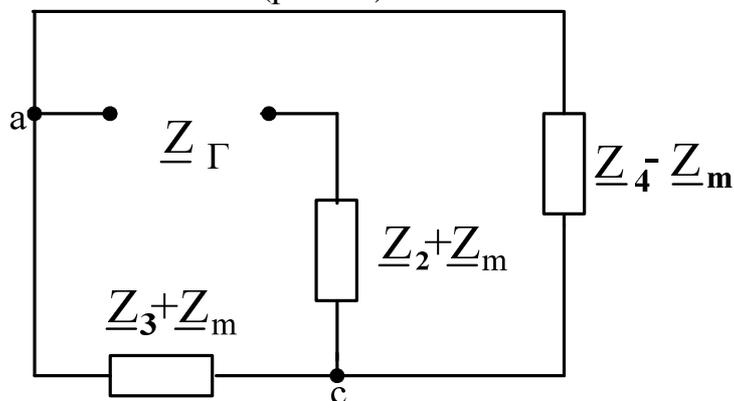


Рис.14. К определению сопротивления эквивалентного генератора

$$\underline{Z}_\Gamma = \underline{Z}_2 + \underline{Z}_M + \frac{(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_M) \cdot (\underline{Z}_4 - \underline{Z}_M)}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = 110 + j \cdot 165 +$$

$$+ \frac{(55 + j \cdot 165) \cdot (55 - j \cdot 110)}{110 + j \cdot 55} = 275 + j \cdot 100 \text{ Ом}$$

По формуле Тевенена – Гельмгольца определяем ток в нагрузке:

$$\underline{I}_5 = \frac{\underline{U}_{XX}}{\underline{Z}_\Gamma + 2R} = \frac{600.646 \cdot e^{j33.37^\circ}}{275 + j \cdot 100 + 220} = 1.189 \cdot e^{j21.95^\circ} \text{ А}$$

7. Определить показание вольтметра, включенного параллельно ветви №6.

Поскольку ветвь №6 включена между узлами “а” и “с”, то по второму закону Кирхгофа получим:

$$\underline{U}_V = \underline{I}_3 \cdot \underline{Z}_3 + \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_M = 1.369 \cdot e^{j99^\circ} \cdot (55 + j \cdot 110) + 0.852 \cdot e^{-j137.2^\circ} \cdot 55 \cdot e^{j90^\circ} =$$

$$= -128.33 + j \cdot 16.33 = 129.36 \cdot e^{j172.7^\circ} \text{ В}$$

Показание вольтметра: $U_V = 129.36 \text{ В}$

8. Построим топографическую векторную диаграмму напряжений, и лучевую векторную диаграмму токов для контура с индуктивной связью. Для этого изобразим комплексную схему замещения контура с указанными направлениями векторов напряжений (рис. 15.а).

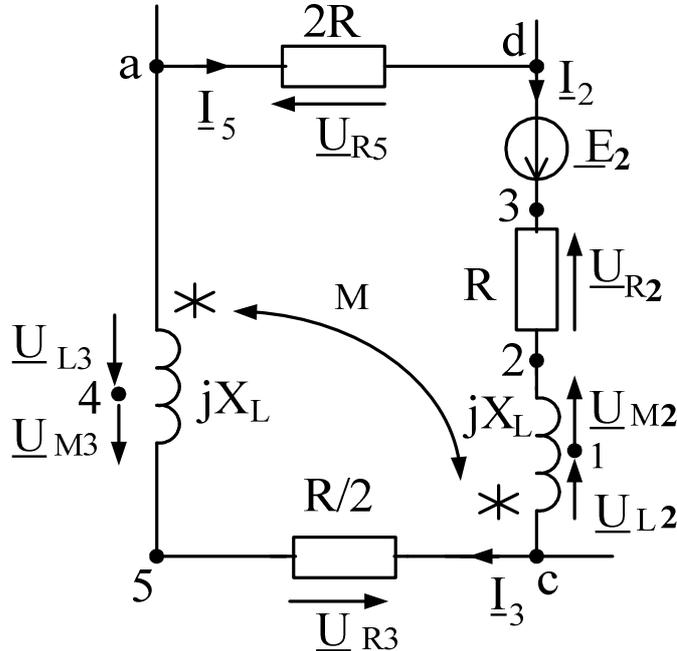


Рис.15а. К построению векторной диаграммы

На векторной диаграмме вектора напряжений направлены в точку высшего потенциала от которой течет ток, т.е. так, как показано на

рис.15а: \underline{U}_{L2} - направлено из точки **с** в точку **1**, \underline{U}_{M2} - направлено из точки **1** в точку **2**, \underline{U}_{R2} - направлено из точки **2** в точку **3**, ЭДС \underline{E}_2 направлено из точки **d** в точку **3**, \underline{U}_{R5} - направлено из точки **d** в точку **a**, \underline{U}_{L3} направлено из точки **a** в точку **4**, \underline{U}_{M3} направлено из точки **4** в точку **5**, \underline{U}_{R3} - из точки **5** в точку **с**.

