

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»**

Кафедра общей электротехники

Составитель  
Т. М. Черникова

## **РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЦЕПИ**

**Методические указания к курсовой работе  
по дисциплине «Теоретические основы электротехники»**

Рекомендованы учебно-методической комиссией направления  
подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
в качестве электронного издания  
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2019

## Рецензенты

Дабаров В. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры общей электротехники;

Маслов И. П. – кандидат технических наук, председатель учебно-методической комиссии направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

### **Черникова Татьяна Макаровна.**

**Расчет электромагнитной цепи:** методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники» [Электронный ресурс]: направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения / сост.: Т. М. Черникова; КузГТУ. – Кемерово, 2019.

Даны рекомендации к выполнению курсовой работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники», приведена литература, необходимая при выполнении курсовой работы по расчету электромагнитной цепи, а также алгоритм выполнения курсовой работы.

© КузГТУ, 2019

© Черникова Т. М.,  
составление, 2019

## Содержание

1. Общие положения.....	4
2. Рекомендации по выполнению разделов работы.....	5
2.1. Выбор электромагнитной цепи и составление ее схемы замещения.....	5
2.2. Расчет установившегося режима работы электри- ческой схемы замещения и магнитной цепи.....	13
2.3. Расчет переходного режима в электрической схеме замещения.....	14
2.4. Алгоритм выполнения курсовой работы.....	15
Список рекомендуемой литературы.....	17

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выполнение курсовой работы по расчету электромагнитной цепи представляет собой завершающий этап изучения курса «Теоретические основы электротехники» [1–5]. Целью работы являются представление электротехнической установки либо схемы электроснабжения (объединенных общим понятием электромагнитной цепи) в виде схемы замещения, состоящей из источников энергии, пассивных R-, L-, C-элементов, магнитной цепи, и расчет требуемых характеристик данной схемы.

Курсовая работа должна включать в себя следующие разделы:

- выбор эксплуатируемой на предприятиях электромагнитной цепи, имеющей полную спецификацию элементов;
- описание работы электромагнитной цепи;
- составление ее упрощенной схемы замещения;
- расчет установившихся режимов работы электрической схемы замещения;
- расчет магнитной цепи (при ее наличии) и определение электромагнитных сил в подвижных частях магнитной системы при установившихся режимах;
- расчет переходного режима работы электрической схемы замещения;

Курсовая работа оформляется в виде пояснительной записки объемом до 18 машинописных страниц формата А4 через 1,5 интервала и дополняется одним графическим листом формата А1 с изображением электрической (и магнитной) схемы электромагнитной цепи и ее основных характеристик, представленных на графиках либо таблицах.

Электрические схемы должны быть выполнены в соответствии со стандартом ГОСТ 2.702-75-ЕСКД. С требованиями данного стандарта можно ознакомиться также в технической литературе, например, в работах [6, 7], журналах «Промышленная энергетика», «Радио».

Допускается выполнение курсовой работы в виде действующей лабораторной установки с расчетом основных параметров ее схемы, входящим в составленную инструкцию по технической эксплуатации.

## **2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАЗДЕЛОВ РАБОТЫ**

### **2.1. Выбор электромагнитной цепи и составление ее схемы замещения**

Выбор электромагнитной цепи и составление ее схемы замещения являются наиболее ответственными разделами работы. Важной является степень подобия модели реальному объекту: при чрезмерной сложности модели ее расчет может оказаться труднодостижимым, слишком простая модель не учитывает существенные стороны функционирования объекта.

В качестве исследуемой электромагнитной цепи можно выбрать схему электроснабжения группы потребителей энергии, схему автоматизации (или ее отдельный блок) технологического процесса, схему управления коммутационного электрического аппарата, схему аппарата защитного отключения, радиотехническую схему, схему измерительного прибора или схему какого-либо другого устройства с силовым напряжением до 1 кВ. Частота информационного сигнала не должна превышать 10 кГц (для исключения явления излучения электромагнитных волн).

В схеме замещения все источники энергии (трансформаторы, аккумуляторные батареи, электрические генераторы и др.) представляются в виде зависимых или независимых источников синусоидального, несинусоидального, постоянного напряжения и (или) тока, все приемники, включая соединительные линии, – линейными или нелинейными R-, L-, C-элементами.

В частности, могут быть использованы схемы замещения электрических машин и трансформатора, состоящие из R-, L-элементов, которые подробно изучаются в курсе «Электромеханика». Обмотку электромагнитного реле (в зависимости от степени упрощения) можно представить либо в виде нелинейной катушки, схема замещения которой рассмотрена в курсе «Теоретические основы электротехники», либо в виде последовательного соединения линейных активного и индуктивного сопротивлений, либо в виде идеальной катушки индуктивности. Схемы полупроводникового или операционного усилителей следует заменить зависимыми источниками напряжения или тока, схему электронно-

го ключа – рубильником. Источник несинусоидального сигнала (например, прямоугольной формы или линейно изменяющегося напряжения) необходимо заменить в соответствии с разложением в ряд Фурье последовательным включением нескольких источников синусоидального сигнала разной амплитуды и частоты.

Схема замещения электромагнитной цепи должна непременно включать в себя по крайней мере один нелинейный элемент:

- катушку с ферромагнитным сердечником (для построения ее вольт-амперной характеристики (ВАХ) необходимо знать марку стали сердечника) с известными геометрическими размерами магнитопровода;
- полупроводниковые приборы с аппроксимированными ВАХ.

Разработанная схема замещения электромагнитной цепи должна быть согласована с преподавателем.

Ниже приводятся варианты электромагнитных цепей и возможные схемы их замещения.

На рис. 2.1 показана четырехпроводная схема питания асинхронного двигателя и осветительных ламп, дополненная батареей конденсаторов, а на рис. 2.2 – ее схема замещения для самой нагруженной фазы – фазы А (схемы замещения других фаз не будут содержать сопротивлений  $R_i$ ).

