

312
ГЧП
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
РЕСПУБЛИКАНСКИЙ ИНСТИТУТ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ

Гиландская Л. Н.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Рекомендовано Научно-методическим центром учебной книги и средств обучения Министерства образования Республики Беларусь в качестве учебно-методического пособия для учащихся средних специальных учебных заведений по специальностям электротехнического профиля

7166/0

Минск
1997

УДК 621.3(075.32)

ББК 31.21

Г47

Рецензенты:

Л. И. Сончик, зав. кафедрой ТОЭ Белорусской государственной политехнической академии, доц., канд. техн. наук; *В. И. Можар*, зав. отделом повышения квалификации преподавателей вузов, доц. кафедры ТОЭ Белорусской государственной политехнической академии, канд. техн. наук;
Э. Е. Чилинский, начальник учебно-методического отдела Республиканского института профессионального образования; *Л. П. Шевелева*, председатель цикловой комиссии Могилевского политехникума

Рекомендовано к изданию экспертным советом Республиканского института профессионального образования

Гилецкая Л. Н.

Г47 Теоретические основы электротехники. Курсовое проектирование. — Мн.: РИПО, 1997. — 67 с.

ISBN 985-6079-36-5

В пособии приведены многовариантные задачи для курсового проектирования по предмету "Теоретические основы электротехники" и основные методики расчета электрических цепей постоянного и переменного тока. Изложены методы исследования переходных процессов в электрических цепях, а также программы для расчета на ЭВМ электрических цепей на языке БЕЙСИК.

Для преподавателей и учащихся средних специальных учебных заведений.

ББК 31.21

ISBN 985-6079-36-5

© Республиканский институт
профессионального образования, 1997

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предмет “Теоретические основы электротехники” базируется на знании общеобразовательных и общетехнических предметов: математики, физики, практического использования программного обеспечения ПЭВМ и является основой для изучения предметов по специальностям электротехнического, электроэнергетического и радиотехнического профилей.

В результате изучения предмета у учащихся должны быть сформированы знания, умения и практические навыки в соответствии с квалификационными требованиями к специалисту.

Учащиеся должны знать:

физические законы, на которых основана электротехника, вытекающие из этих законов следствия, правила, методы расчетов;

наиболее употребительные термины и определения теоретической электротехники;

условные графические обозначения элементов электрических цепей, применяемых в электрических расчетных схемах (схемах замещения);

единицы измерения и буквенные обозначения электрических и магнитных величин;

должны уметь:

читать и составлять принципиальные и расчетные схемы несложных электрических цепей,

выполнять по заданным условиям расчеты несложных электрических цепей постоянного и переменного тока;

собирать несложные электрические цепи по заданным принципиальным и монтажным схемам;

находить неисправности в несложных электрических цепях;

выбирать аппаратуру и контрольно-измерительные приборы.

Преподаватель должен прививать учащимся навыки самостоятельной работы с технической и справочной литературой.

Для закрепления знаний и умений, перечисленных выше, для учащихся введена курсовая работа по теоретическим основам электротехники.

Курсовая работа по предмету “Теоретические основы электротехники” является первой самостоятельной работой расчетного характера.

Пособие предназначено для преподавателей и учащихся средних специальных учебных заведений, изучающих электротехнику. Оно содержит многовариантные задания и типовые расчеты к курсовой работе.

Курсовая работа состоит из двух частей. Задание первой части составлено по темам: “Методы расчета линейных электрических цепей постоянного тока”, “Нелинейные электрические цепи постоянного тока”. Задание второй части составлено по темам: “Расчет однофазных линейных электрических цепей переменного тока”, “Трехфазные электрические цепи”, “Переходные процессы в электрических цепях”.

Содержание заданий соответствует действующей программе предмета "Теоретические основы электротехники", утвержденной 24.01.96 г.

Предмет "Теоретические основы электротехники" изучают на протяжении двух семестров. Можно давать в конце первого семестра обучения первую часть задания курсовой работы, а в конце второго семестра – вторую часть задания или всю работу по усмотрению преподавателя. Можно дополнять задания курсовой работы по его усмотрению или изменять параметры схем, включать другие разделы предмета, например, тему "Расчет линейных электрических цепей при несинусоидальном напряжении на ее входе" или "Расчет магнитных цепей".

Число вариантов, предложенных данным пособием по заданиям п. 1.1 и п. 1.2, можно увеличивать. Увеличение можно производить следующим образом: для всех схем в одной группе брать параметры только первого варианта, для второй группы – только второго варианта и т. д. Номера вариантов соответствуют порядковому номеру, под которым фамилия учащегося записана в журнале учебных занятий группы.

При выполнении курсовой работы учащимся необходимо: полностью записывать текст задания и данные; чертежи, условные обозначения элементов схем электрических цепей и схемы выполнять аккуратно согласно стандартам ЕСКД и ЕСТД; во всех расчетах сначала записывать пояснения, формулу, затем подставлять в нее числовые значения; расчеты выполнять с точностью до третьего знака; писать единицы измерений величин только в окончательном результате вычислений.

Обязательно привести список используемой литературы, дату выполнения работы и личную подпись учащегося.

При нарушении правил выбора варианта, а также при выполнении заданий не в полном объеме работа не рецензируется и возвращается учащемуся.

Образцы выполнения курсовой работы показаны в разделах пособия. "Методика расчета линейных и нелинейных электрических цепей постоянного тока", "Методика расчета однофазных и трехфазных цепей переменного тока", "Методика исследования переходных процессов".

В конце пособия приводятся десять программ для расчета электрических цепей на ЭВМ на версии языка БЕЙСИК, применяемой на базе большинства современных персональных ЭВМ. Наименование программы дается в первой строке листинга.

При написании пособия автор стремилась изложить основные вопросы расчета электрических цепей систематизировано, последовательно и доступно, сопровождая расчеты теоретическим изложением материала.

Автор выражает глубокую признательность рецензентам рукописи за ценные замечания, которые были учтены и способствовали улучшению содержания пособия.

1. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Расчет линейных электрических цепей постоянного тока

Задание

Для электрической цепи (рис. 1.1–1.30) выполнить следующее:

- 1) составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для определения токов во всех ветвях схемы;
- 2) определить токи во всех ветвях схемы, используя метод контурных токов;
- 3) определить токи во всех ветвях схемы на основании метода наложения;
- 4) составить баланс мощностей для заданной схемы;
- 5) результаты расчетов токов по пунктам 2 и 3 представить в виде таблицы и сравнить;
- 6) определить ток во второй ветви методом эквивалентного генератора;
- 7) построить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, включающего обе ЭДС.

Вариант задания определяют по табл. 1.1.

Таблица 1.1

Числовые параметры схем электрических цепей постоянного тока

№ варианта	E_1 В	E_2 В	R_1 Ом	R_2 Ом	R_3 Ом	R_4 Ом	R_1 Ом	R_1 Ом	r_{01} Ом	r_{02} Ом
0	40	30	52	24	43	36	61	16	1	2
1	50	30	53	34	24	18	25	42	1	1
2	20	30	54	43	32	26	51	15	2	2
3	20	40	64	48	32	25	51	15	1	2
4	40	20	35	52	24	41	16	61	2	1
5	30	20	45	53	32	24	61	15	1	1
6	30	40	26	64	43	35	51	16	2	2
7	20	30	64	43	31	25	52	14	1	2
8	30	40	16	63	34	42	25	52	3	2
9	30	20	54	42	23	31	16	51	1	2

Примечание. Номер схемы соответствует порядковому номеру, под которым фамилия учащегося записана в журнале учебных занятий группы.

Числовые параметры схемы соответствуют последней цифре ее порядкового номера.

Варианты схем электрических цепей
постоянного тока

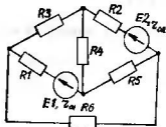


Рис. 1.1

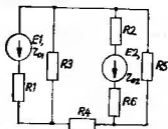


Рис. 1.2

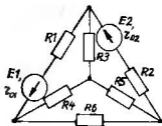


Рис. 1.3

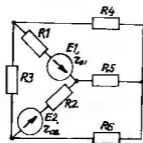


Рис. 1.4

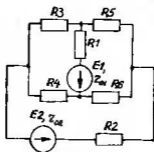


Рис. 1.5

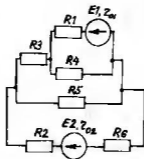


Рис. 1.6

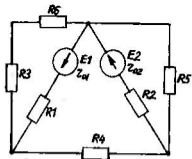


Рис. 1.7

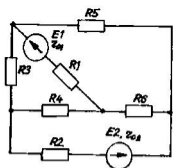


Рис. 1.8

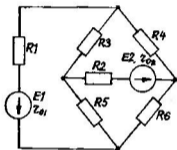


Рис. 1.9

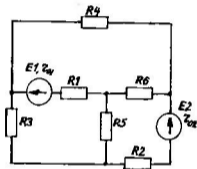


Рис. 1.10

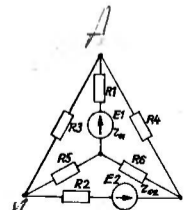


Рис. 1.11

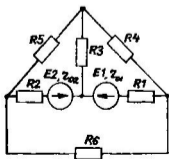


Рис. 1.12

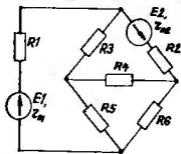


Рис. 1.13

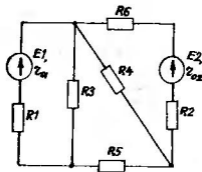


Рис. 1.14

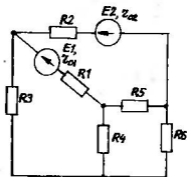


Рис. 1.15

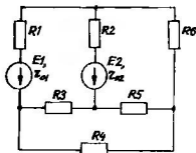


Рис. 1.16

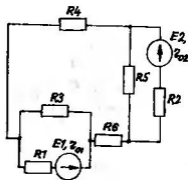


Рис. 1.17

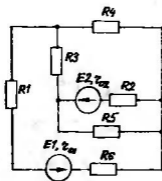


Рис. 1.18

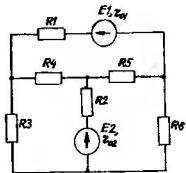


Рис. 1.19

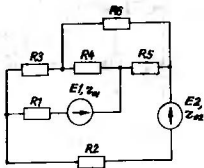


Рис. 1.20

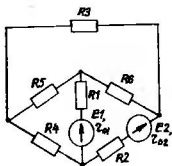


Рис. 1.21

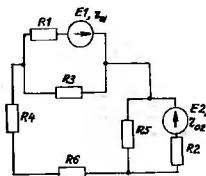


Рис. 1.22

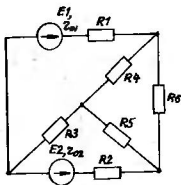


Рис. 1.23

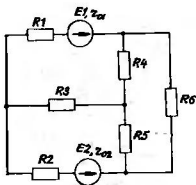


Рис. 1.24

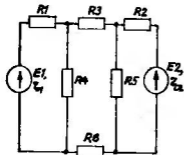


Рис. 1.25

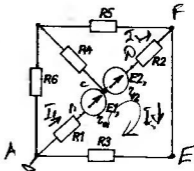


Рис. 1.26

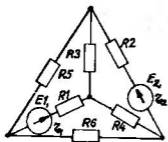


Рис. 1.27

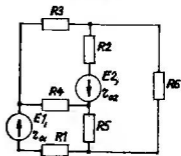


Рис. 1.28

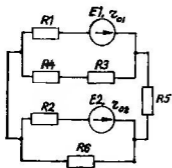


Рис. 1.29

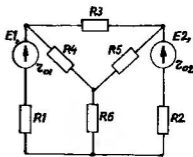


Рис. 1.30

1.2. Расчет нелинейных электрических цепей постоянного тока

Задание

Построить входную вольтамперную характеристику схемы нелинейной электрической цепи постоянного тока. Определить токи во всех ветвях схемы (рис. 1.31–1.36) и напряжения на отдельных элементах, используя полученные вольтамперные характеристики "а", "б" или "в" (см. рис. 1.37). Вариант задания определяют по таблице 1.2.