Определим действующие значения напряжений на элементах цепи в заданном контуре (длины векторов):

$U_{L2} = I_2 \cdot X_L = 0.852 \cdot 110 = 93.72 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{L2} опережает вектор \underline{I}_2 на 90°);

$U_{M2} = I_3 \cdot X_M = 1.369 \cdot 55 = 73.5 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{M2} при согласном включении опережает вектор \underline{I}_3 на 90°);

$U_{R2} = I_2 \cdot R = 0.852 \cdot 110 = 93.72 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{R2} совпадает с вектором \underline{I}_2 по фазе);

$U_{R5} = I_5 \cdot 2R = 1.183 \cdot 220 = 260.26 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{R5} совпадает с вектором \underline{I}_5 по фазе);

$U_{L3} = I_3 \cdot X_L = 1.369 \cdot 110 = 150.6 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{L3} опережает вектор \underline{I}_3 на 90°);

$U_{M3} = I_2 \cdot X_M = 0.852 \cdot 55 = 46.86 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{M3} при согласном включении опережает вектор \underline{I}_2 на 90°);

$U_{R3} = I_3 \cdot \frac{R}{2} = 1.369 \cdot 55 = 75.3 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{R3} совпадает с вектором \underline{I}_3 по фазе).

Вектора токов и ЭДС строятся со своими углами:

$$\underline{I}_2 = 0.852 \cdot e^{-j137.2^\circ} \text{ А}, \quad \underline{I}_3 = 1.369 \cdot e^{j99^\circ} \text{ А}, \quad \underline{I}_5 = 1.183 \cdot e^{j20.7^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{E}_2 = 50 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ В}.$$

Все вектора токов строятся из начала координат комплексной плоскости, а для построения топографической диаграммы напряжений за нулевой потенциал можно принять любую точку схемы, например точку **с**, как принято в данном примере.

Лучевая векторная диаграмма токов и топографическая векторная диаграмма напряжений приведена на рис.16.

Примечание:

а) Если рассматриваемый контур содержит ветвь с параллельно включенными R и C , то при построении векторной диаграммы применяется эквивалентное преобразование данной ветви в последовательное соединение R_∂ и C_∂ . В данном примере (рис.15б)

$$\underline{Z}_4 = \frac{R \cdot (-j \cdot x_C)}{R - j \cdot x_C} = R_4 - j \cdot X_{C4} = \frac{110 \cdot (-j \cdot 110)}{110 - j \cdot 110} = 55 - j \cdot 55 \text{ Ом}$$

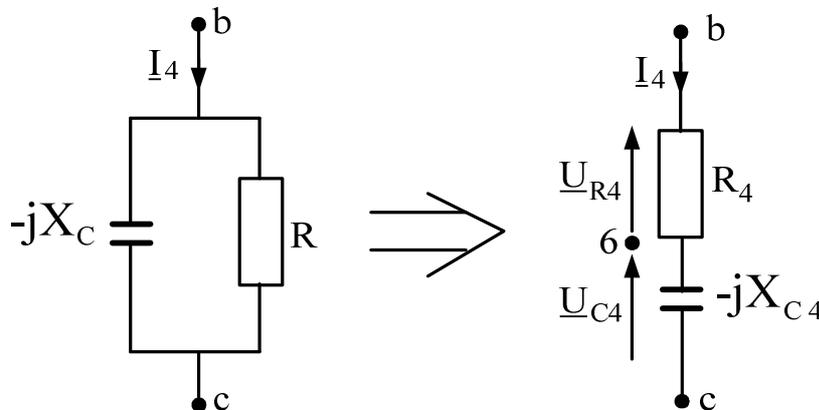


Рис.15б. Схема эквивалентного преобразования параллельного в последовательное соединение

$U_{C4} = I_4 \cdot X_{C4} = 1.974 \cdot 55 = 108.57 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{C4} отстает от вектора \underline{I}_4 на 90° и направлен из точки **с** в точку **6**);

$U_{R4} = I_4 \cdot R_4 = 1.974 \cdot 55 = 108.57 \text{ В}$ (вектор \underline{U}_{R4} совпадает с вектором \underline{I}_4 по фазе и направлен из точки **6** в точку **б**)

б) Если рассматриваемый контур содержит ветвь с источником тока, то вектор напряжения на источнике тока строится со своим углом и направлен по правилу векторного вычитания в точку с более высоким потенциалом. В данном примере (рис.15в) вектор напряжения $\underline{U}_J = 310 \cdot e^{j38.34^\circ} \text{ В}$ направлен из точки **д** в точку **б**.