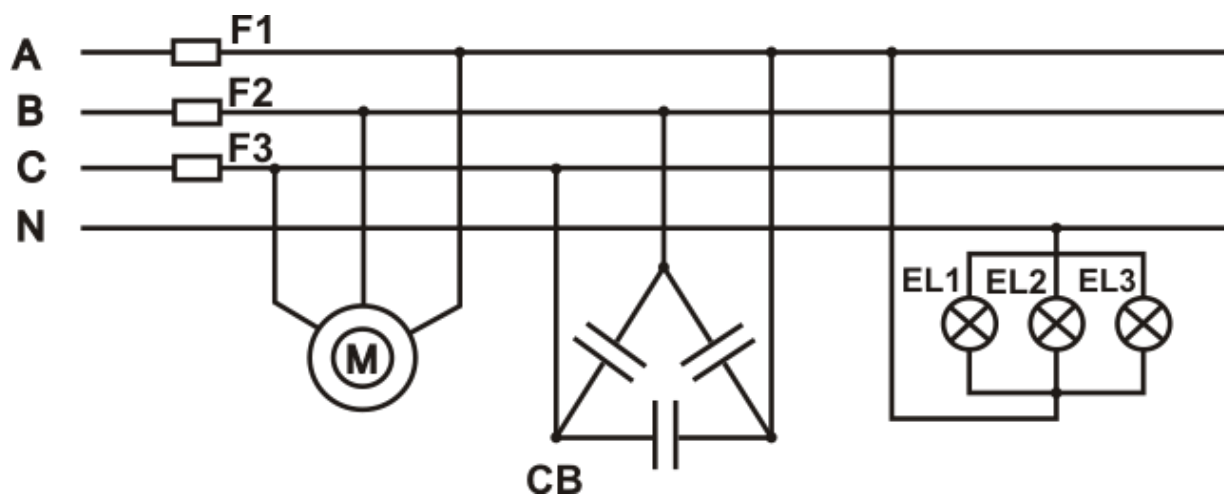


Рис. 2.1

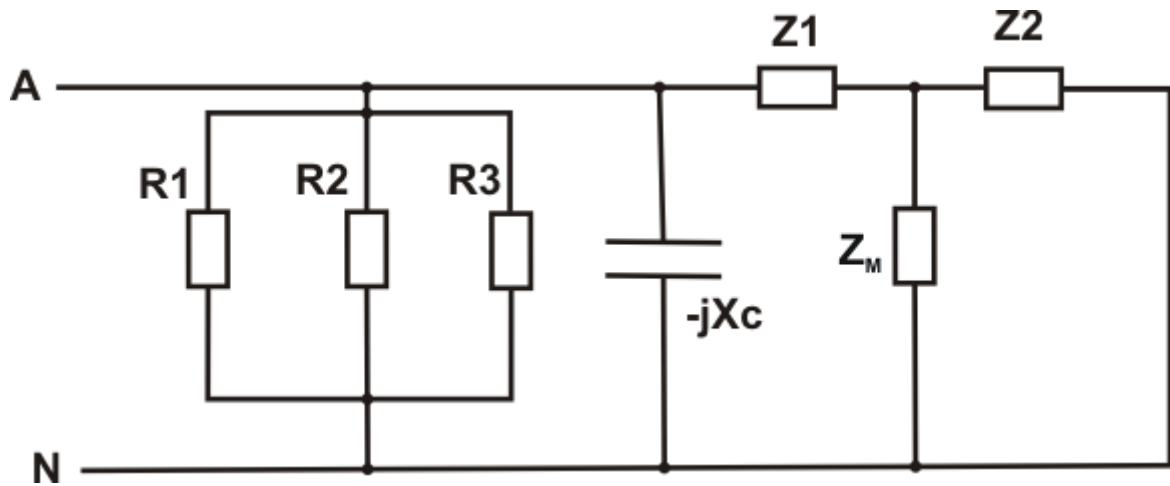


Рис. 2.2

На рис. 2.3 и рис. 2.4 приведены соответственно схема электрической сети с устройством компенсации емкостных токов утечки ( $L_1$ - $L_3$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ), к фазе которой прикоснулся человек, имеющий сопротивление  $R_4$ , и ее схема замещения.

