

# **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

**Расчетно-графическая работа  
№3**

© Теоретические основы электротехники: учеб. пособие. / К.В. Киреев, В.Е. Высоцкий, А.П. Новикова. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. [РГР№4]

## **ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ**

При изучении курса ТОЭ студенты приобретают необходимые знания об основных методах расчета и физических процессах, происходящих в электрических цепях и электромагнитных полях. Одним из основных видов самостоятельной работы по курсу является выполнение расчетно-графических работ.

Расчетно-графические работы планируются и выполняются с целью:

- углубления и закрепления теоретических знаний;
- приобретения навыков выполнения электротехнических расчетов, освоения технической документации;
- проверки усвоения учебного материала курса.

К представленным работам предъявляются следующие требования:

1. Основные положения и этапы решения задач должны быть достаточно подробно пояснены.

2. Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены на отдельном листе бумаги, аккуратно и в удобочитаемом масштабе.

3. В работе следует оставлять поля шириной не менее 4 см для замечаний рецензента.

4. Вычисления должны быть проведены с точностью до третьей значащей цифры.

5. Работа должна быть датирована и подписана студентом.

6. Незачтенное задание должно быть выполнено заново и сдано на повторную проверку вместе с первоначальной работой и замечаниями преподавателя. Исправления ошибок в отрецензированном тексте не допускаются. Если неправильно выполнена не вся работа, а только ее часть, то переработанный и исправленный текст следует записать после первоначального текста под заголовком «Исправление ошибок».

Работа зачитывается, если решения не содержат ошибок принципиального характера и выполнены все перечисленные требования.

Работа над 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 наименование узлов, сопротивлений, а также обозначения, заданные условием. При решении одной и той же задачи различными методами одну и ту же величину следует обозначить одним и тем же буквенным символом.

4. Расчет каждой искомой величины следует выполнить сначала в общем виде, а затем в полученное выражение подставить числовые значения и привести окончательный результат с указанием единиц измерения.

5. При решении системы уравнений целесообразно воспользоваться матричным методом с последующим использованием вычислительной техники.

6. Промежуточные и конечные результаты расчетов должны быть ясно выделены из общего текста.

### **Оформление работы**

1. Работа оформляется на бумаге форматом 210×297 мм (А4) в соответствии с требованиями ЕСКД и действующих ГОСТов и стандартов учебного заведения.

2. Образец титульного листа приведен на стр. 15.

3. Работа должна содержать разделы, отражающие все этапы расчета (каждый этап должен иметь свой подзаголовок):

3.1. Номер, название и цель работы.

3.2. Предварительные сведения. Приводятся исходные данные, расчетная схема, расчетные формулы, результаты предварительных расчетов.

3.3. Основные расчеты приводятся сначала в общем виде, а затем с подстановкой числовых значений. Формулы обозначаются порядковыми номерами в скобках. Решение не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований и арифметических расчетов.

Результаты расчетов сводятся в таблицы, приводятся все формулы, по которым делались эти расчеты, поясняющие диаграммы и графики, краткий анализ результатов.

3.4. Графическая часть отчета (схемы, таблицы, диаграммы, графики) выполняется с применением чертежных инструментов или с помощью соответствующих программных пакетов. Для элементов электрических схем следует пользоваться обозначениями, приведенными в учебниках по ТОЭ.

4. Графики строят в прямоугольной системе координат, где по горизонтальной оси (оси абсцисс) откладывают независимую физическую величину, а по вертикальной оси (оси ординат) – зависимую физическую величину. Графики, отражающие закономерные зависимости величин, вычерчиваются плавными линиями. Чтобы масштабная шкала легко читалась, необходимо выбрать удобную для восприятия цену деления шкалы. После нанесения масштабных делений на осях указывают их значения.

5. По каждому этапу в работе приводятся обобщения и выводы. В выводах подчеркиваются основные теоретические положения и практическое значение исследуемых явлений.

6. В конце отчета помещается список литературы и программного обеспечения, использованных при выполнении и оформлении расчетно-графической работы.

**РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ  
(напряжение источника постоянное)**

Исходная схема цепи представлена на рис. 1.