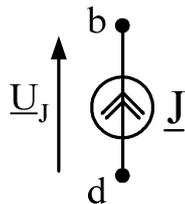


Рис.15в. К построению вектора напряжения на источнике тока

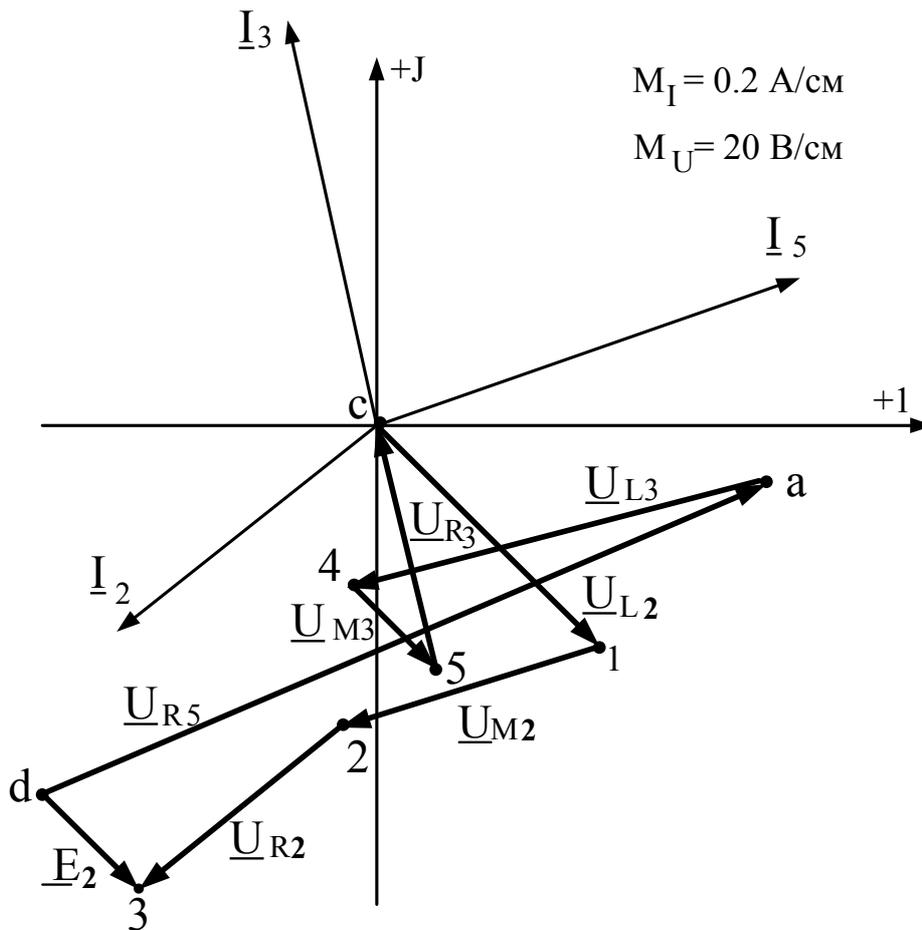


Рис.16. Лучевая диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений

Методические указания к расчету индивидуального домашнего задания № 3.

Методы расчета переходных процессов подробно изложены в [1,2]. Допустим, что четырехзначный номер задания соответствует следующей схеме из списка на рис.3 и ее параметрам из таблицы №4 (рис.17). Необходимо определить напряжение переходного процесса $u(t)$.

L	R	J	α
Гн	Ом	А	град
0.5	30	4	60

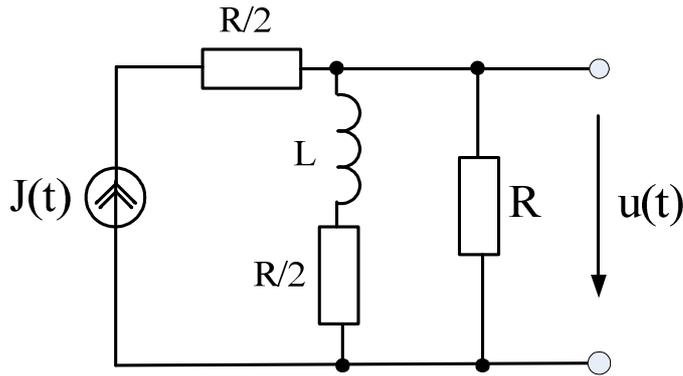


Рис.17. Схема для расчета переходного процесса

а) Расчёт переходного процесса в заданной схеме классическим методом при включении в момент времени $t = 0_+$ постоянного источника тока.

2. Запишем выражение для напряжения переходного процесса в цепи первого порядка: $u(t) = u_{np} + u_{св} = u_{np} + Ae^{Pt}$.
3. Определяем ННУ: $i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0$, поскольку до коммутации $J(0_-) = 0$.
4. Для определения ЗНУ $u(0_+)$ в момент времени $t = 0_+$ рисуем схему, в которой заменяем индуктивность на источник тока с величиной $i_L(0)$ (рис.18).
5. С учетом того, что $i_L(0) = 0$, получим $u(0_+) = J \cdot R = 4 \cdot 30 = 120 \text{ В}$

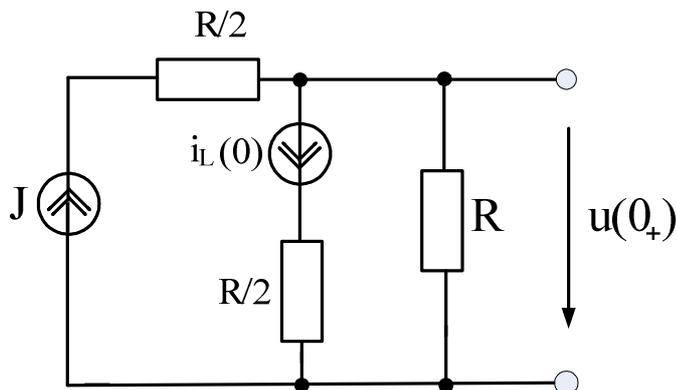


Рис.18. Схема для расчета ЗНУ

6. Принужденная составляющая соответствует значению напряжения в установившемся режиме после окончания переходного процесса, когда для постоянного тока J сопротивление индуктивности равно нулю.

$$u_{np}(t) = J \cdot \frac{R \cdot R/2}{R + R/2} = 4 \cdot \frac{30 \cdot 15}{30 + 15} = 40 \text{ В}$$

7. Корень характеристического уравнения определим из схемы на рис.19, которая получается путем замены L на pL . Ветвь с источником тока, имеющем бесконечно большое сопротивление убирается, а оставшаяся схема размыкается в любом месте. Относительно точек разрыва определяется сопротивление $Z(p) = 0$, из которого определяют корень характеристического сопротивления.