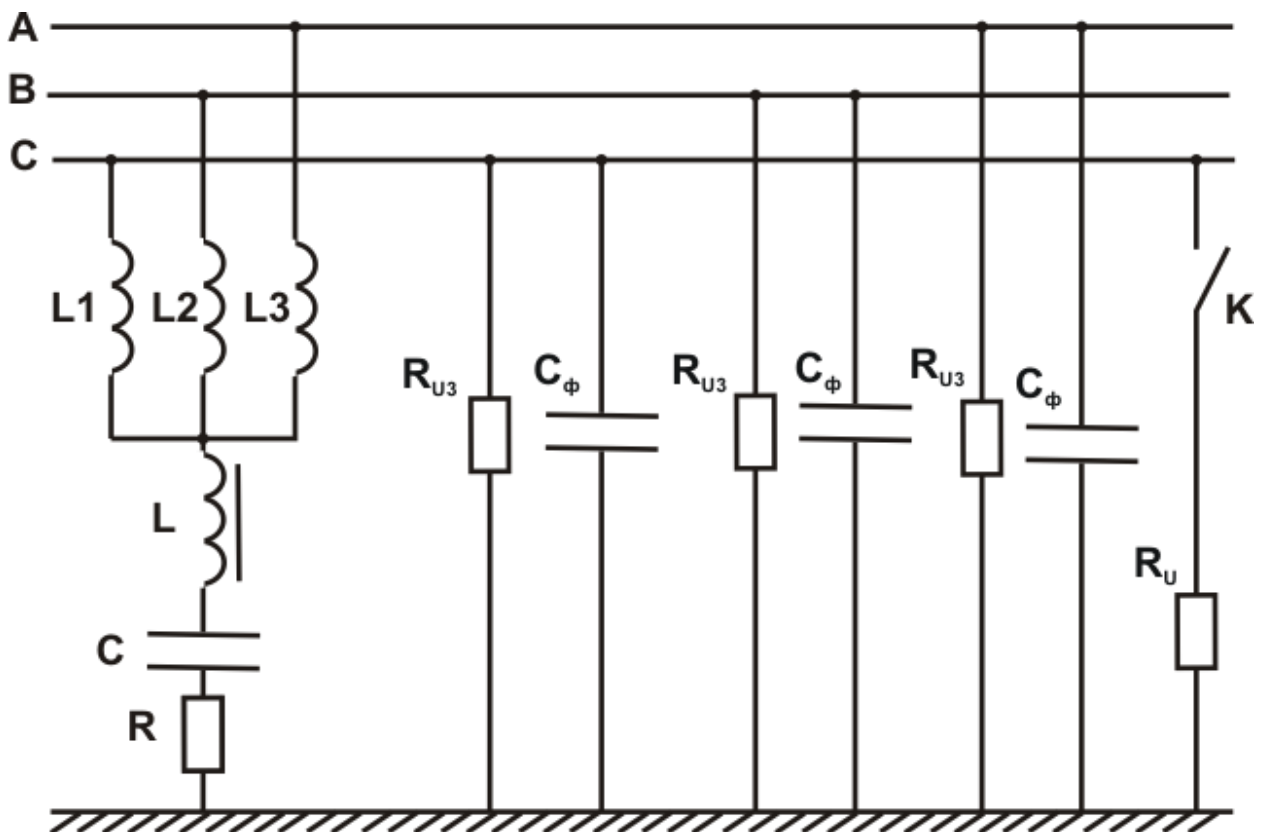


Рис. 2.3

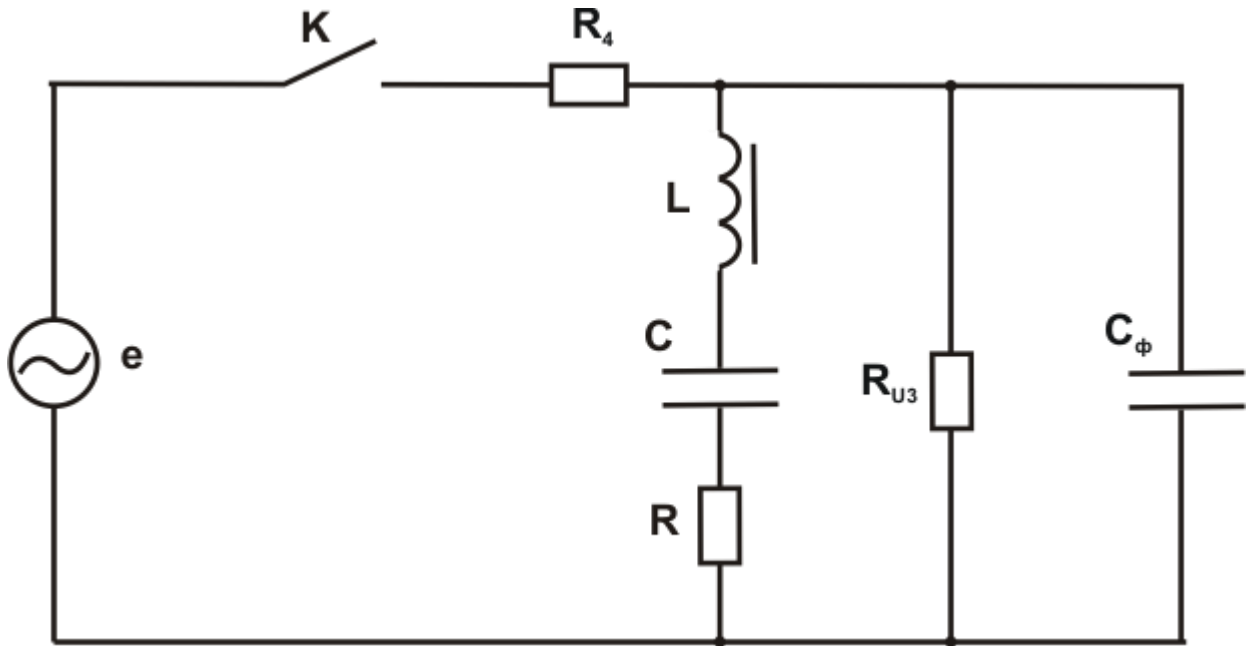


Рис. 2.4

На рис. 2.5 показана принципиальная электрическая схема цепи управления магнитного пускателя, осуществляющего коммутацию силовой цепи (на рис. 2.5 не показана). Одна из возможных схем ее замещения приведена на рис. 2.6.