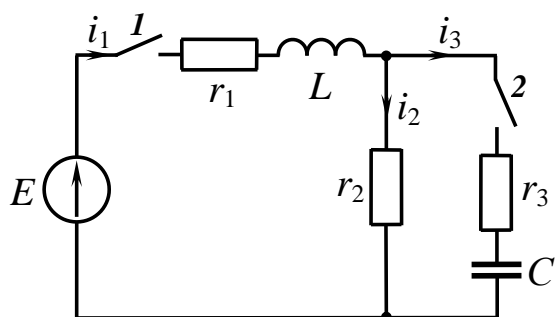


Рис. 1.1

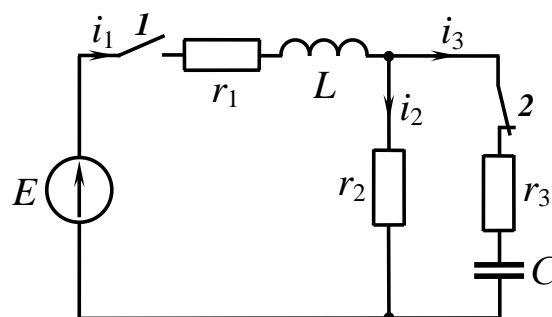


Рис. 1.2

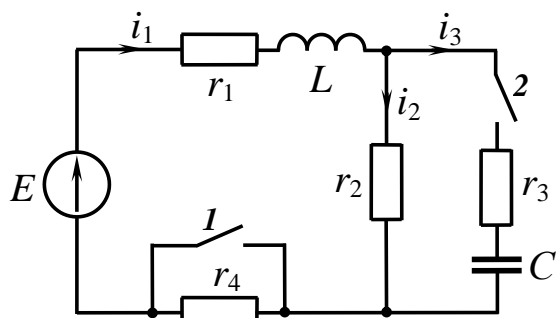


Рис. 1.3

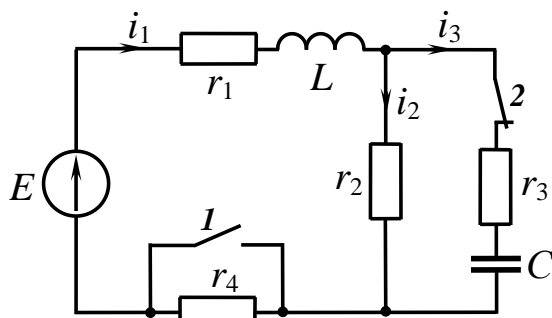


Рис. 1.4

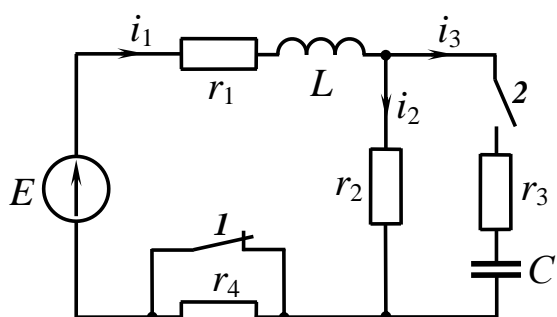


Рис. 1.5

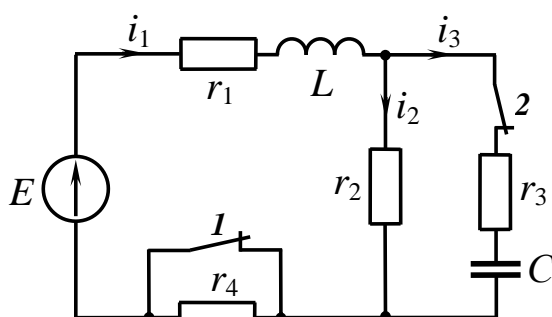


Рис. 1.6

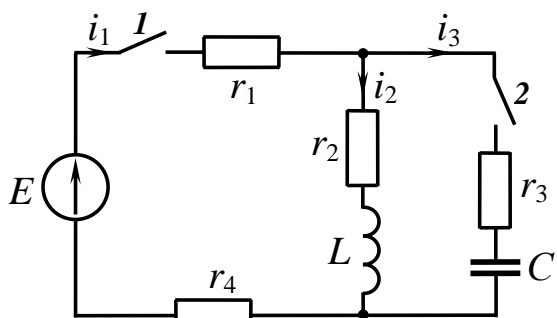


Рис. 1.7

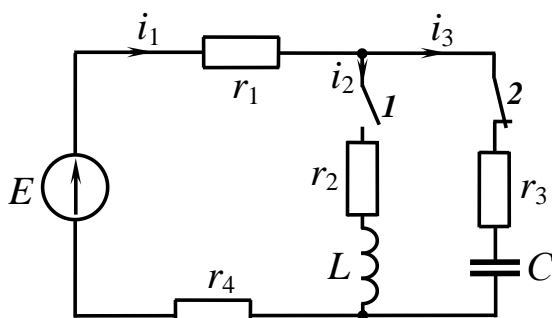


Рис. 1.8

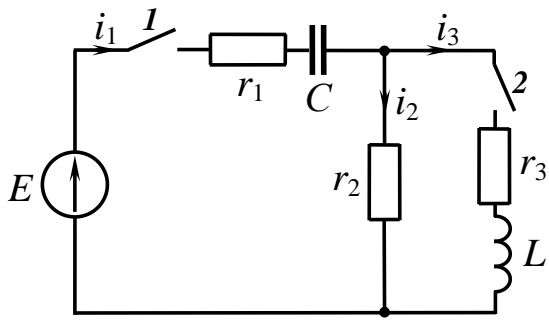


Рис. 1.9

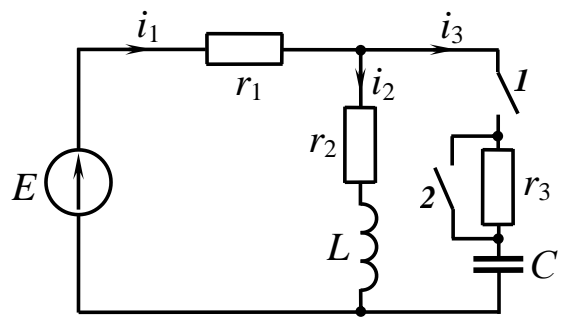


Рис. 1.10

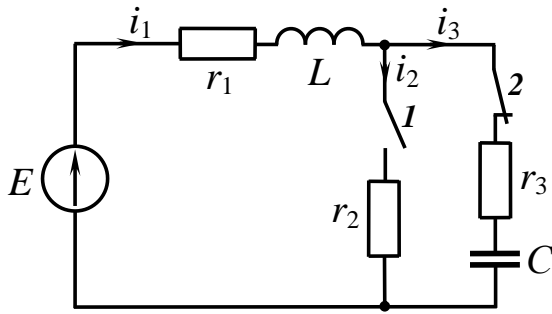


Рис. 1.11

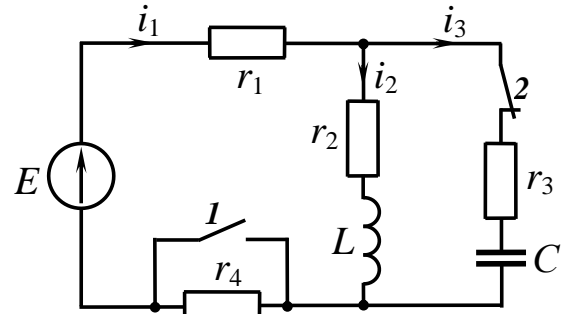


Рис. 1.12

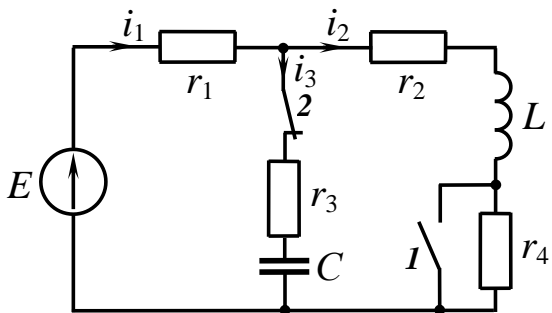


Рис. 1.13

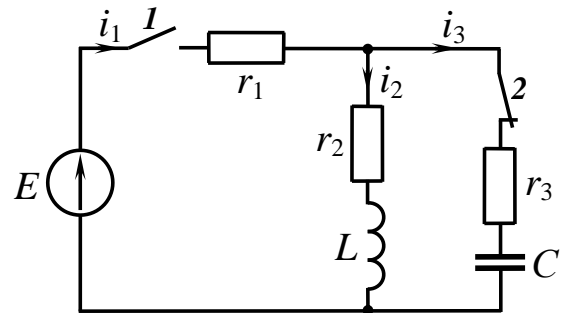


Рис. 1.14

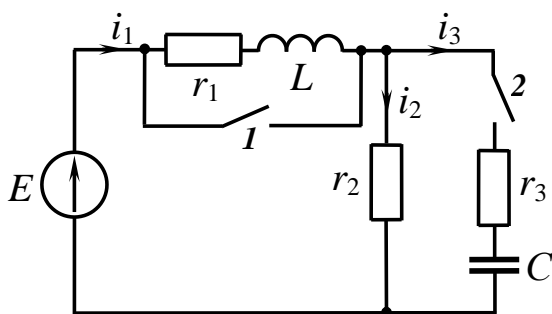


Рис. 1.15