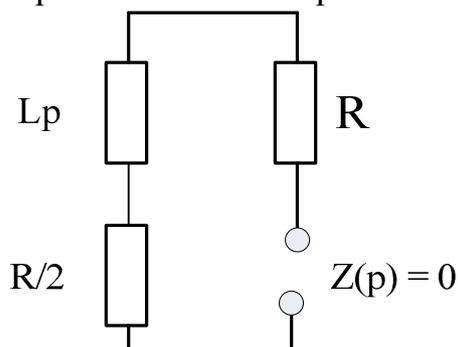


Рис.19. Схема для определения $Z(p)$

$$Z(p) = R + \frac{R}{2} + Lp = 0, \text{ отсюда } p = -\frac{3R}{2L} = -\frac{3 \cdot 30}{2 \cdot 0.5} = -90 \text{ 1/c}$$

8. Постоянную интегрирования A в выражении для свободной составляющей $u_{cb}(t)$ найдем из начальных условий. При $t = 0_+$ получим $u(0_+) = u_{np} + A$, отсюда $A = u(0_+) - u_{np} = 120 - 40 = 80 \text{ В}$
9. Записываем окончательный результат:

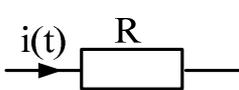
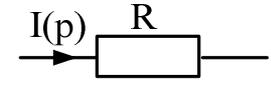
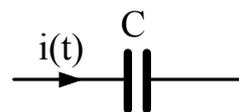
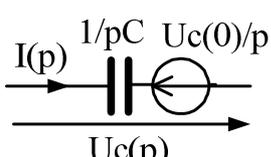
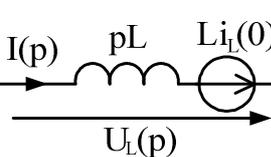
$$u(t) = 40 + 80 \cdot e^{-90 \cdot t} = 40 + 80 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ В},$$

где $\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{90} = 0.011 \text{ с}$ - постоянная времени переходного процесса.

Для расчета переходного процесса **операторным методом** составляется операторная схема замещения для цепи после коммутации, которая содержит изображения элементов обычной схемы. Метод основан на представлении интегралов и производных по времени алгебраическими функциями. Основы метода подробно изложены в [1,2], там же можно найти примеры прямого и обратного преобразований большинства используемых функций.

Изображения основных элементов цепи в операторной форме приведены в табл. №5.

Таблица №5

Элемент	Операторное изображение элемента	Взаимосвязь напряжений и токов
		Резистор: $U_R(p) = I(p) \cdot R$
		Ем-кость: $U_C(p) = I(p) / Cp + U_C(0) / p$
		Индуктивность: $U_L(p) = I(p) \cdot Lp - L \cdot i_L(0)$
		Источник ЭДС: Определяется видом функции. Для $e(t) = E$, $E(p) = E / p$. Аналогично для источника тока.

На рис.20 показана операторная схема замещения исследуемой цепи после коммутации.

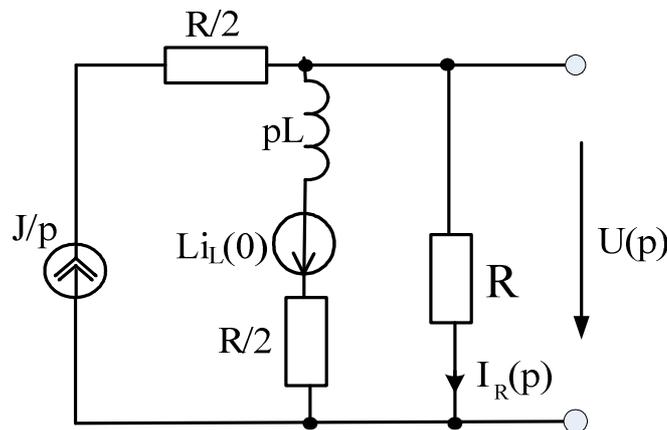


Рис.20. Операторная схема замещения

По закону Ома $U(p) = I_R(p) \cdot R$, так как $i_L(0) = 0$, то по правилу разброса $I_R(p) = \frac{J}{p} \cdot \frac{(R/2 + pL)}{R + R/2 + pL}$, окончательно получим:

$$U(p) = \frac{J \cdot R \cdot (R/2 + pL)}{p \cdot (pL + 3R/2)} = \frac{1800 + 60p}{p \cdot (0.5 \cdot p + 45)} = \frac{A(p)}{p \cdot B_1(p)}$$

По теореме разложения:

1. $B_1(p) = 0.5 \cdot p + 45 = 0$, отсюда $p_1 = -90$ 1/с;

2. $B_1'(p) = (0.5 \cdot p + 45)' = 0.5$;

3.
$$u(t) = \frac{A(0)}{B_1(0)} + \frac{A(p_1)}{p_1 \cdot B_1'(p_1)} \cdot e^{p_1 t} = \frac{1800}{45} + \frac{1800 + 60 \cdot (-90)}{(-90) \cdot 0.5} \cdot e^{-90t} =$$

$$= 40 + 80 \cdot e^{-90t} \text{ В}$$

Построим график на интервале $0 < t < 4\tau$, где $\tau = 0.011$ с.