Варианты схем нелинейных электрических цепей постоянного тока

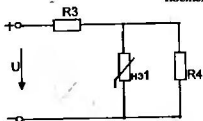


Рис 1.31

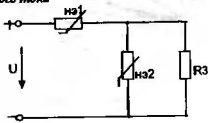


Рис 1.32

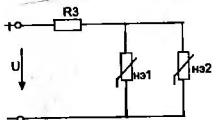


Рис 1.33

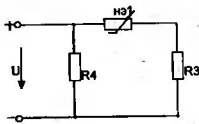


Рис 1.34

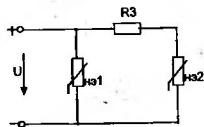


Рис 1.35

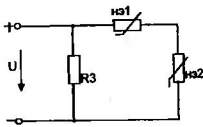


Рис 1.36

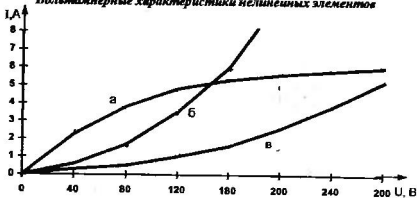


Рис. 1.37

Таблица 1.2

Числовые параметры схем нелинейных электрических цепей постоянного тока

Номер варианта	Номер схемы	Тип характеристики		R_3 Ом	R_4 Ом	U В
		нз1	нз2			
1	1.31	а	-	28	40	60
2	1.32	а	б	32	-	80
3	1.33	а	б	48	-	80
4	1.32	а	в	26	-	140
5	1.33	а	в	40	-	160
6	1.34	а	-	46	30	180
7	1.35	а	б	32	-	200
8	1.36	а	б	38	-	220
9	1.35	а	в	56	-	240
10	1.36	а	в	40	-	60
11	1.31	б	-	32	48	80
12	1.32	б	а	35	-	100
13	1.33	б	а	24	-	120
14	1.32	б	в	26	-	140
15	1.33	б	в	40	-	160
16	1.34	б	-	30	46	180
17	1.35	б	а	50	-	200
18	1.36	б	а	38	-	220
19	1.35	б	в	48	-	240
20	1.36	б	в	40	-	60

Номер варианта	Номер схемы	Тип характеристики		R_3 Ом	R_4 Ом	U В
		нз1	нз2			
21	1.31	в	-	32	48	80
22	1.32	в	в	26	-	100
23	1.33	в	а	40	-	120
24	1.32	в	б	45	-	140
25	1.33	в	б	24	-	160
26	1.34	в	-	46	30	180
27	1.35	в	а	32	-	200
28	1.36	в	в	50	-	220
29	1.35	в	б	56	-	240
30	1.36	в	б	40	-	60

1.3. Методика расчета линейных электрических цепей постоянного тока

Для электрической цепи, изображенной на рис. 1.38, выполнять следующее:

- 1) составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для определения токов во всех ветвях схемы;
- 2) определить токи во всех ветвях схемы, используя метод контурных токов;
- 3) определить токи во всех ветвях схемы на основании метода наложения;
- 4) составить баланс мощностей для заданной схемы;
- 5) результаты расчета токов по пунктам 2 и 3 представить в виде таблицы и сравнить;
- 6) определить ток во второй ветви методом эквивалентного генератора;
- 7) построить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, включающего обе ЭДС.

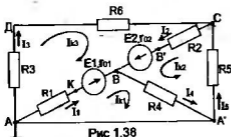


Рис 1.38

Дано: $E_1 = 40$ В, $E_2 = 60$ В,
 $R_1 = 18$ Ом, $R_3 = 36$ Ом,
 $R_3 = 16$ Ом, $R_4 = 24$ Ом,
 $R_5 = 40$ Ом, $R_6 = 34$ Ом,
 $r_{01} = 2$ Ом, $r_{02} = 4$ Ом.

Определить: $I_1, I_2, I_3,$
 I_4, I_5

1) Составить систему уравнений, применяя законы Кирхгофа для определения токов во всех ветвях.

Метод узловых и контурных уравнений основан на применении первого и второго законов Кирхгофа. Он не требует никаких преобразований схемы и пригоден для расчета любой цепи.

При расчете данным методом произвольно задаем направления токов в ветвях I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 .

Составляем систему уравнений. В системе должно быть столько уравнений, сколько в цепи ветвей (неизвестных токов).

В заданной цепи пять ветвей, значит, в системе должно быть пять уравнений ($m = 5$). Сначала составляем уравнения для узлов по первому закону Кирхгофа. Для цепи с n узлами можно составить $(n-1)$ независимых уравнений. В нашей цепи три узла (А, В, С), значит, число уравнений: $n-1 = 3-1 = 2$. Составляем два уравнения для любых 2-х узлов, например, для узлов В и С.

$$\text{узел В: } I_1 + I_2 = I_4$$

$$\text{узел С: } I_3 + I_5 = I_2$$

Всего в системе должно быть пять уравнений. Два уже есть. Три недостающих составляем для линейно независимых контуров. Чтобы они были независимыми, в каждый следующий контур надо включить хотя бы одну ветвь, не входящую в предыдущие.

Задаемся обходом каждого контура и составляем уравнения по второму закону Кирхгофа.

Контур АДСВА — обход по часовой стрелке

$$E_2 - E_1 = I_2(R_2 + r_{02}) - I_1(R_1 + r_{01}) + I_3(R_3 + R_6)$$

Контур АВА'А — обход по часовой стрелке

$$E_1 = I_1(R_1 + r_{01}) + I_4 R_4$$

Контур А'СВА' — обход против часовой стрелки

$$E_2 = I_2(R_2 + r_{02}) + I_4 R_4 + I_5 R_5$$

ЭДС в контуре берется со знаком "+", если направление ЭДС совпадает с обходом контура, если не совпадает — знак "-".

Падение напряжения на сопротивлении контура берется со знаком "+", если направление тока в нем совпадает с обходом контура, со знаком "-", если не совпадает.

Мы получили систему из пяти уравнений с пятью неизвестными:

$$\begin{cases} I_4 = I_1 + I_2 \\ I_2 = I_3 + I_5 \\ E_2 - E_1 = I_2(R_2 + r_{02}) + I_3(R_3 + R_6) - I_1(R_1 + r_{01}) \\ E_1 = I_1(R_1 + r_{01}) + I_4 R_4 \\ E_2 = I_2(R_2 + r_{02}) + I_4 R_4 + I_5 R_5 \end{cases}$$

Решив систему, определим величину и направление тока во всех ветвях схемы.

Если при решении системы ток получается со знаком “-”, значит его действительное направление обратно тому направлению, которым мы задались.

2) Определить токи во всех ветвях схемы, используя метод контурных токов.

Метод контурных токов основан на использовании только второго закона Кирхгофа. Это позволяет уменьшить число уравнений в системе на $n-1$.

Достигается это разделением схемы на ячейки (независимые контуры) и введением для каждого контура-ячейки своего тока — контурного тока, являющегося расчетной величиной.

Итак, в заданной цепи (рис. 1.38) можно рассмотреть три контура-ячейки (АДСВА, АВА'А, А'СВА') и ввести для них контурные токи I_{k1} , I_{k2} , I_{k3} .

Контур-ячейки имеют ветвь, не входящую в другие контуры — это внешние ветви. В этих ветвях контурные токи являются действительными токами ветвей.

Ветви, принадлежащие двум смежным контурам, называются смежными ветвями. В них действительный ток равен алгебраической сумме контурных токов смежных контуров, с учетом их направления.

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа в левой части равенства алгебраически суммируются ЭДС источников, входящих в контур-ячейку, в правой части равенства алгебраически суммируются напряжения на сопротивлениях, входящих в этот контур, а также учитывается падение напряжения на сопротивлениях смежной ветви, определяемое по контурному току соседнего контура.

На основании вышеизложенного порядок расчета цепи методом контурных токов будет следующим:

стрелками указываем выбранные направления контурных токов I_{k1} , I_{k2} , I_{k3} в контурах-ячейках. Направление обхода контуров принимаем таким же; составляем уравнения и решаем систему уравнений или методом подстановки, или с помощью определителей.

$$\begin{cases} E_1 = I_{k1}(R_1 + r_{01} + R_4) + I_{k2} R_4 - I_{k3}(R_1 + r_{01}) \\ E_2 = I_{k2}(R_2 + r_{02} + R_4 + R_5) + I_{k1} R_4 + I_{k3}(R_2 + r_{02}) \\ E_2 - E_1 = I_{k2}(R_2 + r_{02} + R_1 + r_{01} + R_5 + R_6) - I_{k1}(R_1 + r_{01}) + I_{k3}(R_2 + r_{02}) \end{cases}$$

Подставляем в уравнение численные значения ЭДС и сопротивлений.

$$\begin{cases} 40 = I_{k1}(18 + 2 + 24) + I_{k2} 24 - I_{k3}(18 + 2) \\ 60 = I_{k2}(36 + 4 + 24 + 40) + I_{k1} 24 + I_{k3}(36 + 4) \\ 60 - 40 = I_{k2}(36 + 4 + 18 + 2 + 16 + 34) - I_{k1}(18 + 2) + I_{k3}(36 + 4) \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} 40 = I_{k1} 44 + I_{k2} 24 - I_{k3} 20 \\ 60 = I_{k1} 24 + I_{k2} 104 + I_{k3} 40 \\ 20 = -I_{k1} 20 + I_{k2} 40 + I_{k3} 110 \end{cases}$$

Сократив первое уравнение на 4, второе — на 4, третье — на 10, получим:

$$\begin{cases} 10 = I_{k1} 11 + I_{k2} 6 - I_{k3} 5 \\ 15 = I_{k1} 6 + I_{k2} 26 + I_{k3} 10 \\ 2 = -I_{k1} 2 + I_{k2} 4 + I_{k3} 11 \end{cases}$$

Решим систему с помощью определителей. Вычислим определитель системы Δ и частные определители $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$.