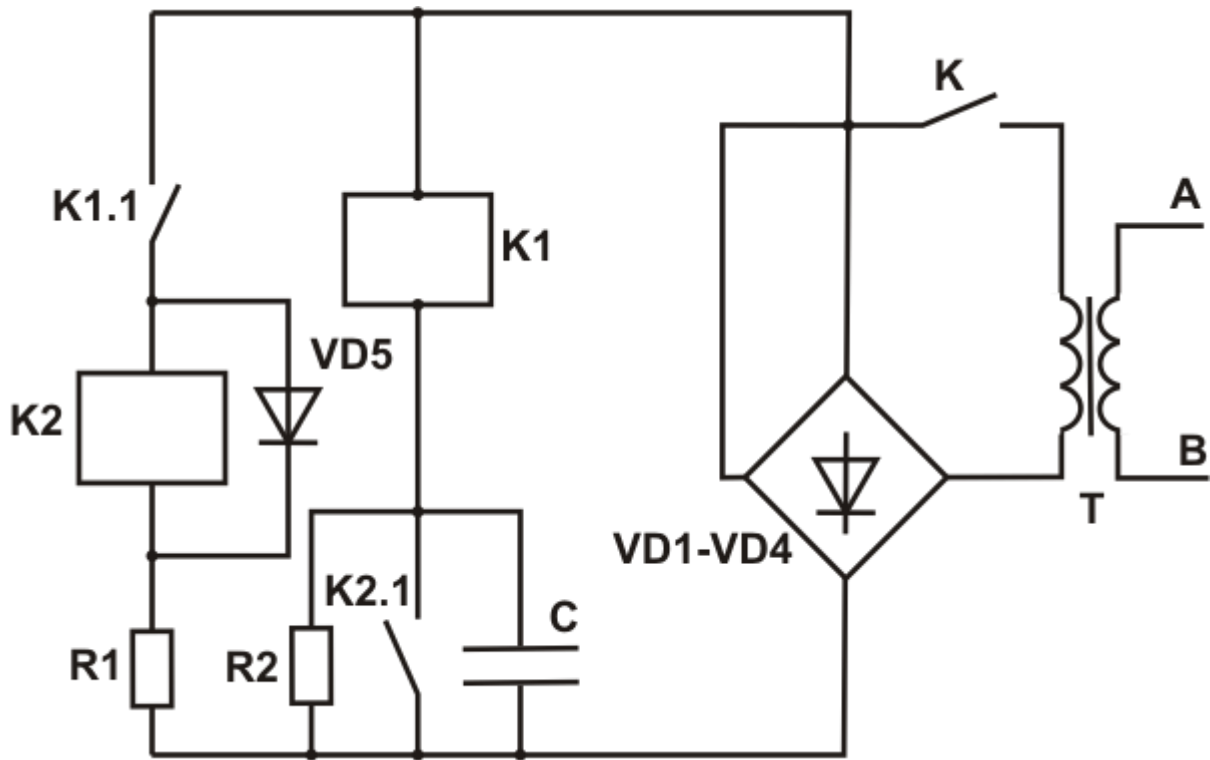


Рис. 2.5



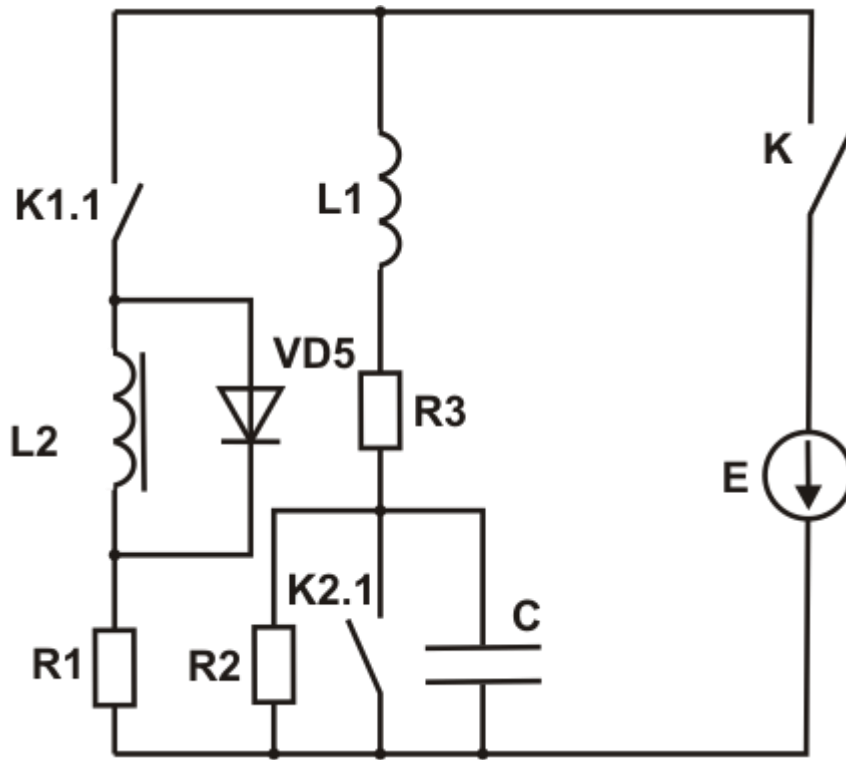


Рис. 2.6

На рис. 2.7 и рис. 2.8 показаны соответственно упрощенная схема защиты от токов утечки и схема ее замещения.