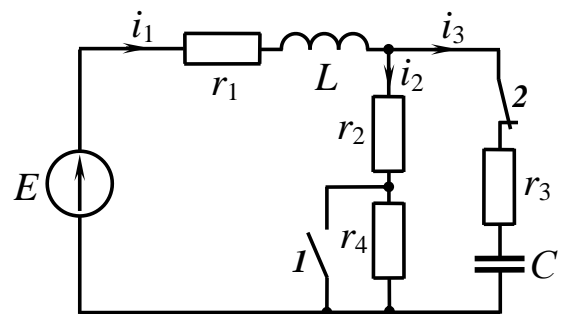


Рис. 1.16

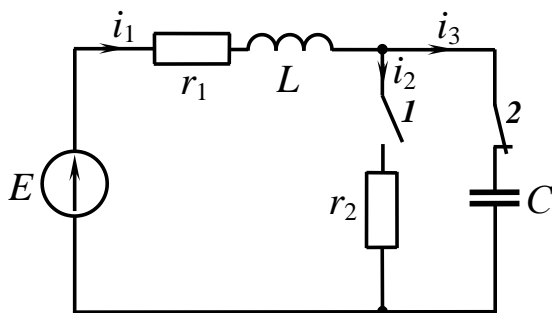


Рис. 1.17

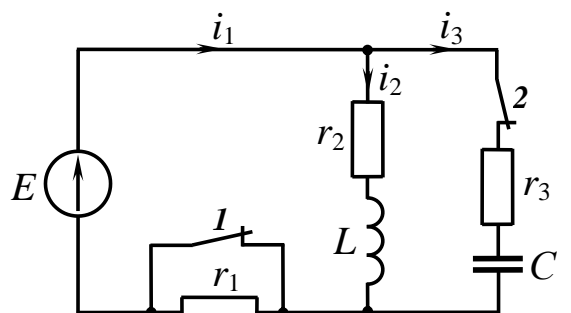


Рис. 1.18

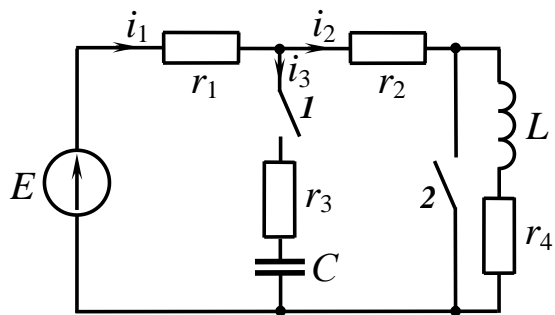


Рис. 1.19

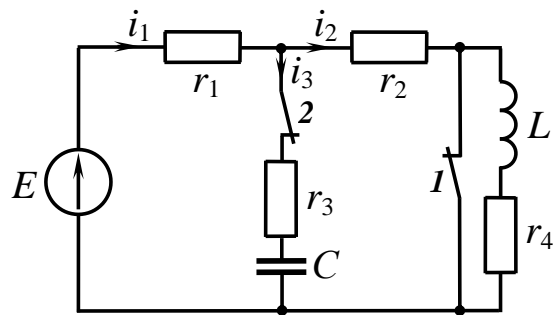


Рис. 1.20

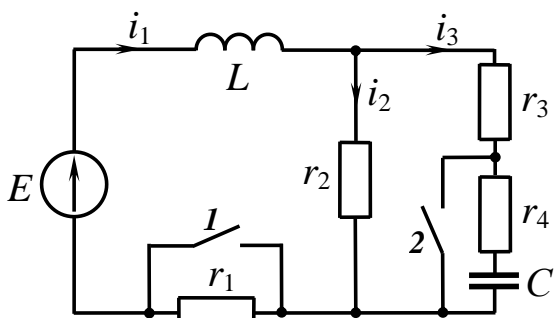


Рис. 1.21

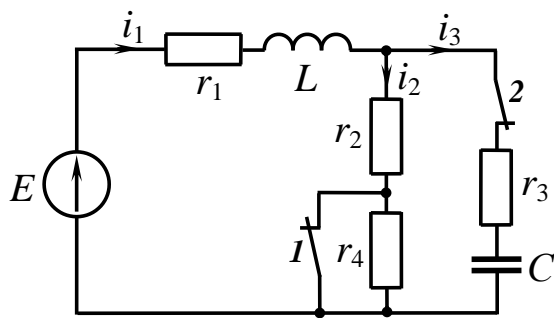


Рис. 1.22

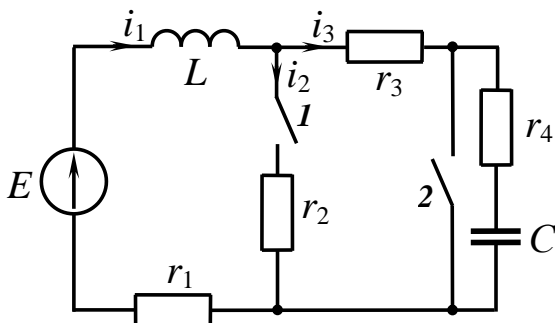


Рис. 1.23

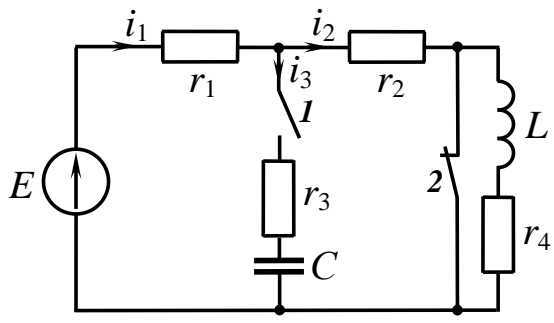


Рис. 1.24

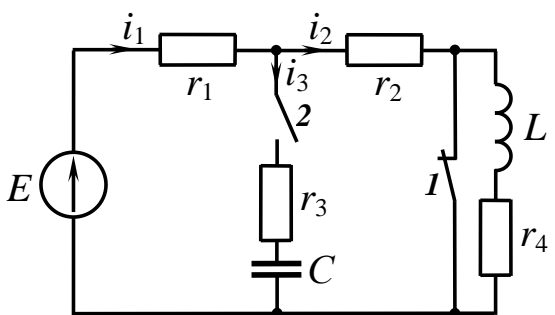


Рис. 1.25

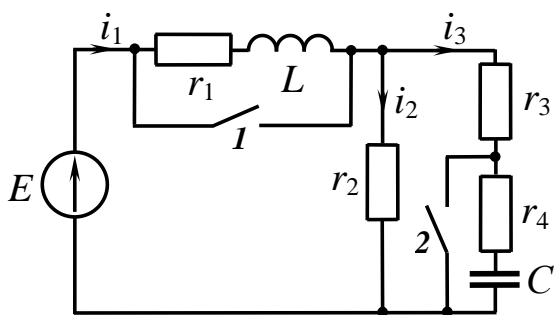


Рис. 1.26

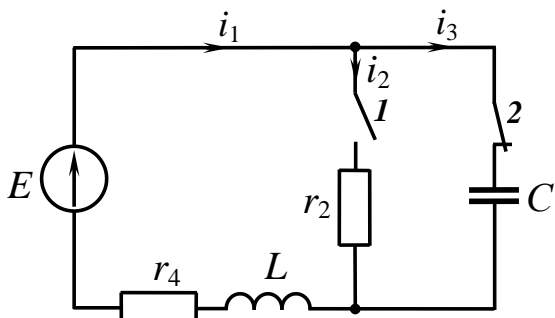


Рис. 1.27

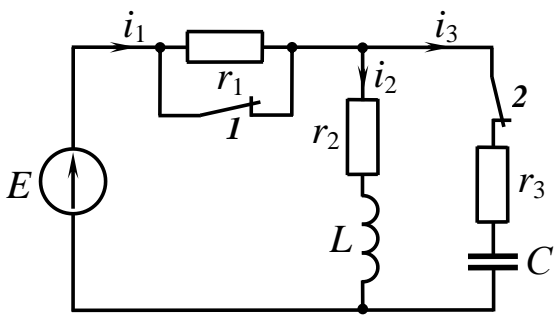


Рис. 1.28

Порядок срабатывания ключей соответствует их номерам, указанным на схеме.