$$\Delta = \begin{vmatrix} 11 & 6 & -5 \\ 6 & 26 & 10 \\ -2 & 4 & 11 \end{vmatrix} = 11 \cdot 26 \cdot 11 + 6 \cdot 10 \cdot (-2) + 6 \cdot 4 \cdot (-5) - (-2) \cdot 26 \cdot (-5) - 6 \cdot 6 \cdot 11 - 4 \cdot 10 \cdot 11 = 1810$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 10 & 6 & -5 \\ 15 & 26 & 10 \\ 2 & 4 & 11 \end{vmatrix} = 10 \cdot 26 \cdot 11 + 15 \cdot 4 \cdot (-5) + 6 \cdot 10 \cdot 2 - 2 \cdot 26 \cdot (-5) - 15 \cdot 6 \cdot 11 - 4 \cdot 10 \cdot 10 = 1550$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 11 & 10 & -5 \\ 6 & 15 & 10 \\ -2 & 2 & 11 \end{vmatrix} = 11 \cdot 15 \cdot 11 + 10 \cdot 10 \cdot (-2) + 6 \cdot 2 \cdot (-5) - (-2) \cdot 15 \cdot (-5) - 6 \cdot 10 \cdot 11 - 2 \cdot 10 \cdot 11 = 525$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 11 & 6 & 10 \\ 6 & 26 & 15 \\ -2 & 4 & 2 \end{vmatrix} = 11 \cdot 26 \cdot 2 + 6 \cdot 15 \cdot (-2) + 4 \cdot 6 \cdot 10 - (-2) \cdot 26 \cdot 10 - 4 \cdot 15 \cdot 11 - 6 \cdot 6 \cdot 2 = 420$$

Вычисляем контурные токи:

$$I_{k1} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{1550}{1810} = 0,856 \text{ А}; \quad I_{k2} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{525}{1810} = 0,290 \text{ А}$$

$$I_{k3} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{420}{1810} = 0,232 \text{ А.}$$

Действительные токи ветвей:

$$I_1 = I_{k1} - I_{k3} = 0,856 - 0,232 = 0,624 \text{ А,}$$

$$I_2 = I_{k2} + I_{k3} = 0,290 + 0,232 = 0,522 \text{ А,}$$

$$I_3 = I_{k2} = 0,232 \text{ А,}$$

$$I_4 = I_{k1} + I_{k2} = 0,856 + 0,290 = 1,146 \text{ А,}$$

$$I_5 = I_{k2} = 0,290 \text{ А.}$$

3) Определить токи во всех ветвях схемы на основании метода наложения.

По методу наложения ток в любом участке цепи рассматривается

как алгебраическая сумма частных токов, созданных каждой ЭДС в отдельности.

а) Определяем частные токи от ЭДС E_1 , при отсутствии ЭДС E_2 , т. е. рассчитываем цепь по рис. 1.39.

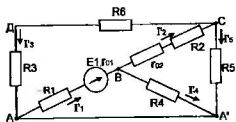


Рис. 1.39

Показываем направление частных токов от ЭДС E_1 и обозначаем буквой I с одним штрихом (I').

Решаем задачу методом "свертывания"

$$R_{2,02,365} = R_5 + r_{02} = 36 + 4 = 40 \text{ Ом}$$

$$R_{3,6} = R_5 + R_5 = 16 + 34 = 50 \text{ Ом}$$

$$R_{365} = \frac{R_5 R_{36}}{R_5 + R_{36}} = \frac{40 \cdot 50}{40 + 50} = 22,222 \text{ Ом}$$

$$R_{2,02,365} = R_{2,02} + R_{365} = 40 + 22,222 = 62,222 \text{ Ом}$$

$$R_{4,2,02,365} = \frac{R_4 R_{2,02,365}}{R_4 + R_{2,02,365}} = \frac{24 \cdot 62,222}{24 + 62,222} = 17,320 \text{ Ом}$$

$$R_{экв} = R_1 + R_{4,2,02,365} = 18 + 17,320 = 35,320 \text{ Ом}$$

Ток источника

$$I_1' = \frac{E_1}{R_{экв} + r_{01}} = \frac{40}{35,320 + 2} = 1,072 \text{ А}$$

Применяя формулу разброса и I-й закон Кирхгофа, вычисляем ток ветвей:

$$I_2' = I_1' \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_{2,02,365}} = 1,072 \cdot \frac{24}{24 + 62,222} = 0,298 \text{ А};$$

$$I_4' = I_1' - I_2' = 1,072 - 0,298 = 0,774 \text{ А};$$

$$I_5' = I_2' \cdot \frac{R_{36}}{R_{36} + R_5} = 0,298 \cdot \frac{50}{50 + 40} = 0,166 \text{ А};$$

$$I_3' = I_2' - I_5' = 0,298 - 0,166 = 0,132 \text{ А}.$$

б) Определяем частные токи от ЭДС E_2 при отсутствии ЭДС E_1 , т. е. рассчитываем простую цепь по рис. 1.40.

201
И.С.С. 2/66/10
17

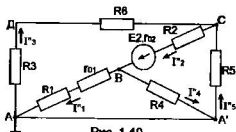


Рис. 1.40

Показываем направление частных токов от ЭДС E_2 и обозначаем их буквой I с двумя штрихами (I'').

Рассчитываем общее сопротивление цепи:

$$R_{36} = R_3 + R_5 = 16 + 34 = 50 \text{ Ом}$$

$$R_{1,01} = R_1 + r_{01} = 18 + 2 = 20 \text{ Ом}$$

$$R_{365} = \frac{R_{36} \cdot R_5}{R_{36} + R_5} = \frac{50 \cdot 40}{50 + 40} = 22,222 \text{ Ом}, \quad R_{1,01,4} = \frac{R_4 \cdot R_{1,01}}{R_4 + R_{1,01}} = \frac{20 \cdot 24}{20 + 24} = 10,909 \text{ Ом} :$$

$$R_{\text{экв}} = R_{1,01,4} + R_{365} + R_6 = 10,909 + 22,222 + 36 = 69,131 \text{ Ом}$$

Вычисляем ток источника

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_{\text{экв}} + r_{02}} = \frac{60}{69,131 + 4} = 0,820 \text{ А}$$

Применяя форму разброса и I-й закон Кирхгофа, вычисляем токи ветвей:

$$I_3'' = I_2'' \cdot \frac{R_5}{R_5 + R_{36}} = 0,820 \cdot \frac{40}{50 + 40} = 0,364 \text{ А};$$

$$I_5'' = I_2'' - I_3'' = 0,820 - 0,364 = 0,456 \text{ А};$$

$$I_1'' = I_2'' \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_{1,01}} = 0,820 \cdot \frac{24}{24 + 20} = 0,447 \text{ А};$$

$$I_4'' = I_2'' - I_1'' = 0,820 - 0,447 = 0,373 \text{ А}$$

Вычисляем токи ветвей исходной цепи (рис. 1.38), выполняя алгебраическое сложение частных токов, учитывая их направление:

$$I_1 = I_1'' - I_1' = 1,072 - 0,447 = 0,625 \text{ А};$$

$$I_2 = I_2'' - I_2' = 0,820 - 0,298 = 0,522 \text{ А};$$

$$I_3 = I_3'' - I_3' = 0,364 - 0,132 = 0,232 \text{ А};$$

$$I_4 = I_4'' + I_4' = 0,774 + 0,373 = 1,147 \text{ А};$$

$$I_5 = I_5'' - I_5' = 0,456 - 0,166 = 0,290 \text{ А}$$

4) Составить баланс мощностей для заданной схемы.

Источники E_1 и E_2 вырабатывают электрическую энергию, т. к. направление ЭДС и тока в ветвях с источниками совпадают. Баланс мощностей для заданной цепи запишется так:

$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = I_1^2 (R_1 + r_{01}) + I_2^2 (R_2 + r_{02}) + I_3^2 (R_3 + R_6) + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5$$

Подставляем числовые значения и вычисляем

$$40 \cdot 0,624 + 60 \cdot 0,522 = 0,624^2 \cdot (18 + 2) + 0,522^2 \cdot (36 + 4) + 0,232^2 \cdot (16 + 34) + 1,146^2 \cdot 24 + 0,290^2 \cdot 40;$$

$$56,280 \text{ Вт} = 56,262 \text{ Вт}$$

С учетом погрешности расчетов баланс мощностей получился.

5) Результаты расчетов токов по пунктам 2 и 3 представить в виде таблицы и сравнить.

Ток в ветви	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
Метод расчета	А	А	А	А	А
метод контурных токов	0,624	0,522	0,232	1,146	0,290
метод наложения	0,625	0,522	0,232	1,147	0,290

Расчет токов ветвей обоими методами с учетом ошибок вычислений практически одинаков.

6) Определить ток во второй ветви методом эквивалентного генератора.

Метод эквивалентного генератора используется для исследования работы какого-либо участка в сложной электрической цепи.

Для решения задачи методом эквивалентного генератора разделим электрическую цепь на две части: потребитель (исследуемая ветвь с сопротивлением R_2 , в которой требуется определить величину тока) и эквивалентный генератор (оставшаяся часть цепи, которая для потребителя R_2 служит источником электрической энергии, т. е. генератором). Получается схема замещения (рис. 1.41).

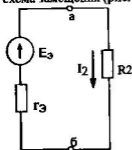


Рис 1.41

На схеме искомый ток I_2 определим по закону Ома для замкнутой цепи:

$$I_2 = \frac{E_3}{R_2 + r_3}$$

где E_3 — ЭДС эквивалентного генератора, ее величину определяют как напряжение на зажимах генератора в режиме холостого хода, $E_3 = U_{xx}$.
 r_3 — внутреннее сопротивление эквивалентного генератора, его величина рассчитывается как эквивалентное сопротивление пассивного двухполюсника относительно исследуемых зажимов.

Изображаем схему эквивалентного генератора в режиме холостого хода (рис. 1.42), т. е. при отключенном потребителе R_3 от зажимов a и b . В этой схеме есть контур, в котором течет ток режима холостого хода. Определим его величину:

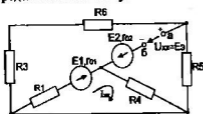


Рис. 1.42

$$I_{xx} = \frac{E_1}{R_1 + R_4 + r_{01}} = \frac{40}{18 + 24 + 2} = 0,909 \text{ А}$$

Зная I_{xx} , величины сопротивлений и ЭДС, в схеме можно определить U_{xx} как разность потенциалов между клеммами a и b . Для этого потенциал точки b будем считать известным и вычислим потенциал точки a .

$$\varphi_a = \varphi_6 + E_2 - I_{ж} \cdot R_4$$

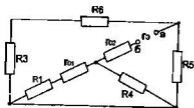
тогда

$$U_{жж} = \varphi_a - \varphi_6 = E_2 - I_{жж} \cdot R_4 = 60 - 0,909 \cdot 24 = 38,184 \text{ В}$$

$$E_2 - U_{жж} = 38,184 \text{ В.}$$

Для расчета внутреннего сопротивления эквивалентного генератора необходимо преобразовать активный двухполосник в пассивный (рис. 1.43), при этом ЭДС E_2 и E_1 из схемы исключается, а внутренние сопротивления этих источников r_{01} и r_{02} в схеме остаются.