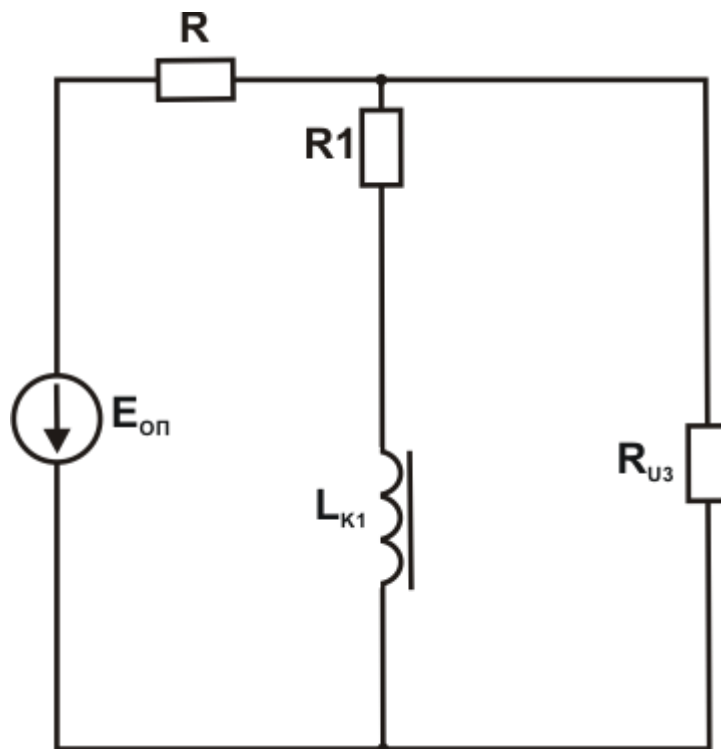


Рис. 2.7

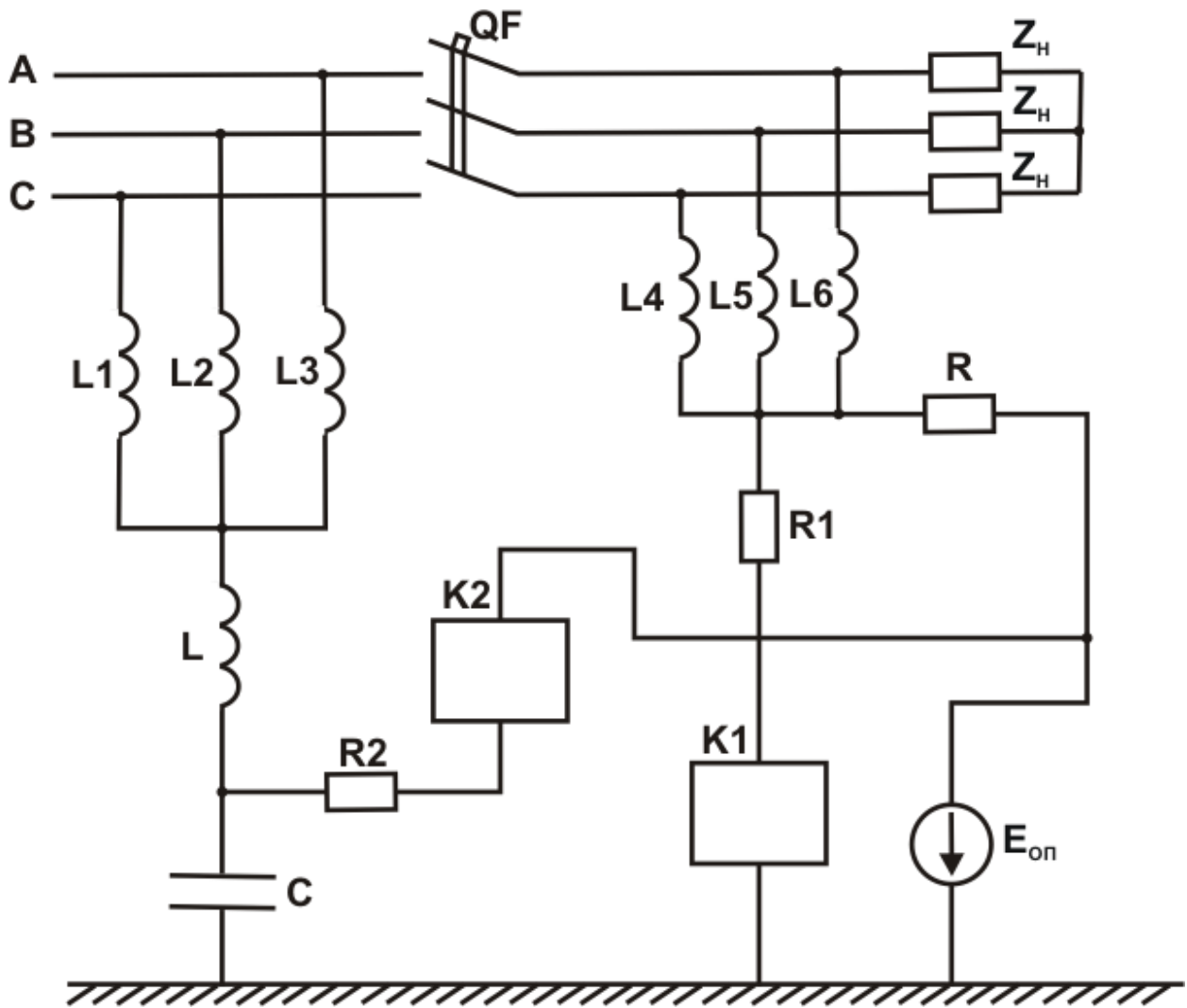


Рис. 2.8

Достаточно просто составляются схемы замещения радиотехнических цепей. На рис. 2.9 и рис. 2.10 приведены соответственно схемы акустической системы и замещения. На вход схемы подается сигнал звуковой частоты, который можно представить суммой, например, трех гармоник – низкой, средней и высокой частот.