Промежуток времени между работой ключей определяется следующим образом:

– при комплексно-сопряженных корнях  $p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_0$

$$\Delta t = \frac{1}{\delta};$$

– при действительных корнях

$$\Delta t = \frac{1}{|p_{\min}|}.$$

Для всех вариантов постоянная ЭДС источника  $E = 100$  В, индуктивность  $L = 0,2$  Гн. Остальные параметры цепи указаны в табл. 1.

Таблица 1

№ группы	$r_1$ , Ом	$r_2$ , Ом	$r_3$ , Ом	$r_4$ , Ом	$C$ , мкФ
1	20	20	20	10	100
2	20	20	20	20	200
3	25	25	25	10	100
4	25	25	25	25	200
5	20	20	25	25	100
6	20	20	25	25	200
7	25	25	20	20	100
8	25	25	20	20	200
9	25	25	25	15	150
10	15	15	15	15	150

Для заданной схемы требуется:

- 1) найти токи  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  после замыкания (размыкания) ключей классическим методом;
- 2) найти ток  $i_2(t)$  операторным методом;
- 3) построить кривую тока  $i_2(t)$ .



## Методические указания

На схеме коммутация условно показана срабатыванием ключа (рис. 2, *a* – замыкающий ключ, *б* – размыкающий ключ).



Рис. 2

Перед расчетом переходного процесса тем или иным методом необходимо определить *независимые начальные условия*.

На этом этапе расчета рассматривается электрическая цепь до коммутации (ключ еще не сработал) и в полученной схеме любым известным методом расчета установившихся режимов определяются значения тока в ветви с индуктивным элементом  $i_L(0_-)$  и напряжения на емкостном элементе  $u_C(0_-)$  в момент времени  $t = 0_-$  непосредственно до коммутации. Далее по законам коммутации определяют независимые начальные условия.

### **Последовательность расчета классическим методом.**

#### **1. Определение принужденных составляющих.**

Для этого необходимо рассчитать установившийся режим в послекоммутационной цепи (при  $t \rightarrow \infty$ ).

На этом этапе расчета рассматривается схема электрической цепи после коммутации (ключ уже сработал), и в полученной схеме для установившегося режима рассчитываются все необходимые токи и напряжения, а также находятся их значения в момент  $t = 0_+$ .

#### **2. Определение свободных составляющих.**

2.1. Составляется характеристическое уравнение. Для этого, например, записывается комплекс входного сопротивления  $Z_{вх}(j\omega)$  относительно разрыва любой ветви, затем  $j\omega$  заменяется на  $p$  и полученное выражение  $Z_{вх}(p)$  приравнивается к нулю:  $Z_{вх}(p) = 0$ . Получаем характеристическое уравнение.