Вычисляем эквивалентное сопротивление схемы (рис. 1.43) относительно зажимов a и b .



$$r_s = r_{02} + \frac{(R_1 + r_{01}) \cdot R_4}{R_1 + r_{01} + R_4} + \frac{(R_3 + R_6) \cdot R_5}{R_3 + R_6 + R_5}$$

$$r_s = 4 + \frac{(18 + 2) \cdot 24}{18 + 2 + 24} + \frac{(16 + 34) \cdot 40}{16 + 34 + 40} = 37,131 \text{ Ом}$$

Рис. 1.43

Зная ЭДС и внутреннее сопротивление эквивалентного генератора,

вычисляем ток в исследуемой ветви:

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + r_s} = \frac{38,184}{36 + 37,131} = 0,522 \text{ А.}$$

т. е. ток в этой ветви получился таким же, как и в пунктах 2 и 3.

7) Построить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, включающего обе ЭДС.

Возьмем контур АДСВА. Зададимся обходом контура по часовой стрелке. Заземируем одну из точек контура, пусть это будет точка А. Потенциал этой точки равен нулю $\varphi_A = 0$ (рис. 1.38).

Зная величину и направление токов ветвей и ЭДС, а также величины сопротивлений, вычислим потенциалы всех точек контура при переходе от элемента к элементу. Начнем обход от точки А.

$$\varphi_D = \varphi_A - I_3 R_3 = 0 - 0,232 \cdot 16 = -3,712 \text{ В;}$$

$$\varphi_C = \varphi_D - I_3 R_6 = -3,712 - 0,232 \cdot 34 = -11,6 \text{ В;}$$

$$\varphi_B = \varphi_C - I_2 R_2 = -11,6 - 0,522 \cdot 36 = -30,392 \text{ В;}$$

$$\varphi_B = \varphi_{B'} + E_2 - I_2 r_{02} = -30,392 + 60 - 0,522 \cdot 4 = 27,520 \text{ В};$$

$$\varphi_A = \varphi_B + I_1 r_{01} - E_1 = 27,520 + 0,624 \cdot 2 - 40 = -11,232 \text{ В};$$

$$\varphi_A = \varphi_B + I_1 R_1 = -11,232 + 0,624 \cdot 18 = 0 \text{ — проверочная точка.}$$

Строим потенциальную диаграмму. По оси абсцисс откладываем сопротивление контура в той последовательности, в которой производим обход контура, прикладывая сопротивления друг к другу, по оси ординат — потенциалы точек с учетом их знака.

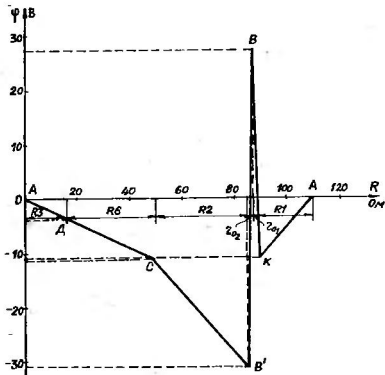
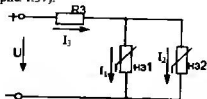


Рис. 1.44

1. 4. Методика расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока

Построить входную вольтамперную характеристику схемы (рис. 1.45). Определить токи во всех ветвях схемы и напряжения на отдельных элементах, используя полученные вольтамперные характеристики.

Использовать вольтамперные характеристики элементов "а" и "б" (рис. 1.37).



Дано: $U = 110 \text{ В}$,
 $R_3 = 20 \text{ Ом}$

Определить: $I_1, I_2, I_3, U_1, U_2, U_3$

Рис 1.45

Расчет цепи производим графическим методом. Для этого в общей системе координат строим вольтамперные характеристики (ВАХ) линейного и нелинейных элементов: $I_1 = f(U_1)$, $I_2 = f(U_2)$, $I_3 = f(U_3)$ (рис. 1.46).

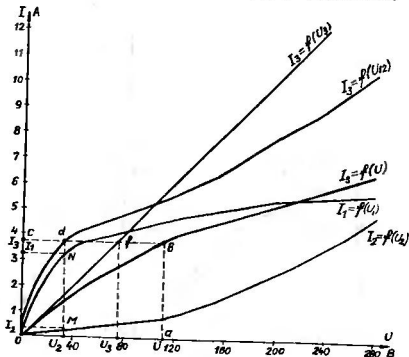


Рис. 1.46

ВАХ линейного элемента строим по уравнению $I = \frac{UR}{R}$. Она представляет собой прямую, проходящую через начало координат. Для опреде-

ления координаты второй точки ВАХ линейного элемента задаемся произвольным значением напряжения. Например, $U_R = 40$ В, тогда соответствующее значение тока $I_3 = \frac{U_R}{R_3} = \frac{40}{20} = 2$ А. Соединив полученную точку с началом координат, получим ВАХ линейного элемента.

Далее строится общая ВАХ цепи с учетом схемы соединения элементов. В нашей цепи соединение элементов смешанное. Поэтому графически "сворачиваем" цепь. Начинаем с разветвленного участка. Нелинейные элементы соединены параллельно, их ВАХ $I_1=f(U_1)$ и $I_2=f(U_2)$. С учетом этого строим общую для них ВАХ. Для этого задаемся напряжением и складываем токи при этом напряжении $I_2=I_1+I_2$. Точка пересечения этих значений тока и напряжения дает одну из точек их общей ВАХ. В результате получаем множество точек и по ним строим ВАХ $I_3=f(U_{12})$.

Далее мы имеем характеристики линейного элемента $I_3=f(U_3)$ и нелинейного элемента (нз12) $I_3=f(U_{12})$, которые соединены между собой последовательно. Строим для них общую ВАХ. В данном случае задаемся током и складываем напряжения. Проделываем это многократно. По полученным точкам строим общую ВАХ цепи $I_3=f(U)$.

Дальнейший расчет цепи производим по полученным графикам.

Чтобы найти токи и напряжения на всех элементах цепи, поступаем так: по оси напряжений находим значение напряжения, равное 110 В (точка "а"). Из этой точки восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с общей ВАХ $I_3=f(U)$, получим точку "в". Из точки "в" опускаем перпендикуляр на ось тока (точка "с"). Отрезок "ос" дает нам искомое значение общего тока $I_3=3,6$ А. Когда опускаем перпендикуляр из точки "в" на ось тока, то пересекаем ВАХ $I_3=f(U_1)$ и $I_3=f(U_{12})$ в точках "f" и "d" соответственно. Опуская перпендикуляры из этих точек на ось напряжения, получим напряжения на каждом участке цепи: $U_3=75$ В и $U_{12}=35$ В, но $U_{12}=U_1=U_2$, т. к. нелинейные элементы соединены параллельно. Чтобы найти токи I_1 и I_2 при $U_{12}=35$ В, опустим перпендикуляр из точки "d" на ось напряжений до пересечения с ВАХ $I_1=f(U_1)$ и $I_2=f(U_2)$ в точках "N" и "M". Опустив из этих точек перпендикуляры на ось токов, получим $I_2 = 0,4$ А и $I_1 = 3,2$ А. В результате имеем следующие значения токов и напряжений на всех элементах цепи: $I_1=3,2$ А; $I_2=0,4$ А; $I_3 = 3,6$ А; $U_1=35$ В; $U_2=35$ В; $U_3=75$ В.

2. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА: ОДНОФАЗНЫХ, ТРЕХФАЗНЫХ. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

2.1. Расчет однофазных линейных электрических цепей переменного тока

Задание

К зажимам электрической цепи подключен источник синусоидального напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ В частотой $f = 50$ Гц. Амплитуда, начальная фаза напряжения и параметры элементов цепи заданы в таблице 2.1. Схемы замещения цепи приведены на рис. 2.1–2.30.

Выполнить следующее:

- 1) начертить схему замещения электрической цепи, соответствующую варианту, рассчитать реактивные сопротивления элементов цепи;
- 2) определить действующие значения токов во всех ветвях цепи;
- 3) записать уравнение мгновенного значения тока источника;
- 4) составить баланс активных и реактивных мощностей;
- 5) построить векторную диаграмму токов, совмещенную с топографической векторной диаграммой напряжений.

Таблица 2.1

*Числовые параметры схем
однофазных электрических цепей переменного тока*

№ варианта	U_m В	ψ_u град	R_1 Ом	R_2 Ом	L_1 мГн	L_2 мГн	C_1 мкФ	C_2 мкФ
1	180	60	25	50	79,5	127,2	318	79,5
2	311	30	20	30	63,6	127,2	79,5	53,0
3	540	-45	50	100	159	254,4	63,5	39,8
4	320	90	40	60	127,2	190,8	39,8	53
5	180	0	20	30	127,2	63,8	159	159
6	32	45	7,5	15	23,8	38,2	42,5	199
7	54	60	10	20	31,8	50,9	318	199
8	20	-20	15	30	15,9	127	79,5	106
9	32	30	30	45	190,8	95,4	106	106
0	54	60	10	15	63,6	31,8	318	318

Примечание. Номер схемы соответствует порядковому номеру, под которым фамилия учащегося записана в журнале учебных занятий группы.
Числовые параметры схемы соответствуют последней цифре ее порядкового номера.