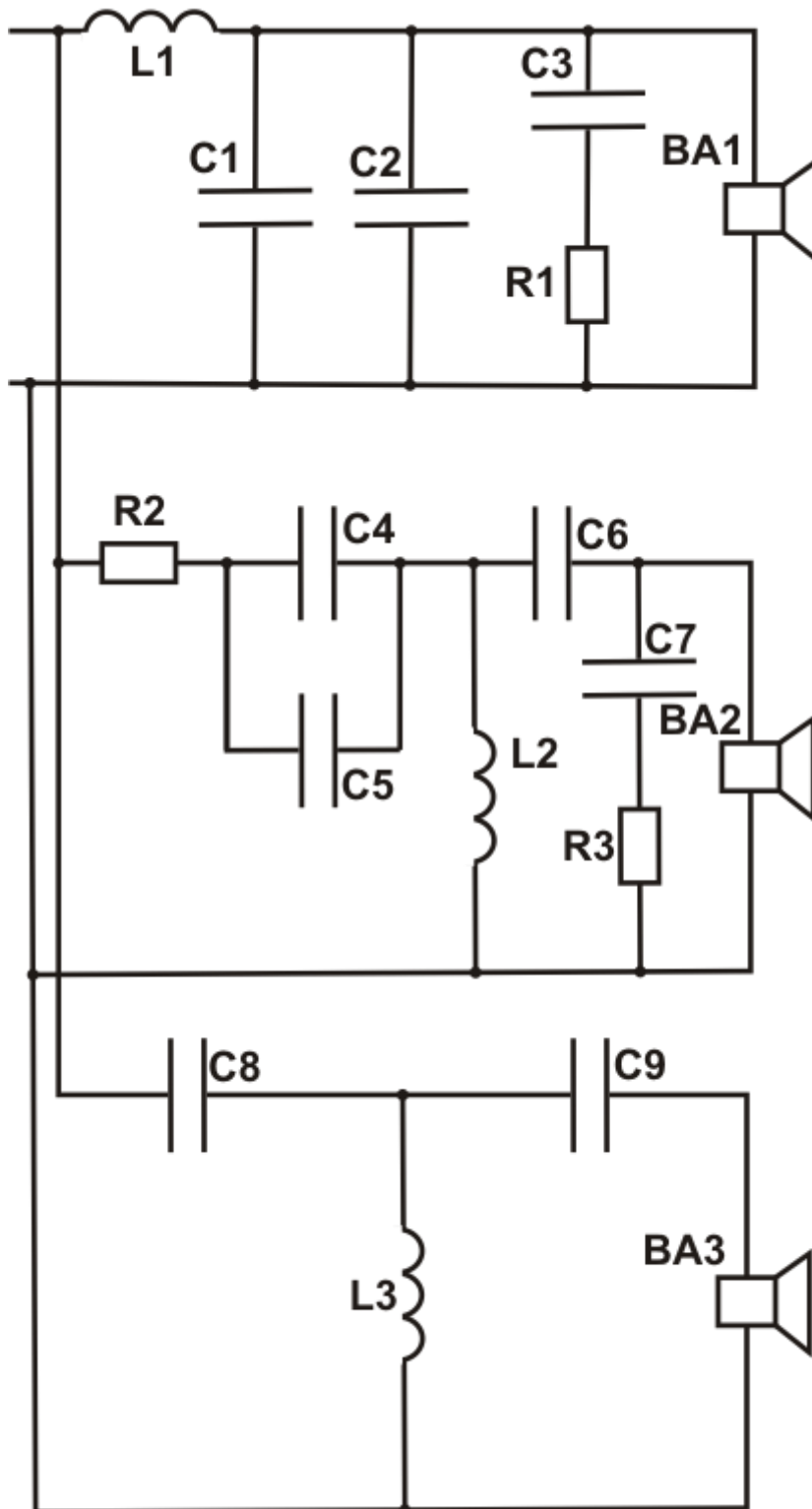


Рис. 2.9

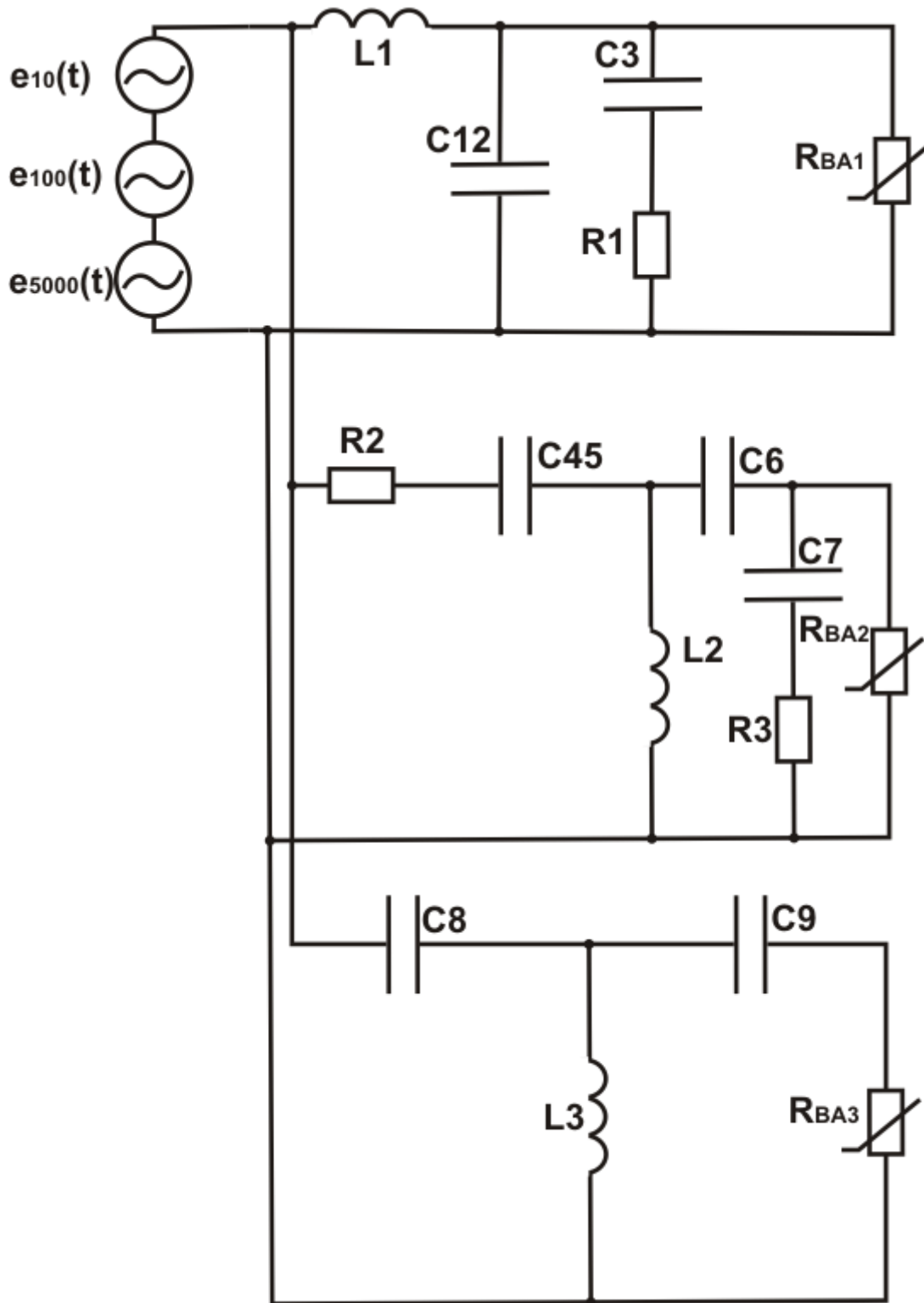


Рис. 2.10

Зачастую в литературе описание работы электромагнитной цепи производится достаточно поверхностно. От студента же требуется глубокое понимание работы схемы, поэтому функцио-

нирование устройства должно быть подробно описано в пояснительной записке (вплоть до назначения каждого элемента схемы).

Выбор расчетной электромагнитной цепи можно осуществить из схем, приводимых в научно-технических журналах («Электротехника», «Электричество», «Промышленная энергетика», «Известия вузов. Горный журнал», «Радио», «Безопасность труда в промышленности», «Уголь» и др.), по технической документации конкретного устройства, техническим справочникам, другой литературе, в частности [8–29]. Можно выбрать электромагнитную цепь в интернете.

После изучения источников [30–33] следует перечислить правила безопасности, которые нужно учитывать при эксплуатации анализируемого типа электромагнитной цепи.

## **2.2. Расчет установившегося режима работы электрической схемы замещения и магнитной цепи**

Для некоторых схем замещения возможно наличие нескольких установившихся режимов (например, для схемы, показанной на рис. 2.6, можно допустить наличие двух установившихся состояний: первое (после замыкания контакта К и срабатывания реле К1 и К2) – пусковой режим, второе (после отключения реле К2) – режим удержания контактора. В каждом установившемся режиме должны быть определены напряжение и ток на каждом элементе.

Для цепей постоянного тока методика расчета изложена в литературе [1, 4, 34, 36]. Цепи переменного тока рассчитываются символическим методом, изложенным в [1, 4, 34, 36]. Для нелинейных цепей возможен как аналитический расчет (после предварительно проведенной аппроксимации нелинейной ВАХ элемента), так и графический метод расчета, изложенный в [5, 35, 36].

При несинусоидальном входном сигнале по согласованию с преподавателем могут быть определены напряжения и токи лишь на входе и на нагрузке. Источник несинусоидального сигнала заменяется не менее чем тремя синусоидальными составляющими, например, при источнике ЭДС, вырабатывающим напряжение,

форма которого показана на рис. 2.11, необходимо в соответствии с разложением Фурье принять, что ЭДС источника определится по формуле

$$e(t) = E_M \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{2} \sin 2\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t) \right].$$

Следовательно, схема замещения данного источника будет представлена четырьмя последовательно включенными источниками ЭДС (как это показано на рис. 2.12), один из которых является источником постоянной ЭДС, а три остальные – источниками синусоидальной ЭДС первой, второй и третьей гармоник.