Расчет графика сводим в таблицу:

t	0	τ	2τ	3τ	4τ
$40 + 80 \cdot e^{-t/\tau}$	120	69.4	50.82	44	41.4

График напряжения $u(t)$ переходного процесса показан на рис.21.

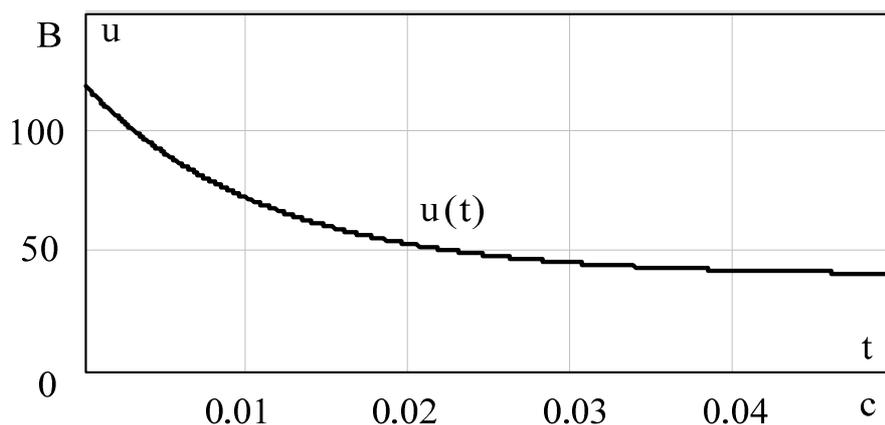


Рис.21. График напряжения переходного процесса

б) **Интеграл Дюамеля** применяют для расчёта тока или напряжения в ветвях схемы с нулевыми начальными условиями при действии единственного источника ЭДС или тока произвольной формы.

Наиболее распространённая форма записи:

$$f_p(t) = f(0) \cdot h(t) + \int_0^t f'(x) \cdot h(t-x) \cdot dx,$$

где $f_p(t)$ – искомая реакция цепи – ток или напряжение, $f(0)$ – начальное значение входного воздействия, $h(t)$ – переходная характеристика, $h(t-x)$ – переходная характеристика с учетом запаздывания, x –

переменная интегрирования (время запаздывания), $f'(x)$ – производная от входного воздействия – ЭДС или тока источника.

Переходная характеристика – это реакция линейной пассивной цепи в виде тока или напряжения переходного процесса на воздействие единичной функции, т. е. на подключение ее к источнику постоянного напряжения или постоянного тока единичной величины $E(0)=1В$ или $J(0)=1А$ при нулевых начальных условиях $i_L(0)=0$, $u_C(0)=0$. Переходная характеристика определяется классическим или операторным методом.

Порядок расчёта переходных процессов методом интеграла Дюамеля:

1. Классическим или операторным методом находят переходную характеристику $h(t)$.
2. Определяют запаздывающую переходную характеристику $h(t-x)$ путем замены t на $t-x$.
3. Вычисляют производную по времени x от входного воздействия – напряжения (тока) источника.
4. Записывают интеграл Дюамеля с момента времени $t=0$ до заданного t . При этом учитывают возможные скачки напряжения (тока) в начале и конце каждого интервала изменения входного сигнала.

Расчет переходного процесса в заданной схеме методом интеграла Дюамеля при воздействии прямоугольного импульса тока (рис.4.а) длительностью $t_1 = 3\tau$.

1. Определим переходную характеристику $h(t)$. Поскольку ранее переходный процесс рассматривался при включении источника постоянного тока $J(0) = 4 А$, а полученное выходное напряжение равнялось $U(t) = 40 + 80 \cdot e^{-90t} В$, то при включении источника тока величиной $1 А$ получим переходную характеристику:

$$h(t) = \frac{U(t)}{J} = \frac{40 + 80 \cdot e^{-90t}}{4} = 10 + 20 \cdot e^{-90t} \text{ Ом.}$$

2. Запаздывающая переходная характеристика: $h(t-x) = 10 + 20 \cdot e^{-90(t-x)} \text{ Ом}$
3. Для интервала времени $0 \leq t \leq t_1$, интеграл Дюамеля запишется

$$u(t) = J(0) \cdot h(t) + \int_0^t J'(t) \cdot h(t-x) \cdot dx,$$

поскольку $J'(t) = 0$, поэтому

$$u(t) = J(0) \cdot h(t) = 4 \cdot (10 + 20 \cdot e^{-90t}) = 40 + 80 \cdot e^{-90t} = 40 + 80 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ В}$$