**Варианты схем
однофазных электрических цепей переменного тока**

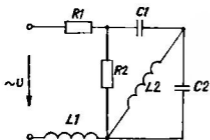


Рис. 2.1

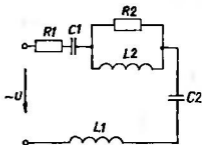


Рис. 2.2

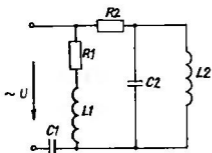


Рис. 2.3

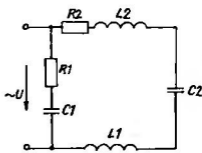


Рис. 2.4

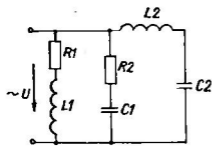


Рис. 2.5

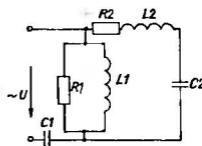


Рис. 2.6

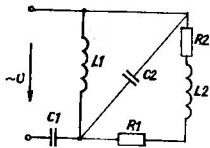


Рис. 2.7

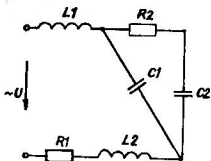


Рис. 2.8

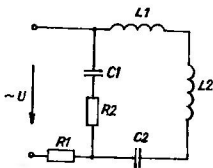


Рис. 2.9

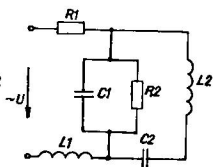


Рис. 2.10

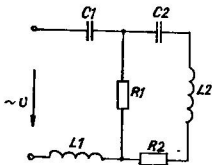


Рис. 2.11

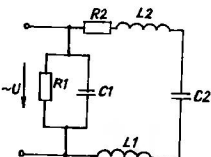


Рис. 2.12

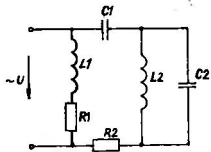


Рис. 2.13

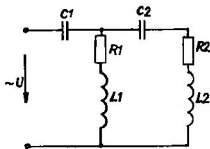


Рис. 2.14

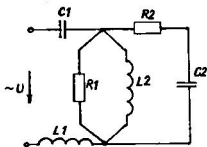


Рис. 2.15

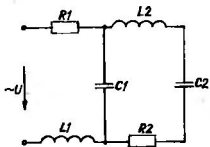


Рис. 2.16

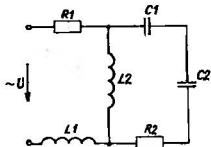


Рис. 2.17

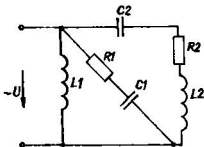


Рис. 2.18

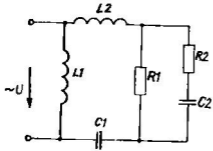


Рис. 2.19

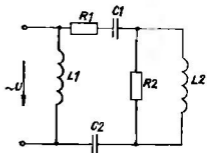


Рис. 2.20

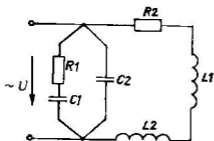


Рис. 2.21

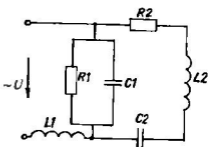


Рис. 2.22

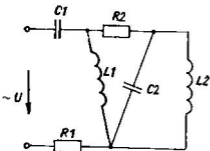


Рис. 2.23

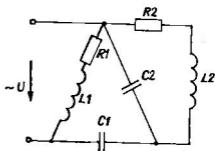


Рис. 2.24

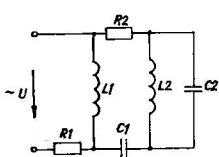


Рис. 2.25

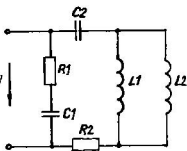


Рис. 2.26

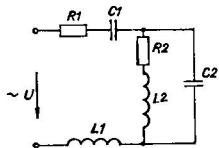


Рис. 2.27

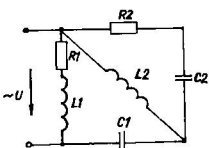


Рис. 2.28

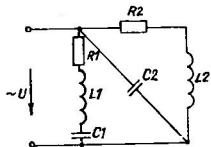


Рис. 2.29

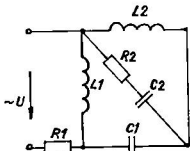


Рис. 2.30

2.2. Расчет трехфазных линейных электрических цепей переменного тока

Задание

В соответствии с данными таблицы 2.2 начертить схему соединения сопротивлений в трехфазной цепи.

Определить:

- 1) фазные токи;
- 2) линейные токи (при соединении треугольником);
- 3) ток в нулевом проводе (при соединении звездой);
- 4) активную, реактивную и полную мощность каждой фазы и всей трехфазной цепи;
- 5) угол сдвига фаз между током и напряжением в каждой фазе;
- 6) начертить в масштабе векторную диаграмму трехфазной цепи.

Таблица 2.2

Числовые параметры и схемы соединения трехфазных линейных электрических цепей переменного тока

	Uл В	Uф В	Сопротивления фаз									Схема соеди- нения
			R _A Ом	R _B Ом	R _C Ом	X _{LA} Ом	X _{LB} Ом	X _{LC} Ом	X _{CA} Ом	X _{CB} Ом	X _{CC} Ом	
1	346	-	15,36	25,8	12,5	12,9	-	21,65	-	30,7	-	Y
2	-	127	10	8	-	-	-	15	-	6	5	Y
3	380	-	19,05	8,45	28,4	11	-	33,8	-	7,1	-	Δ
4	-	127	26	36	-	-	16	45	36	-	-	Δ
5	-	220	31,2	13,5	43,3	21,7	-	62,3	-	13,5	-	Y
6	380	-	12	-	10	16	-	-	-	18	15	Y
7	38	-	1,88	3,8	3,1	0,68	-	2,57	-	2,2	-	Δ
8	220	-	-	12	-	-	16	28	35	-	-	Δ
9	-	100	18,12	8,2	17,68	8,48	-	17,68	-	5,75	-	Y
10	220	-	-	12	8	-	16	-	25	-	6	Y
11	-	127	6,14	2,87	1,37	5,15	-	3,76	-	4,1	-	Δ
12	-	220	-	6	10	18	-	-	8	15	-	Δ
13	1038	-	115	63	78	164	-	290	-	135	-	Y
14	-	220	4	-	8	3	-	6	-	12	-	Y
15	400	-	35,35	22,96	10,58	35,35	-	22,65	-	32,8	-	Δ
16	380	-	12	-	16	20	-	25	-	18	-	Δ
17	865	-	64,4	62,5	85,5	76,8	-	235	-	108,25	-	Y
18	-	220	36	-	-	-	20	50	48	65	-	Y
19	50	-	1,73	2,8	2,5	1	-	4,33	-	2,8	-	Δ
20	-	127	-	8	-	12	-	-	-	12	20	Δ

Ул В	U _φ В	Сопротивления фаз										Схема соеди- нения
		R _A Ом	R _B Ом	R _C Ом	X _{LA} Ом	X _{LB} Ом	X _{LC} Ом	X _{CA} Ом	X _{CB} Ом	X _{CC} Ом		
21	220	-	50	72	-	-	32	90	72	-	-	Y
22	-	220	24	-	20	32	-	-	-	36	30	Y
23	380	-	100	80	-	-	-	150	-	60	50	Δ
24	-	127	-	-	120	80	-	160	-	250	60	Δ
25	380	-	-	60	100	180	-	-	80	150	-	Y
26	380	-	40	-	80	30	-	60	-	120	-	Y
27	-	220	120	-	160	200	-	250	-	180	-	Y
28	380	-	360	-	-	-	200	500	480	650	-	Δ
29	220	-	80	-	-	120	-	-	-	120	200	Y
30	-	600	300	126	156	328	-	580	-	270	-	Δ

Примечание. При соединении звездой с нулевым проводом (Y) сопротивления с индексом А включаются в фазу А, с индексом В — в фазу В, с индексом С — в фазу С. При соединении треугольником (Δ) сопротивления с индексом А включаются в фазу АВ, с индексом В — в фазу ВС, с индексом С — в фазу СА и соответственно обозначаются.

Номер варианта соответствует номеру, под которым учащийся записан в журнале учебных занятий группы.

2.3. Исследование переходных процессов в электрических цепях

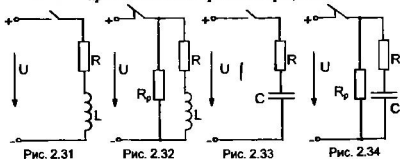
Задание

При замыкании или размыкании выключателя цепь (рис. 2.31–2.34), содержащая катушку индуктивности или конденсатор, подключается к источнику постоянного напряжения или отключается от него.

Определить практическую длительность переходного процесса, ток в цепи и энергию электрического или магнитного поля при $t = 3\tau$. Построить графики $i = f(t)$ и $e = f(t)$ для рис. 2.31–2.32 или $u = f(t)$ и $i = f(t)$ для рис. 2.33–2.34.

Данные для расчета взять из таблицы 2.3. Номер варианта определяется так же, как и в задаче 2.2.

Варианты схем электрических цепей при исследовании переходных процессов



*Числовые параметры схем электрических цепей
при исследовании переходных процессов*

№ варианта	L Гн	C мкФ	R Ом	R _р Ом	U В	Номер рисунка
1	0,25	-	25	-	100	2.31
2	0,5	-	25	25	50	2.32
3	-	800	150	-	150	2.33
4	-	100	500	500	200	2.34
5	0,5	-	50	-	100	2.31
6	0,28	-	50	50	100	2.32
7	-	50	10 ⁴	-	50	2.33
8	-	300	50	50	25	2.34
9	0,6	-	30	-	60	2.31
10	0,9	-	300	150	450	2.32
11	-	50	100	-	50	2.33
12	-	150	100	400	50	2.34
13	0,5	-	10	-	100	2.31
14	0,16	-	60	20	80	2.32
15	-	20	10 ⁵	-	100	2.33
16	-	15	600	1200	180	2.34
17	0,5	-	10	-	150	2.31
18	0,12	-	12	0	60	2.32
19	-	100	2000	-	300	2.33
20	-	30	300	400	400	2.34
21	0,8	-	70	-	70	2.31
22	0,75	-	140	60	200	2.32
23	-	50	10 ⁴	-	50	2.33
24	-	10	2 · 10 ⁶	10 ⁸	300	2.34
25	1,25	-	25	-	50	2.31
26	0,8	-	40	60	100	2.32
27	-	40	10 ⁴	-	200	2.33
28	-	100	2000	1000	300	2.34
29	0,5	-	10	-	50	2.31
30	-	25	3 · 10 ⁴	-	300	2.33

2.4. Методика расчета однофазных линейных электрических цепей переменного тока

К зажимам электрической цепи, схема замещения которой приведена на рис. 2.35, подключен источник синусоидального напряжения $u = 311 \cdot \sin(\omega t + 45^\circ)$ В частотой $f = 50$ Гц.

Параметры элементов схемы замещения: $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 8$ Ом,

$$L_1 = 39,8 \text{ мГн}, L_2 = 19 \text{ мГн}, C_1 = 162,5 \text{ мкФ}, C_2 = 192 \text{ мкФ}.$$

Выполнить следующее:

- 1) определить реактивные сопротивления элементов цепи;
- 2) определить действующие значения токов во всех ветвях цепи;
- 3) записать уравнение мгновенного значения тока источника;
- 4) составить баланс активных и реактивных мощностей;
- 5) построить векторную диаграмму токов, совмещенную с топографической векторной диаграммой напряжений.

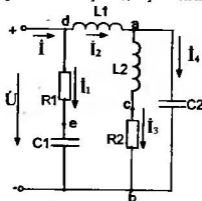


Рис. 2.35

Дано: $R_1 = 5 \text{ Ом}, R_2 = 8 \text{ Ом}$
 $L_1 = 39,8 \text{ мГн}, L_2 = 19 \text{ мГн}$
 $C_1 = 162,5 \text{ мкФ}, C_2 = 192 \text{ мкФ}$

Определить: $X_{L1}, X_{L2}, X_{C1}, X_{C2},$
 I, I_1, I_2, I_3, I_4, i

1) Реактивные сопротивления элементов цепи:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 2\pi f L_1 = 314 \cdot 39,8 \cdot 10^{-3} = 12,5 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 2\pi f L_2 = 314 \cdot 19 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ Ом};$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1 \cdot 10^6}{314 \cdot 162,5} = 19,6 \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2\pi f C_2} = \frac{1 \cdot 10^6}{314 \cdot 192} = 16,6 \text{ Ом}$$

2) Расчет токов в ветвях цепи выполняем методом эквивалентных преобразований.