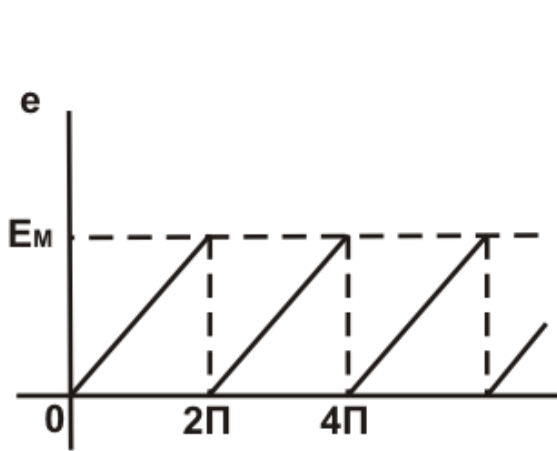


Рис. 2.11

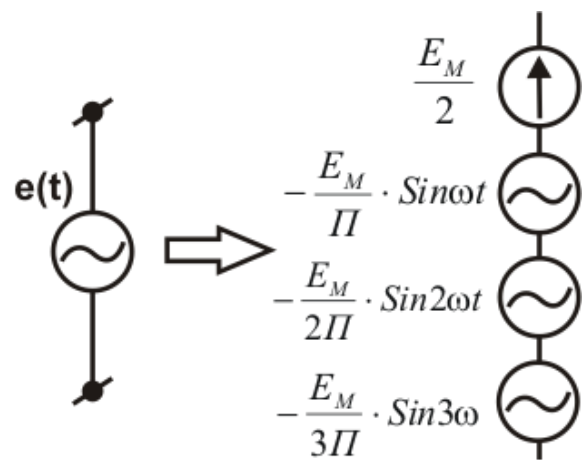


Рис. 2.12

Расчет установившегося режима должен быть дополнен построением векторных диаграмм, построением ВАХ схемы (либо ее фрагмента).

Для расчета магнитной цепи должны быть известны геометрические размеры магнитной системы и кривые намагничивания разнородных участков магнитопровода. Расчет заключается в решении обратной задачи, т. е. нахождении магнитных потоков по рассчитанным токам в катушках. Методика расчета магнитной цепи изложена в [5, 35, 36].

### 2.3. Расчет переходного режима в электрической схеме замещения

В курсовой работе должен быть произведен расчет одного переходного режима (при наличии нескольких коммутаций в электромагнитной цепи рассчитывается наиболее тяжелый про-

цесс коммутации), при этом нелинейные элементы условно считаются линейными.

Необходимо построение временных диаграмм рассчитанных токов и напряжений за время переходного процесса.

Расчет должен быть произведен классическим или операторным методом. При подключении к схеме источника несинусоидального сигнала следует рассмотреть переходный процесс, считая, что на схему воздействует лишь один период несинусоидального сигнала, а расчет осуществить с использованием интеграла Дюамеля [1, 4, 34, 36, 37].

Так, например, при форме сигнала источника, показанной на рис. 2.13 допускается расчет переходного процесса при включении пассивной схемы замещения при нулевых начальных условиях на один прямоугольный импульс, как это показано на рис. 2.14.

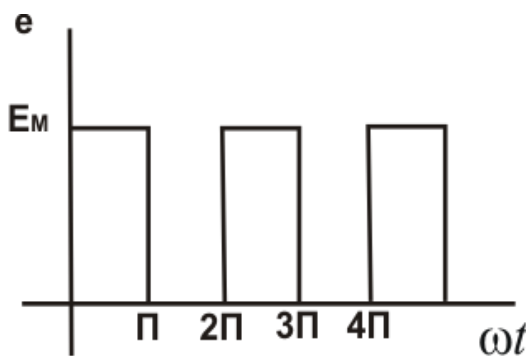


Рис. 2.13

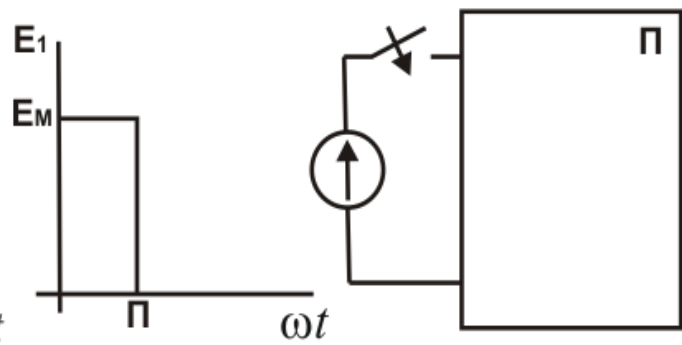


Рис. 2.14

## 2.4. Алгоритм выполнения курсовой работы

1. Описание работы выбранной электромагнитной цепи.
2. Выбор марки стали сердечника катушки, если она не дана в описании цепи. По электротехническому справочнику [38] найти кривую намагничивания  $B = f(H)$  для данной марки стали.
3. Выполнить аппроксимацию кривой намагничивания

$$H = a B + b B^3,$$

причем одна точка должна соответствовать максимальному значению индукции.

#### 4. Расчет ВАХ катушки.

а) Выполнить замену переменных. Напряженность магнитного поля  $H$  заменить по закону полного тока на  $i$ , а магнитную индукцию  $B$  по закону электромагнитной индукции – на напряжение  $u$  и получить аппроксимацию ВАХ катушки:

$$i = K_1 u + K_3 u^3.$$

б) По максимальной индукции  $B_{\max}$  получить максимальный магнитный поток  $\Phi_{\max}$  и максимальное действующее значение напряжения  $U_{\max}$ , созданное этим потоком.

в) В диапазоне значений напряжения от 0 до  $U_{\max}$  выбрать 5–6 точек, причем одна точка должна быть равна  $U_{\max}$ .

г) Для этих значений напряжения аналитическим методом выполнить гармонический анализ тока катушки и найти

$$i(t) = i_1(t) + i_3(t),$$

где  $i_1(t)$  – первая гармоника тока;  $i_3(t)$  – третья гармоника тока.

д) Построить ВАХ катушки для действующих значений  $U = f(I)$ ,

$$\text{где } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2}$$

#### 5. Рассчитать ВАХ цепи.

Цепь упростить, оставив ее основные элементы. Использовать графический метод расчета для действующих значений.

6. Для одного режима построить векторную диаграмму токов и напряжений упрощенной цепи.