2.2. Находятся корни характеристического уравнения. Для этого необходимо решить уравнение  $Z_{\text{вх}}(p) = 0$ .

2.3. В зависимости от вида найденных корней записывается выражение для свободной составляющей в общем виде.

Если один корень:

$$p < 0, \quad \text{то } i_{\text{св}}(t) = Ae^{pt}.$$

Если два корня:

$$p_1 \neq p_2, \quad \text{то } i_{\text{св}}(t) = A_1e^{p_1t} + A_2e^{p_2t};$$

$$p_1 = p_2 = p, \quad \text{то } i_{\text{св}}(t) = A_1e^{pt} + A_2te^{pt};$$

$$p_1 = -\delta \pm j\omega_0, \quad \text{то } i_{\text{св}}(t) = Ae^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \psi).$$

2.4. Находятся постоянные интегрирования ( $A, A_1, A_2, \psi$ ) для свободных составляющих.

Определение постоянных интегрирования производят путем совместного решения системы линейных алгебраических уравнений для мгновенных значений по известным значениям корней характеристического уравнения, а так же по известным значениям свободной составляющей и ее производных, взятых при  $t = 0_+$ .

2.5. Записываются свободные составляющие искомых величин в окончательном виде.

### 3. Нахождение тока переходного процесса.

Искомая величина находится как сумма принужденной и свободной составляющих:

$$i(t) = i_{\text{нп}}(t) + i_{\text{св}}(t).$$

### **Последовательность расчета операторным методом.**

1. Получение операторного изображения искомой функции времени.

1. Составляется послекоммутационная операторная схема замещения цепи. На этой схеме вместо ЭДС, напряжений и токов указываются их операторные изображения, а элементы цепи представляют-

ся соответствующими операторными сопротивлениями и внутренними ЭДС.

Ненулевые независимые начальные условия учитываются введением в схему внутренних ЭДС:

- ЭДС  $Li_L(0_+)$  в ветвь с индуктивным элементом (согласно току);
- ЭДС  $\frac{u_C(0_+)}{p}$  в ветвь с емкостным элементом (встречно току).

2. Для полученной операторной схемы замещения составляется система уравнений, например, по методу законов Кирхгофа, которая решается относительно операторного изображения искомой величины – тока  $I(p)$  или напряжения  $U(p)$ .

*II. Переход от операторного изображения к функции времени (оригиналу) с помощью формулы разложения.*

1. Изображение функции представляем в виде отношения

$$I(p) = \frac{N(p)}{M(p)}.$$

2. Знаменатель  $M(p)$  приравниваем к нулю:  $M(p) = 0$ .

3. Решаем полученное уравнение и находим его корни  $p_k$ .

4. Берем производную от знаменателя  $M(p)$  по  $p$ :  $M'(p)$ .

5. Подставляем полученные значения корней  $p_k$  в  $N(p)$  и  $M'(p)$  и находим их численные значения:  $N(p_k)$  и  $M'(p_k)$ .

6. Находим оригинал  $i(t)$  путем подстановки найденных значений в формулу разложения:

$$i(t) = \sum \frac{N(p_k)}{M'(p_k)} e^{p_k t} = \frac{N(p_1)}{M'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{N(p_2)}{M'(p_2)} e^{p_2 t} + \dots$$