Представим схему, приведенную на рис. 2.35, в следующем виде:

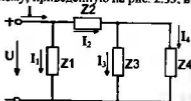


Рис 2.36

Определяем длины векторов токов и напряжений:

$$I_1 = \frac{I}{M_1} = \frac{11,6}{2} = 5,8 \text{ см};$$

$$I_U = \frac{U}{M_U} = \frac{220}{20} = 11 \text{ см};$$

$$I_{II} = \frac{I_1}{M_1} = \frac{10,9}{2} = 5,45 \text{ см};$$

$$I_{Ude} = \frac{U_{de}}{M_U} = \frac{54,5}{20} = 2,73 \text{ см};$$

$$I_{I2} = \frac{I_2}{M_1} = \frac{12,4}{2} = 6,2 \text{ см};$$

$$I_{Uab} = \frac{U_{eb}}{M_U} = \frac{214}{20} = 10,7 \text{ см};$$

$$I_{I3} = \frac{I_3}{M_1} = \frac{15,5}{2} = 7,75 \text{ см};$$

$$I_{Ude} = \frac{U_{da}}{M_U} = \frac{155}{20} = 7,75 \text{ см};$$

$$I_{I4} = \frac{I_4}{M_1} = \frac{9,35}{2} = 4,68 \text{ см};$$

$$I_{Uac} = \frac{U_{ac}}{M_U} = \frac{93}{20} = 4,65 \text{ см};$$

$$I_{Uab} = \frac{U_{ab}}{M_U} = \frac{155}{20} = 7,75 \text{ см};$$

$$I_{Ucb} = \frac{U_{cb}}{M_U} = \frac{124}{20} = 6,2 \text{ см}$$

На комплексной плоскости в масштабе откладываем векторы токов в соответствии с расчетными значениями, при этом положительные фазовые углы отсчитываем от оси (+1) против часовой стрелки, а отрицательные — по часовой стрелке. Так, вектор тока $I_1 = 10,9e^{j120,6^\circ}$ А повернут относительно оси (+1) на угол $120,6^\circ$ и длина его $I_{I1} = 5,45$ см, вектор тока $I_2 = 12,4$ А совпадает с действительной осью и длина его $I_{I2} = 6,2$ см и т. д.

Топографическая векторная диаграмма напряжений характерна тем, что каждой точке диаграммы соответствует определенная точка электрической цепи. Построение векторов напряжений ведем, соблюдая порядок расположения элементов цепи и ориентируя векторы напряжений относительно векторов тока: на активном сопротивлении ток и напряжение совпадают по фазе, на индуктивном элементе напряжение опережает ток на 90° , а на емкостном напряжение отстает от тока на 90° . Направление обхода участков цепи выбираем, как принято, противоположно положительному направлению токов. Обход начинаем от точки "b", потенциал которой принимаем за исходный ($\varphi_b = 0$). Точку "b" помещаем в начало координат комплексной плоскости. При переходе от точки "b" к точке "e" потенциал повышается на величину падения напряжения на емкостном сопротивлении X_{C1} . Вектор этого напряжения \dot{U}_{eb} отстает по фазе от вектора тока \dot{I}_1 на 90° . Конец вектора \dot{U}_{eb} определяет потенциал точки "e". Потенциал точки "d" выше, чем потенциал точки "e", на величину падения напряжения $U_{de} = I_1 R_1$. Вектор \dot{U}_{de} откладываем от точки "e" параллельно вектору тока \dot{I}_1 . Конец \dot{U}_{de} определяет потенциал точки "d". Соединив отрезком прямой "b" и "d", получим вектор напряжения на зажимах цепи

$$\dot{U} = \dot{U}_{db} = 220e^{j45^\circ} \text{ В.}$$

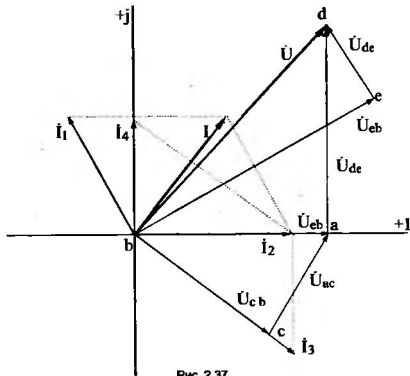


Рис. 2.37

Аналогично строим векторы напряжений других участков цепи, сохраняя обход навстречу току. От точки "b" проводим вектор \dot{U}_{cb} параллельно вектору \dot{I}_3 . Конец вектора \dot{U}_{cb} определяет потенциал точки "c". От точки "c" откладываем вектор \dot{U}_{ac} , опережающий вектор тока \dot{I}_2 на 90° , т. к. участок "ac" содержит индуктивное сопротивление x_{L2} . Затем от точки "a" откладываем вектор \dot{U}_{da} , опережающий вектор тока \dot{I}_2 на 90° . Конец \dot{U}_{da} определяет потенциал точки "d".

Соединив отрезком прямой "b" и "a", получим вектор напряжений $\dot{U}_{ab} = 155 \text{ В}$.

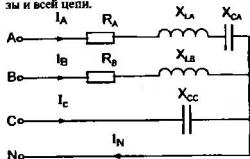
2.5. Методика расчета трехфазных электрических цепей переменного тока

2.5.1. Методика расчета трехфазных электрических цепей переменного тока при соединении потребителей звездой

В цепи, изображенной на схеме (рис. 2.38), потребители трехфазного тока соединены звездой.

Известно линейное напряжение $U_l = 380$ В и сопротивления фаз: $R_A = 11$ Ом, $X_{LA} = 34$ Ом, $X_{CA} = 53$ Ом, $R_B = 11$ Ом, $X_{LB} = 19$ Ом, $X_{CC} = 22$ Ом.

Определить полные сопротивления фаз, фазные токи и ток в нейтральном проводе, активную, реактивную и полную мощности каждой фазы и всей цепи.



Дано: $U_l = 380$ В, $R_A = 11$ Ом,
 $X_{LA} = 34$ Ом, $X_{CA} = 53$ Ом,
 $R_B = 11$ Ом, $X_{LB} = 19$ Ом,
 $X_{CC} = 22$ Ом

Определить: $Z_A, Z_B, Z_C,$
 $I_A, I_B, I_C, I_N, P, Q, S$

Рис. 2.38

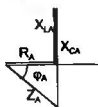
ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА (расчет с применением векторных диаграмм)

1. При соединении звездой $U_l = \sqrt{3} U_\Phi$, поэтому

$$U_\Phi = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$$

Так как есть нейтральный провод, то $U_A = U_B = U_C = 220$ В.

2. Вычисляем сопротивление фаз и углы φ определяем по диаграммам сопротивлений.



$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + (X_{LA} - X_{CA})^2} = \sqrt{11^2 + (34 - 53)^2} = 22 \text{ Ом}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{X_{LA} - X_{CA}}{R_A} = \frac{-19}{11} = -1,73$$

$\varphi_A = \operatorname{arctg}(-1,73) = -60^\circ$ — в фазе А напряжение отстает от тока на 60° .

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_{LB}^2} = \sqrt{11^2 + 19^2} = 22 \text{ Ом}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{X_{LB}}{R_B} = \frac{19}{11} = 1,73$$

$\varphi_B = \operatorname{arctg} 1,73 = 60^\circ$ — в фазе В напряжение опережает ток на 60°

$$Z_C = X_{CC} = 22 \text{ Ом}$$

$\varphi_C = -90^\circ$ — в фазе С напряжение отстает от тока на 90° , т. к. в цепь включен конденсатор.

3. Фазные токи можно определить следующим образом:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{220}{22} = 10 \text{ А}; \quad \varphi_A = -60^\circ;$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{220}{22} = 10 \text{ А}; \quad \varphi_B = 60^\circ;$$

$$I_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{220}{22} = 10 \text{ А}; \quad \varphi_C = -90^\circ.$$

4. Чтобы вычислить ток в нейтральном проводе, нужно построить векторную диаграмму цепи.

На векторной диаграмме под углом 120° друг относительно друга строятся векторы фазных напряжений одинаковой длины.

Векторы фазных токов строятся в масштабе под вычисленными углами φ по отношению к фазным напряжениям. В фазе А нагрузка носит емкостной характер, значит, ток I_A опережает напряжение U_A на угол φ_A .

В фазе В нагрузка носит индуктивный характер, следовательно, ток I_B отстает от напряжения U_B на угол φ_B .

В фазе С нагрузка емкостная, следовательно, ток I_C опережает напряжение U_C на угол $\varphi_C = 90^\circ$. $M_I = 2,5 \text{ А/см}$ — масштаб.

$$I_{IA} = \frac{I_A}{M_I} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ см}; \quad I_{IB} = \frac{I_B}{M_I} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ см}.$$

$$I_{IC} = \frac{I_C}{M_I} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ см}.$$

Ток в нейтральном проводе равен геометрической (векторной) сумме фазных токов:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$$

Измерив длину вектора I_{IN} , находим ток $I_N = I_{IN} \cdot M_1$

$$I_N = 5,7 \cdot 2,5 = 14,25 \text{ A}$$

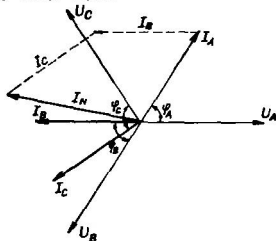


Рис. 2.39

5. Определим активные мощности фаз:

$$P_A = U_A \cdot I_A \cdot \cos\varphi_A = 220 \cdot 10 \cdot \cos(-60^\circ) = 1100 \text{ Вт},$$

$$P_B = U_B \cdot I_B \cdot \cos\varphi_B = 220 \cdot 10 \cdot \cos 60^\circ = 1100 \text{ Вт},$$

$$P_C = U_C \cdot I_C \cdot \cos\varphi_C = 220 \cdot 10 \cdot \cos(-90^\circ) = 0 \text{ Вт}$$

6. Активная мощность трехфазной цепи:

$$P = P_A + P_B + P_C = 1100 + 1100 = 2200 \text{ Вт}$$

7. Определяем реактивные мощности фаз:

$$Q_A = U_A \cdot I_A \cdot \sin\varphi_A = 220 \cdot 10 \cdot \sin(-60^\circ) = -1905 \text{ ВАр}$$

$$Q_B = U_B \cdot I_B \cdot \sin\varphi_B = 220 \cdot 10 \cdot \sin 60^\circ = 1905 \text{ ВАр}$$

$$Q_C = U_C \cdot I_C \cdot \sin\varphi_C = 220 \cdot 10 \cdot \sin(-90^\circ) = -2200 \text{ ВАр}$$

$$Q_N = U_N \cdot I_N \cdot \sin\varphi_N = 220 \cdot 14,25 \cdot \sin 90^\circ = 3135 \text{ ВАр}$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C + Q_N = -1905 + 1905 - 2200 + 3135 = 935 \text{ ВАр}$$

$$Q = P \cdot \tan\varphi = 2200 \cdot \tan 23,1^\circ = 935 \text{ ВАр}$$

$$Q = P \cdot \tan\varphi = 2200 \cdot \tan 23,1^\circ = 935 \text{ ВАр}$$

$$Q = P \cdot \tan\varphi = 2200 \cdot \tan 23,1^\circ = 935 \text{ ВАр}$$

$$S_C = U_C \cdot I_C = 220 \cdot 10 = 2200 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2200^2 + 2200^2} = 3111 \text{ В} \cdot \text{А}$$

СИМВОЛИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА

Строгий аналитический расчет трехфазных цепей производится символическим методом, т. е. в комплексной форме.