где $\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{90} = 0.011 \text{ с}$ - постоянная времени переходного процесса,

$$t_1 = 3 \cdot \tau = 0.033 \text{ с}$$

4. Для интервала времени $t \geq t_1$ получим

$$u(t) = J(0) \cdot h(t) + (J(t_1) - J(0)) \cdot h(t - t_1),$$

где $J(t_1) = 0$ - значение тока после скачка в момент времени t_1 ;

$$h(t - t_1) = 10 + 20 \cdot e^{-90(t-0.033)} = 10 - 20 \cdot e^{-90t} \cdot e^3 = 10 + 401.7 \cdot e^{-90t} -$$

переходная характеристика, учитывающая время t_1 запаздывания скачка

источника тока. Окончательно получим:

$$\begin{aligned} u(t) &= 4 \cdot (10 + 20 \cdot e^{-90t}) + (0 - 4) \cdot (10 + 401.7 \cdot e^{-90t}) = -1526.84 \cdot e^{-90t} = \\ &= -1526.84 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ В} \end{aligned}$$

Расчет графика сводим в таблицу:

	$0 \leq t \leq t_1$				$t \geq t_1$			
$t \cdot 10^{-3}, \text{с}$	0	τ	$2 \cdot \tau$	$3 \cdot \tau$	$3 \cdot \tau$	$4 \cdot \tau$	$5 \cdot \tau$	$6 \cdot \tau$
$u(t), \text{В}$	120	69.4	50.82	44	-76	-27.9	-10.3	-3.78

График этой функции представлен на рис.22.

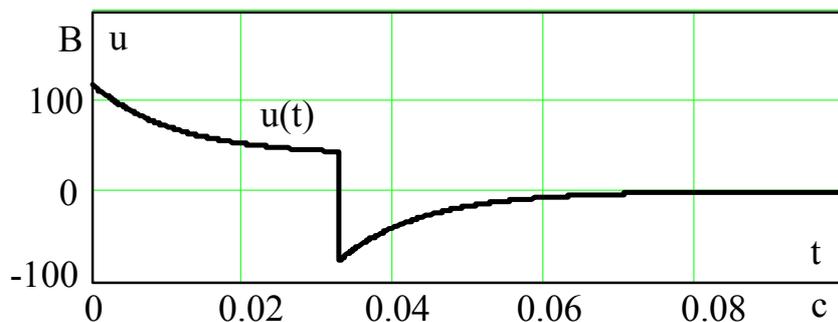


Рис.22. График напряжения переходного процесса

Расчет переходного процесса в заданной схеме методом интеграла Дюамеля при воздействии импульса тока сложной формы (рис.4.б) длительностью $t_1 = 3\tau$.

1. Запишем график тока $J(t)$ в интервале $0 < t < t_1$, который является отрезком прямой, ограниченной точками $(0, J(0))$ и $(t_1, 0)$. Уравнение прямой, проходящей через эти точки

2. $J(t) = -k \cdot t + b = -121.2 \cdot t + 4 \text{ A}$, где $k = -\frac{J(0)}{t_1} = -\frac{4}{0.033} = -121.2 \text{ A/c}$

3. Определим производную тока $J'(t) = J'(x) = -121.2 \text{ A/c}$

4. Переходная характеристика $h(t) = 10 + 20 \cdot e^{-90t}$, запаздывающая переходная характеристика $h(t-x) = 10 + 20e^{-90(t-x)}$

5. Записываем интеграл Дюамеля для интервала $0 \leq t < t_1$

$$\begin{aligned} U(t) &= J(0) \cdot h(t) + \int_0^t J'(x) \cdot h(t-x) \cdot dx = \\ &= 4 \cdot (10 + 20 \cdot e^{-90t}) - 121.2 \cdot \int_0^t (10 + 20) \cdot e^{-90(t-x)} \cdot dx = \\ &= 40 + 80 \cdot e^{-90t} - 1212 \cdot t - \frac{2424}{90} \cdot e^{-90t} \cdot (e^{90t} - 1) = \\ &= 13 - 1212 \cdot t + 107 \cdot e^{-90t} \text{ B} \end{aligned}$$

6. Записываем интеграл Дюамеля для интервала $t > t_1$.

При $t > t_1$ $J(t) = 0$, поэтому $U(t)$ не будет содержать дополнительных составляющих, а в интеграле меняется верхний предел t на t_1 .

$$\begin{aligned} U(t) &= J(0) \cdot h(t) + \int_0^{t_1} J'(t) \cdot h(t-x) \cdot dx = 4 \cdot (10 + 20 \cdot e^{-90t}) - \\ &- 121.2 \cdot \int_0^{t_1} (10 + 20 \cdot e^{-90(t-x)}) \cdot dx = 40 + 80 \cdot e^{-90t} - 1212 \cdot t_1 - 2424e^{-90t} \cdot \left[\int_0^{t_1} e^{90x} \cdot dx \right] = \\ &= 40 + 80e^{-90t} - 1212 \cdot 0.033 - \frac{2424}{90} \cdot e^{-90t} \cdot \left[(e^{90 \cdot 0.033} - 1) \right] = 80e^{-90t} - \\ &- 514 \cdot e^{-90t} = -434 \cdot e^{-90t} \text{ B}; \end{aligned}$$

Расчет графика сводим в таблицу:

	$0 \leq t \leq t_1$				$t \geq t_1$			
$t \cdot 10^{-3}, \text{c}$	0	τ	$2 \cdot \tau$	$3 \cdot \tau$	$3 \cdot \tau$	$4 \cdot \tau$	$5 \cdot \tau$	$6 \cdot \tau$
$u(t), \text{B}$	120	39	0.816	-21.6	-21.6	-7.95	-2.92	-1.07

График $U(t)$ для данного случая приведен на рис.23.