Формула разложения применима при любых начальных условиях и при любых практически встречающихся формах напряжения (тока) источника. Однако, если среди корней уравнения  $M(p) = 0$  имеются кратные корни, то рекомендуется использовать таблицы соответствия.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем обусловлены переходные процессы в электрических цепях?
2. Что называется коммутацией?
3. Что понимают под начальными условиями переходного процесса? Какие из начальных условий относятся к независимым?
4. Сформулируйте законы коммутации. В каких случаях необходимо использовать законы коммутации в обобщенной форме?
5. Как определяется порядок дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс?
6. В чем состоит сущность классического метода расчета переходных процессов?
7. Как рассчитывается принужденная составляющая тока (напряжения) в классическом методе? Чем определяется ее вид?
8. Как рассчитывается свободная составляющая тока (напряжения) в классическом методе? Чем определяется ее вид?
9. В каких цепях и при каких условиях возможен колебательный характер переходного процесса?
10. Чем определяется число корней характеристического уравнения?
11. Что такое постоянная времени цепи?
12. В чем состоит сущность расчета переходных процессов операторным методом?
13. Какие этапы включает в себя операторный метод расчета переходных процессов?
14. Как записывается операторное сопротивление участка цепи?
15. Что такое операторная схема замещения?
16. Как при расчете операторным методом учитываются ненулевые независимые начальные условия? Что такое внутренняя ЭДС?
17. Какими способами осуществляется переход от изображения к оригиналу?
18. Как связаны изображение и оригинал в формуле разложения?
19. Проведите сравнительный анализ классического и операторного методов расчета.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Демирчян К.С., Л.Р. Нейман Л.Р., Коровкин Н.В.* Теоретические основы электротехники: учебник для вузов: в 2 т. – М.; СПб.: Питер, 2009.
2. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. – М.: Юрайт, 2016.
3. *Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи: учебник. – М.; СПб.: Лань. 2010.
4. *Киреев К.В., Мякишев В.М.* Теоретические основы электротехники: Линейные цепи постоянного и синусоидального тока. Трехфазные цепи. Цепи несинусоидального тока: учеб. пособ. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2014.
5. *Киреев К.В., Мякишев В.М.* Теоретические основы электротехники: Переходные процессы. Магнитные цепи. Длинные линии: учеб. пособ. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2014.
6. *Киреев К.В.* Теоретическая электротехника: Виртуальная лаборатория в Multisim 10. Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока. – М.: Энергоатомиздат, 2008.
7. *Киреев К.В.* Теоретическая электротехника: Виртуальная лаборатория в Multisim 11. Переходные процессы в линейных электрических цепях. – М.: Машиностроение, 2012.
8. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: в 2 т. / *П.А. Бутырин, Л.В. Алексейчик, С.А. Важнов* и др.; под ред. чл.-корр. РАН *П.А. Бутырина*. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
9. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / *Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди, С.Е. Рисовская, С.А. Миленина, В.П. Каменская*. – М.: Высш. шк., 2003.
10. Задачник по теории линейных электрических цепей / *М.Р. Шебес, М.В. Каблукова*. – М.: Высш. шк., 1990.
11. *Коровкин Н.В., Семина Е.Е., Чечурин В.Л.* Теоретические основы электротехники. Сборник задач: учеб. пособ. для вузов. – СПб.: Питер, 2006.
12. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах: практ. пособ. / *В.А. Прянишников, Е.А. Петров, Ю.М. Осипов*. – СПб.: Корона-принт, 2001.
13. *Башарин С.А., Федоров В.В.* Теоретические основы электротехники: учеб. пособ. – М.: АСАДЕМА, 2004.
14. *Евдокимов Ф.Е.* Теоретические основы электротехники: учебник. – М.: АСАДЕМА, 2004.

15. *Батура М.П., Кузнецов А.П., Курулев А.П.* Теория электрических цепей: учебник. – Минск: Вышэйш. шк., 2007.
16. *Бакалов В.П., Журавлева О.Б., Крук Б.И.* Основы анализа цепей: учеб. пособ. – М.: Горячая линия - Телеком, 2007.
17. *Бутырин П.А., Коровкин Н.В.* Теоретические основы электротехники. Интернет-тестирование базовых знаний: учеб. пособие.– М.; СПб.: Лань. 2010.
18. *Киреев К.В.* Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока: лабораторный практикум. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2012.
19. *Киреев К.В.* Линейные электрические цепи синусоидального тока: лабораторный практикум. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2013.
20. *Киреев К.В.* Электрические цепи несинусоидального тока: лабораторный практикум. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2013.

*Пример оформления титульного листа*

Самарский государственный технический университет  
Кафедра «Теоретическая и общая электротехника»

**Расчетно-графическая работа №3**

**РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ**

*Вариант №* \_\_\_

Выполнил студент \_\_\_\_\_  
*(Курс, факультет, группа, ФИО)*

Принял \_\_\_\_\_  
*(Должность, ФИО преподавателя)*

Самара – 20\_\_\_