7. Найти форму тока в катушке  $i(t)$  графически при максимальных значениях магнитного потока  $\Phi_{\max}$  и напряжения  $U_{\max}$ . В этой же системе координат построить первую, третью гармоники и их сумму. Это будет кривая тока, найденная аналитически.

#### 8. Рассчитать переходный процесс.

Метод расчета любой. Расчет переходного процесса должен быть подробный. При выполнении его на компьютере обозначения величин должны соответствовать тем, что приняты в курсе ТОЭ. Построить график тока  $i(t)$  в переходном режиме.

9. Привести список использованной литературы, обязательно указав источник, откуда была взята выбранная электромагнитная цепь.



## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – Москва: Гардарики, 2007. – 701 с.
2. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи / Г. И. Атабеков. – Санкт-Петербург: Лань, 2009. – 592 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_cid=25&p11\\_id=90](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=90)
3. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле / Г. И. Атабеков [и др.]. – Санкт-Петербург: Лань, 2010. – 432 с.  
[http://e.lanbook.com/books/element.php?p11\\_cid=25&p11\\_id=644](http://e.lanbook.com/books/element.php?p11_cid=25&p11_id=644)
4. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – Санкт-Петербург: Питер, 2009. – Т. 1. – 512 с.
5. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – Санкт-Петербург: Питер, 2009. – Т. 2. – 431 с.
6. Фролов, В. В. Язык радиосхем / В. В. Фролов. – Москва: Радио и связь, 1988. – 128 с.
7. Камнев, В. Н. Чтение схем и чертежей электроустановок / В. Н. Камнев. – Москва: Высш. шк., 1990. – 144 с.
8. Арцишевский, Я. Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с изолированной нейтралью / Я. Л. Арцишевский. – Москва: Высш. шк., 1989. – 89 с.
9. Захаров, В. Н. Аппаратура автоматизации очистных комбайнов / В. Н. Захаров [и др.]. – Москва: Недра, 1986. – 87 с.
10. Бишард, Е. Г. Аналоговые электроизмерительные приборы / Е. Г. Бишард [и др.]. – Москва: Высш. шк., 1991. – 415 с.
11. Бацежев, Ю. Г. Электропривод и электроснабжение. / Ю. Г. Бацежев, В. С. Костюк. – Москва: Недра, 1989. – 292 с.
12. Овсянников, Ю. Л. Автоматизация подземного оборудования: Справочник / Ю. Л. Овсянников, А. А. Кораблев, А. А. Топорков. – Москва: Недра, 1990. – 287 с.
13. Озерной, М. И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт / М. И. Озерной. – Москва: Недра, 1975. – 445 с.

14. Капелюшников, Г. И. Приборы и защитные средства по технике безопасности: Справочник / Г. И. Капелюшников, В. П. Колосюк, Л. С. Боброва. – Москва: Недра, 1991. – 255 с.

15. Риман, Я. С. Защита шахтных участков сетей от токов короткого замыкания / Я. С. Риман. – Москва: Недра, 1985. – 88 с.

16. Дзюбан, Б. С. Справочник энергетика угольной шахты / Б. С. Дзюбан, Я. С. Риман, А. К. Маслий. – Москва: Недра, 1983. – 542 с.

17. Светличный, П. Л. Пускатели магнитные рудничные. / П. Л. Светличный, Б. Я. Стариков, А. М. Харченко. – Москва: Недра, 1974. – 88 с.

18. Седаков, Л. В. Эксплуатация шахтных электромагнитных пускателей. / Л. В. Седаков. – Москва: Недра, 1988. – 64 с.

19. Щуцкий, Б. И. Электрические аппараты и средства автоматизации горных предприятий / Б. И. Щуцкий, А. В. Ляхомский. – Москва: Недра, 1990. – 283 с.

20. Фролкин, В. Г. Быстродействующая защита шахтных участков сетей. / В. Г. Фролкин. – Москва: Недра, 1986. – 125 с.

21. Быков, А. И. Электрические аппараты на напряжение 1140 В / А. И. Быков [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.

22. Волотковский, С. А. Электрификация открытых горных работ / С. А. Волотковский [и др.]. – Москва: Недра, 1987, – 331 с.

23. Ходюшин, М. Г. Эксплуатация комплекса автоматизированного управления конвейерами АУК.1М / М. Г. Ходюшин [и др.]. – Москва: Недра, 1986. – 76 с.

24. Щуцкий, В. И. Электрификация подземных горных работ / В. И. Щуцкий [и др.]. – Москва: Недра, 1986. – 353 с.

25. Харизоменов, И. В. Электрооборудование автоматических линий и агрегатных станков / И. В. Харизоменов. – Москва: Машиностроение, 1973. – 175 с.

26. Электрооборудование для строительных и дорожных машин: Каталог-справочник. – Москва: Машиностроение, 1969. – 247 с.

27. Богословский, А. П. Электрооборудование кранов / А. П. Богословский [и др.]. – Москва: Машиностроение, 1983. – 310 с.

28. Беккер, Р. Г. Электрооборудование и электроснабжение участка шахты: Справочник / Р. Г. Беккер [и др.]. – Москва: Недра, 1983. – 503 с.

29. Сенчев, В. Г. Энергоснабжение строительства / В. Г. Сенчев [и др.]. – Москва: Стройиздат, 1980. – 783 с.

30. Ушаков, К. З. Охрана труда / К. З. Ушаков [и др.]. – Москва: Недра, 1986. – 624 с.

31. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах. – Москва: Недра, 1986. – 447 с.

32. Правила техники безопасности при эксплуатации распределительных электрических сетей. – Москва: Атомиздат, 1975. – 109 с.

33. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 114 с.

34. Ионкин, П. А. Теоретические основы электротехники / П. А. Ионкин. – Москва: Высш. шк., 1976. – 544 с.

35. Ионкин, П. А. Теоретические основы электротехники / П. А. Ионкин. – Москва: Высш. шк., 1976. – 383 с.

36. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 523 с.

37. Переходные процессы в линейных электрических цепях: метод. указания к расчетно-графической работе по курсу «Теоретические основы электротехники» для студентов специальности 140604 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов»/ Н. М. Козлова; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2009. – 29 с.

38. Электронный каталог ГПНТБ России [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения обо всех видах лит., поступающей в фонд ГПНТБ России. – Электрон. дан. (5 файлов, 178 тыс. записей). – Москва, [199-]. – Режим доступа:

<http://www.gpntb.ru/win/search/help/el-cat.html>. – Загл. с экрана.