1. Выразим в комплексной форме фазные напряжения:

$$\dot{U}_A = U_\phi = 220e^{j0^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ} = 220e^{j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ} = 220e^{-j120^\circ} \text{ В}$$

2. Выразим сопротивления фаз в комплексной форме:

$$\underline{Z}_A = R_A + jX_{LA} - jX_{CA} = 11 + j34 - j53 = (11 - j19) \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_B = R_B + jX_{LB} = (11 + j19) \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = -jX_{CC} = (-j22) \text{ Ом}$$

Переведем комплексные сопротивления фаз из алгебраической формы в показательную.

$$\underline{Z}_A = 11 - j19 = \sqrt{11^2 + 19^2} \cdot e^{j \arctg \frac{-19}{11}} = 22e^{-j60^\circ} \text{ Ом},$$

где $Z_A = 22 \text{ Ом}$ — полное сопротивление фазы А;

$\varphi_A = -60^\circ$ — угол сдвига фаз между током и напряжением в фазе А.

Аналогично определяем:

$$\underline{Z}_B = 11 + j19 = 22e^{j60^\circ} \text{ Ом},$$

где $Z_B = 22 \text{ Ом}$; $\varphi_B = 60^\circ$;

$$\underline{Z}_C = -j22 = 22e^{-j90^\circ} \text{ Ом},$$

где $Z_C = 22 \text{ Ом}$, $\varphi_C = -90^\circ$

3. Находим комплексы фазных токов:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} = \frac{220e^{j0^\circ}}{22e^{-j60^\circ}} = 10e^{j60^\circ} \text{ А},$$

модуль $I_A = 10 \text{ А}$, аргумент $\psi_A = 60^\circ$,

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{22e^{j60^\circ}} = 10e^{-j180^\circ} \text{ А},$$

модуль $I_B = 10 \text{ А}$, аргумент $\psi_B = -180^\circ$,

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{220e^{j120^\circ}}{22e^{-j90^\circ}} = 10e^{j210^\circ} \text{ A.}$$

модуль $I_C = 10 \text{ A}$, аргумент $\Psi_C = 210^\circ$.

Находим алгебраическую форму записи комплексов фазных токов:

$$I_A = 10e^{j60^\circ} = 10\cos 60^\circ + j10\sin 60^\circ = (5 + j8,66) \text{ A};$$

$$I_B = 10e^{-j160^\circ} = 10\cos(-180^\circ) + j10\sin(-180^\circ) = -10 \text{ A};$$

$$I_C = 10e^{j210^\circ} = 10\cos 210^\circ + j10\sin 210^\circ = (-8,66 - j5) \text{ A}.$$

4. Вычисляем ток в нейтральном проводе:

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 5 + j8,66 - 10 - 8,66 - j5 = -13,66 + j3,66 = 14,14e^{j165^\circ} \text{ A}.$$

Модуль $I_N = 14,14 \text{ A}$, аргумент $\Psi_N = 165^\circ$.

5. Вычисляем мощности фаз и всей цепи:

$$\begin{aligned} \bar{S}_A &= \dot{U}_A \cdot \dot{I}_A^* = 220 \cdot 10e^{-j60^\circ} = 2200e^{-j60^\circ} = 2200 \cdot \cos(-60^\circ) + j2200 \cdot \sin(-60^\circ) = \\ &= (1100 - j1905) \text{ В}\cdot\text{А}, \end{aligned}$$

где $S_A = 2200 \text{ В}\cdot\text{А}$; $P_A = 1100 \text{ Вт}$; $Q_A = -1905 \text{ вар}$

$$\begin{aligned} \bar{S}_B &= \dot{U}_B \cdot \dot{I}_B^* = 220e^{-j120^\circ} \cdot 10e^{j180^\circ} = 2200e^{j60^\circ} = 2200 \cdot \cos 60^\circ + j2200 \cdot \sin 60^\circ = (1100 + j1905) \text{ В}\cdot\text{А}, \\ \text{где } S_B &= 2200 \text{ В}\cdot\text{А}; P_B = 1100 \text{ Вт}; Q_B = 1905 \text{ вар}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_C &= \dot{U}_C \cdot \dot{I}_C^* = 220e^{j120^\circ} \cdot 10e^{-j210^\circ} = 2200e^{-j90^\circ} = 2200 \cdot \cos(-90^\circ) + j2200 \cdot \sin(-90^\circ) = (-j2200) \text{ В}\cdot\text{А}, \\ \text{где } S_C &= 2200 \text{ В}\cdot\text{А}; P_C = 0 \text{ Вт}; Q_C = -2200 \text{ вар.} \quad \text{т о г д а} \end{aligned}$$

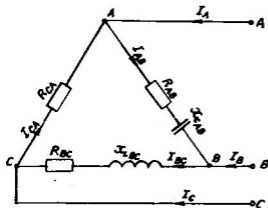
$$\bar{S} = \bar{S}_A + \bar{S}_B + \bar{S}_C = 1100 - j1905 + 1100 + j1905 - j2200 = 2200 - j2200 = 3111e^{-j45^\circ} \text{ В}\cdot\text{А},$$

где $S = 3111 \text{ В}\cdot\text{А}$; $P = 2200 \text{ Вт}$; $Q = -2200 \text{ вар}$.

2.5.2. Методика расчета трехфазных электрических цепей переменного тока при соединении треугольником

В цепи, изображенной на схеме (рис. 2.40), потребители соединены треугольником. Известно линейное напряжение $U_L = 380 \text{ В}$ и сопротивления фаз $R_{AB} = 19 \text{ Ом}$, $X_{CAB} = 11 \text{ Ом}$, $R_{BC} = 12 \text{ Ом}$, $X_{LBC} = 16 \text{ Ом}$, $R_{CA} = 22 \text{ Ом}$.

Определить фазные, линейные токи, мощности активные, реактивные, полные мощности каждой фазы и всей цепи. Построить векторную диаграмму цепи.



Дано: $U_{лл} = 380 \text{ В}$,
 $R_{AB} = 19 \text{ Ом}$,
 $X_{CA} = 11 \text{ Ом}$,
 $R_{BC} = 12 \text{ Ом}$,
 $X_{LBC} = 16 \text{ Ом}$,
 $R_{CA} = 22 \text{ Ом}$.

Определить: $I_A, I_B,$
 $I_C, I_{AB},$
 $I_{BC}, I_{CA},$
 P, Q, S

Рис. 2.40

При соединении трехфазной цепи треугольником расчет будем вести символическим методом.

1. Модули фазных напряжений при соединении треугольником равны линейным напряжениям

$$U_{л} = U_{ф} = 380 \text{ В, то есть } U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380 \text{ В.}$$

Комплексы данных напряжений запишем из условия, что вектор \dot{U}_{AB} совмещен с действительной осью комплексной плоскости,

$$\dot{U}_{AB} = U_{л} e^{j0^\circ} = 380 e^{j0^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{BC} = U_{л} e^{j120^\circ} = 380 e^{-j120^\circ} \text{ В;}$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{л} e^{j120^\circ} = 380 e^{j120^\circ} \text{ В}$$

2. Вычислим комплексы фазных сопротивлений:

$$Z_{AB} = R_{AB} - jX_{CA} = 19 - j11 = 22 e^{-j30^\circ} \text{ Ом,}$$

$$\text{где } Z_{AB} = 22 \text{ Ом, } \varphi_{AB} = -30^\circ;$$

$$Z_{BC} = R_{BC} + jX_{LBC} = 12 + j16 = 20 e^{+j53^\circ} \text{ Ом,}$$

$$\text{где } Z_{BC} = 20 \text{ Ом, } \varphi_{BC} = 53^\circ;$$

$$Z_{CA} = R_{CA} = 22 \text{ Ом,}$$

$$\text{где } Z_{CA} = 22 \text{ Ом, } \varphi_{CA} = 0^\circ$$

3. Определяем фазные токи:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{380e^{j0^\circ}}{22e^{-j30^\circ}} = 17,27e^{j30^\circ} = (14,96 + j8,64) \text{ А},$$

модуль $I_{AB} = 17,27 \text{ А}$, $\psi_{AB} = 30^\circ$;

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{380e^{-j120^\circ}}{20e^{j53^\circ}} = 19e^{-j173^\circ} = (-18,86 - j2,32) \text{ А},$$

модуль $I_{BC} = 19 \text{ А}$, $\psi_{BC} = -173^\circ$;

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{380e^{j120^\circ}}{22e^{j0^\circ}} = 17,27e^{j120^\circ} = (-8,64 + j14,96) \text{ А},$$

модуль $I_{CA} = 17,27 \text{ А}$, $\psi_{CA} = 120^\circ$.

4. Находим линейные токи из уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа для узлов В, А, С (рис. 2.40).

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 14,96 + j8,64 + 8,64 - j14,96 = 23,6 - j6,32 = 24,43e^{-j15^\circ} \text{ А},$$

модуль $I_A = 24,43 \text{ А}$, аргумент $\psi_A = -15^\circ$;

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = -18,86 - j2,32 - 14,96 - j8,64 = -33,82 - j10,96 = 35,55e^{j198^\circ} \text{ А},$$

модуль $I_B = 35,55 \text{ А}$, аргумент $\psi_B = 198^\circ$;

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = -8,64 + j14,96 + 18,86 + j2,32 = 10,22 + j17,28 = 20,1e^{j59,4^\circ} \text{ А},$$

модуль $I_C = 20,1 \text{ А}$, аргумент $\psi_C = 59,4^\circ$.

5. Вычисляем мощности каждой фазы и всей цепи:

$$\dot{S}_{AB} = \dot{U}_{AB} \cdot \dot{I}_{AB} = 380e^{j0^\circ} \cdot 17,27e^{-j30^\circ} = 6563e^{-j30^\circ} = (5684 - j3282) \text{ В}\cdot\text{А},$$

где $S_{AB} = 6563 \text{ В}\cdot\text{А}$, $P_{AB} = 5684 \text{ Вт}$, $Q_{AB} = -3282 \text{ вар}$.

$$\dot{S}_{BC} = \dot{U}_{BC} \cdot \dot{I}_{BC} = 380e^{-j120^\circ} \cdot 19e^{j173^\circ} = 7220e^{j53^\circ} = (4345 + j5766) \text{ В}\cdot\text{А},$$

где $S_{BC} = 7200 \text{ В}\cdot\text{А}$, $P_{BC} = 4345 \text{ Вт}$, $Q_{BC} = 5766 \text{ вар}$;

$$\dot{S}_{CA} = \dot{U}_{CA} \cdot \dot{I}_{CA} = 380e^{j120^\circ} \cdot 17,27e^{-j120^\circ} = 6563e^{j0^\circ} = 6563 \text{ В}\cdot\text{А},$$

где $S_{CA} = P_{CA} = 6563 \text{ Вт}$, $Q_{CA} = 0 \text{ вар}$;

$$\dot{S} = \dot{S}_{AB} + \dot{S}_{BC} + \dot{S}_{CA} = 5684 - j3282 + 4345 + j5766 + 6563 =$$

$$= 16592 + j2484 = 16777e^{j8,5^\circ} \text{ В}\cdot\text{А},$$

где $S = 16777 \text{ В}\cdot\text{А}$, $P = 16592 \text{ Вт}$, $Q = 2484 \text{ вар}$.