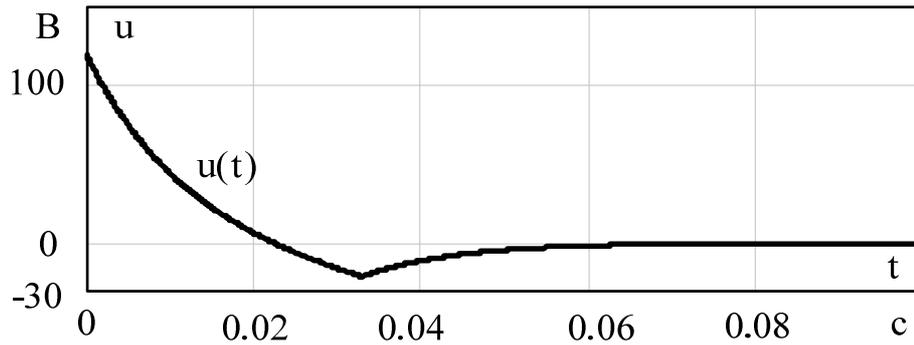


Рис.23. График напряжения переходного процесса

в) **Расчет переходного процесса в заданной схеме классическим методом при гармоническом источнике: $j(t) = 4 \cdot \sin(\omega t + 60^\circ)$ А на интервале времени $0 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}$.**

1. Определяем угловую частоту из условия $X_L = R$;

$$X_L = \omega \cdot L = R = 30 \text{ Ом}; \quad \omega = \frac{R}{L} = \frac{30}{0.5} = 60 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

2. Запишем выражение для напряжения переходного процесса в цепи первого порядка: $u(t) = u_{np} + u_{св} = u_{np} + Ae^{Pt}$;
3. Определяем ННУ: $i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0$, поскольку до коммутации $J(0_-) = 0$;
4. Для определения ЗНУ $u(0_+)$ в момент времени $t = 0_+$ рисуем схему, в которой заменяем индуктивность на источник тока с величиной $i_L(0)$, определяем также $J(0) = 4 \cdot \sin 60^\circ = 3.46$ А (рис.23)

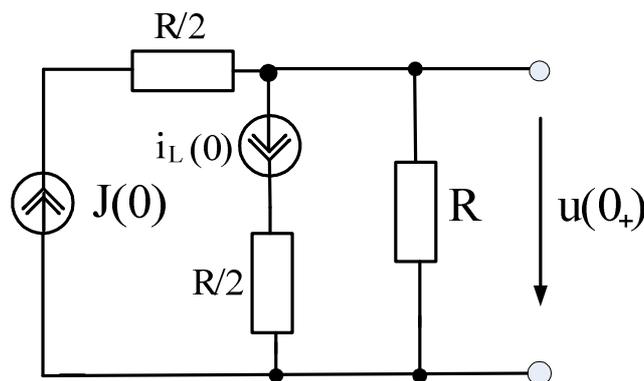


Рис.23. Схема для расчета ЗНУ

С учетом того, что $i_L(0) = 0$, получим $u(0_+) = J(0) \cdot R = 3.46 \cdot 30 = 104 \text{ В}$;

5. Расчет принужденной составляющей ведем с помощью комплексной схемы замещения цепи после коммутации для амплитудных значений (рис.24)

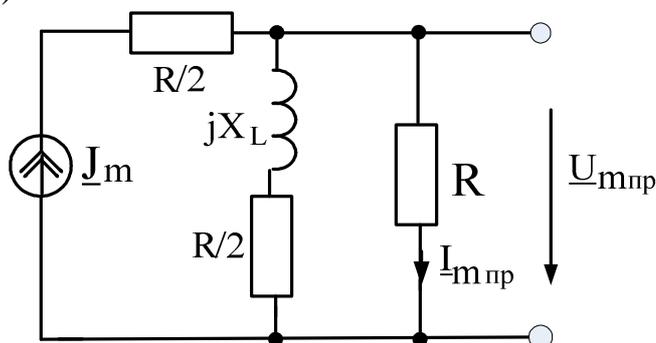


Рис.24. Схема для расчета принужденной составляющей

По правилу разброса:

$$\underline{I}_{mnp} = \underline{J}_m \cdot \frac{R/2 + jX_L}{3R/2 + jX_L} = 4 \cdot e^{j60^\circ} \cdot \frac{15 + j \cdot 30}{45 + j \cdot 30} = 2.48 \cdot e^{j89.75^\circ} \text{ A.}$$

$$\text{Тогда } \underline{U}_{mnp} = \underline{I}_{mnp} \cdot R = 2.48 \cdot e^{j89.75^\circ} \cdot 30 = 74.46 \cdot e^{j89.75^\circ} \text{ В}$$

Мгновенное значение напряжения $u_{np}(t) = 74.46 \cdot \sin(150 \cdot t + 89.75^\circ) \text{ В}$

В момент времени $t = 0$ получим $u_{np}(0) = 74.46 \cdot \sin 89.75^\circ = 74.45 \text{ В}$

6. Корень характеристического уравнения такой же, как и для схемы, изображенной на рис.19: $p = -90 \text{ 1/с}$, постоянная времени $\tau = 0.011 \text{ с}$
7. Постоянную интегрирования A в выражении для свободной составляющей $u_{св}(t)$ найдем из начальных условий. При $t = 0_+$ получим: $u(0_+) = u_{np}(0) + A$, отсюда $A = u(0_+) - u_{np} = 104 - 74.45 = 29.55 \text{ В}$
9. Записываем окончательный результат:

$$u(t) = 74.46 \cdot \sin(60 \cdot t + 89.75^\circ) + 29.55 \cdot e^{-90t} = 74.46 \cdot \sin(60 \cdot t + 89.75^\circ) + 29.55 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ В}$$

$$\text{Период синусоиды } T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{6.28}{60} = 0.104 \text{ с.}$$

10. Для расчета графика синусоиды удобно задать приращение времени $\Delta t = \frac{T}{12} = \frac{0.104}{12} = 8.66 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, что соответствует изменению аргумента синусоиды на $\Delta\gamma = \omega \cdot \Delta t = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \frac{T}{12} = \frac{\pi}{6} \text{ рад} = 30^\circ$. Расчет графика принужденной составляющей $u_{np}(t)$ сводим в таблицу:

t	0	Δt	$2\Delta t$	$3\Delta t$	$4\Delta t$
$\omega \cdot t + 89.75^{\circ}$	89.75°	119.75°	149.75°	179.75°	209.75°
$74.46 \cdot \sin(150 \cdot t + 89.75^{\circ})$	74.45	64.6	37.5	0.32	-36.9

$5\Delta t$	$6\Delta t$	$7\Delta t$	$8\Delta t$	$9\Delta t$	$10\Delta t$	$11\Delta t$	$12\Delta t$
239.75°	269.75°	299.75°	329.75°	359.75°	389.75°	419.75°	449.75°
-64.32	-74.45	-64.6	-37.5	-0.32	36.9	64.32	74.45

11. Расчет графика свободной составляющей $u_{св}(t)$ также сводим в таблицу:

t	0	τ	2τ	3τ	4τ
$29.55 \cdot e^{-t/\tau}$	29.55	10.87	4	1.47	0.54

12. Графики принужденной $u_{np}(t)$, свободной $u_{св}(t)$ составляющих и результирующий график $u(t)$ приведены на рис.25. Результирующий график $u(t)$ строится путем графического сложения $u_{np}(t)$ и $u_{св}(t)$ вдоль оси напряжения при одинаковых значениях времени t .

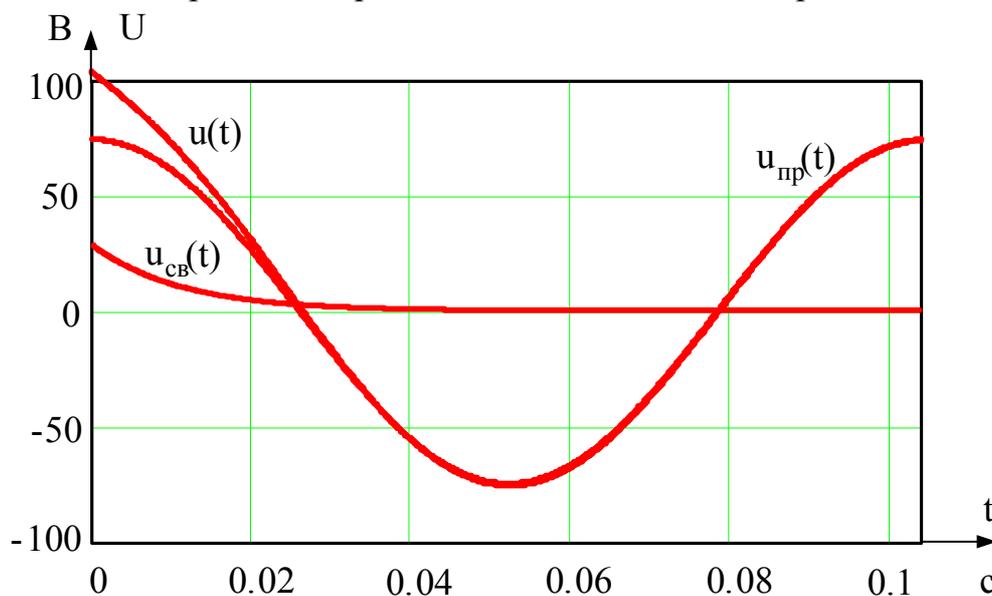


Рис. 25. График напряжения переходного процесса

Список литературы

1. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 526 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1996. – 559 с.
3. Р.Н.Сметанина, Г.В.Носов, Ю.Н.Исаев Теоретические основы электротехники. Часть 1. – Томск: Изд. ТПУ, 2005.– 107 с.
4. Сборник задач и упражнений по ТОЭ/ Под. ред. П.А. Ионкина. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 768 с.