6. Строим в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов.

Векторы фазных токов \bar{I}_{AB} , \bar{I}_{BC} , \bar{I}_{CA} строятся под углами ψ_{AB} , ψ_{BC} , ψ_{CA} к действительной оси. К концам векторов \bar{I}_{AB} , \bar{I}_{BC} , \bar{I}_{CA} при-
страиваются отрицательные фазные токи согласно уравнениям:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}$$

$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}$$

Замыкающие векторные треугольники векторов \bar{I}_{AB} , \bar{I}_{BC} , \bar{I}_{CA} представляют в выбранном масштабе линейные токи.

Выбираем масштаб: $M_I = 4 \text{ A/cm}$.

$$l_{I_{AB}} = \frac{I_{AB}}{M_I} = \frac{17,27}{4} = 4,3 \text{ см}$$

$$l_{I_{BC}} = \frac{I_{BC}}{M_I} = \frac{19}{4} = 4,75 \text{ см}$$

$$l_{I_{CA}} = \frac{I_{CA}}{M_I} = \frac{17,27}{4} = 4,3 \text{ см}$$

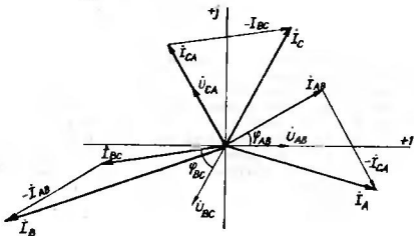


Рис. 2.41

2.6. Методика исследования переходных процессов в электрических цепях

2.6.1. Методика исследования переходных процессов в электрических цепях, содержащих катушку индуктивности

Цепь содержит катушку с сопротивлением $R=10$ Ом и индуктивностью $L=200$ мГн, $R_p=10$ Ом, напряжение источника питания 60 В.

Определить закон изменения тока и ЭДС самоиндукции в цепи. Определить практическую длительность переходного процесса и энергию магнитного поля при $t = 2\tau$. Схема цепи приведена на рис. 2.42.

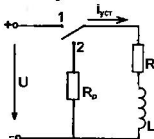


Рис. 2.42

Дано: $R = 10$ Ом
 $L = 200$ мГн
 $R_p = 10$ Ом
 $U = 60$ В

Определить: $i = f(t)$, t ,
 $\epsilon_i = f(t)$, W_m

1. Устанавливаем переключатели в положение 1 (под включение катушки к источнику постоянного напряжения).

До замыкания переключателя в положение 1 ток в цепи был равен нулю. В первый момент после замыкания переключателя в положение 1, т. е. в момент начала переходного процесса ($t = 0$), ток в цепи будет таким же, как и в последний момент до начала коммутации, т. е. $i_0 = 0$.

После коммутации ток стремится достигнуть величины установившегося тока ($i_{уст}$), но на основании первого закона коммутации изменяется не скачком, а постепенно.

Согласно схеме

$$i_{уст} = I = \frac{U}{R} = \frac{60}{10} = 6 \text{ А,}$$

Чтобы найти закон изменения переходного тока, запишем уравнение в общем виде

$$i = i_{уст} + i_{св} = i_{уст} + A e^{-\frac{t}{\tau}}$$

В этой формуле

$$i_{cв} = A e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $i_{cв}$ — свободная составляющая тока;

A — постоянная интегрирования;

$e = 2,71$ — основание натурального логарифма;

τ — постоянная времени переходного процесса,

$\tau = \frac{L}{R}$, где R — величина сопротивления, через которое проходит переходный ток;

t — текущее время.

Определяем постоянную интегрирования, полагая $t = 0$, тогда уравнение

$i = i_{yc\tau} + i_{cв} = i_{yc\tau} + A e^{-\frac{t}{\tau}}$ примет вид:

$$i_0 = i_{yc\tau} + A, \quad \text{т. к. } e^0 = 1$$

$$\text{Значит, } A = i_0 - i_{yc\tau} = 0 - 1,$$

то есть $A = -1$

Запишем уравнение (закон изменения переходного тока) при включении катушки

$$i = i_{yc\tau} + i_{cв} = i_{yc\tau} + A e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - 1 e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}});$$

$$\text{В нашем случае } i = 6 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}});$$

Находим постоянную времени переходного процесса

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{10} = \frac{0,2}{10} = 0,02 \text{ с.}$$

Практическая длительность переходного процесса

$$t = 5\tau = 5 \cdot 0,02 = 0,1 \text{ с}$$

Строим график переходного тока $i = f(t)$, задавшись моментом времени $t = 0, t = \tau, t = 2\tau, t = 3\tau, t = 4\tau, t = 5\tau$.

Значения переходного тока для заданных значений времени:

$$t = 0, i_0 = 6 \cdot (1 - e^{-\frac{0}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - 1) = 0 \text{ A};$$

$$t = \tau, i_1 = 6 \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-1}) = 6 \cdot (1 - 0,367) = 3,79 \text{ A};$$

$$t = 2\tau, i_2 = 6 \cdot (1 - e^{-\frac{2\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-2}) = 6 \cdot (1 - 0,135) = 5,19 \text{ A};$$

$$t = 3\tau, i_3 = 6 \cdot (1 - e^{-\frac{3\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-3}) = 6 \cdot (1 - 0,049) = 5,70 \text{ A};$$

$$t = 4\tau, i_4 = 6 \cdot (1 - e^{-\frac{4\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-4}) = 6 \cdot (1 - 0,018) = 5,89 \text{ A};$$

$$t = 5\tau, i_5 = 6 \cdot (1 - e^{-\frac{5\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-5}) = 6 \cdot (1 - 0,007) = 5,96 \text{ A}$$

Строим график $i = f(t)$

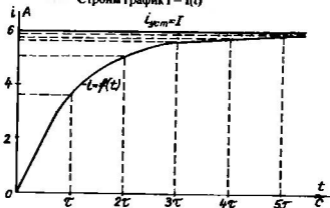


Рис. 2.43

Закон изменения ЭДС самоиндукции можно получить из формулы

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt} (I - Ie^{-\frac{t}{\tau}}) = -I \cdot L \cdot \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = -I \cdot L \cdot \frac{1}{L/R} e^{-\frac{t}{\tau}} = -I \cdot R \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -Ue^{-\frac{t}{\tau}}$$

В нашем случае $e_L = -60e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ В}$

Значения e для заданных значений времени следующие:

$$t = 0, e_0 = -60 \cdot e^0 = -60 \text{ В}$$

$$t = \tau, e_1 = -60 \cdot e^{-1} = -60 \cdot 0,367 = -22,02 \text{ В}$$

$$t = 2\tau, e_2 = -60 \cdot e^{-2} = -60 \cdot 0,135 = -8,1 \text{ В}$$

$$t = 3\tau, e_3 = -60 \cdot e^{-3} = -60 \cdot 0,049 = -2,94 \text{ В}$$

$$t = 4\tau, e_4 = -60 \cdot e^{-4} = -60 \cdot 0,018 = -1,08 \text{ В}$$

$$t = 5\tau, e_5 = -60 \cdot e^{-5} = -60 \cdot 0,007 = -0,42 \text{ В}$$

Строим график $e_L = f(t)$

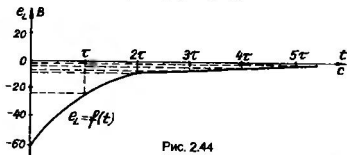


Рис. 2.44

Энергию магнитного поля при $t = 2\tau$ можно вычислить так:

$$W_m = \frac{L \cdot i_2^2}{2} = \frac{0,2 \cdot 5,19^2}{2} = 2,96 \text{ Дж}$$

2. Переключаем переключатель из положения 1 в положение 2 (отключаем катушку от источника постоянного напряжения при одновременном ее замыкании на сопротивление).

В этом случае мы отключаем цепь от источника и при переключении в положение 2 в образовавшемся контуре ток поддерживается за счет энергии, накопленной в магнитном поле катушки. Энергия магнитного поля непрерывно уменьшается, так как в активном сопротивлении контура идет необратимый процесс превращения электрической энергии в тепловую.

$$i = i_{уст} + i_{св} = i_{уст} + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

В этом случае $i_{уст} = 0$, т. к. при отключении цепи от источника ток в цепи будет равен нулю.

$$\text{Тогда } i = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\text{где } \tau = \frac{L}{R + R_p} = \frac{0,2}{10 + 10} = \frac{0,2}{20} = 0,01 \text{ с} \text{ — постоянная времени пере-}$$

ходного процесса.

Определим постоянную интегрирования, полагая $t = 0$, тогда уравне-

ние $i = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$ примет вид:

$$i_0 = Ae^0, \text{ т. е. } i_0 = A,$$

но $i_0 = \frac{U}{R} = \frac{60}{10} = 6 \text{ А}$ — согласно первому закону коммутации ток в первый

момент коммутации будет таким, каким был в последний момент до коммутации.

Значит, $A = 6 \text{ A}$, тогда $i = 6 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ A}$.

Длительность переходного процесса

$$t = 5\tau = 5 \cdot 0,01 = 0,05 \text{ с}$$

Строим график $i=f(t)$ (рис. 2.45), задавшись моментами времени $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau, 5\tau$. Данные расчета сведены в таблицу 2.3.1.

Таблица 2.3.1

$t, \text{с}$	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
i, A	6	2,2	0,81	0,294	0,108	0,012

Строим график $i = f(t)$

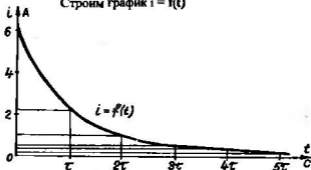


Рис. 2.45

В соответствии с законом изменения ЭДС самоиндукции получим

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt} (6e^{-\frac{t}{\tau}}) = 1 \cdot L \cdot \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = Ue^{-\frac{t}{\tau}}$$

В нашем случае

$$e_L = Ue^{-\frac{t}{\tau}} = 60 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ В}$$

Строим график $e_L = f(t)$ (рис. 2.46), задавшись моментами времени $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau, 5\tau$. Данные расчета сведены в таблицу 2.3.2

Таблица 2.3.2

$t, \text{с}$	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$e_L, \text{В}$	60	22,02	8,1	2,94	1,08	0,42

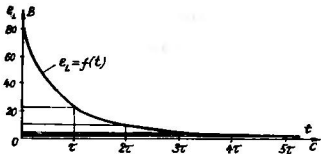


Рис. 2.46

2.6.2. Методика исследования переходных процессов в электрических цепях, содержащих конденсатор и сопротивление

Цепь с последовательно включенными конденсатором емкостью $C = 10 \text{ мкФ}$ и сопротивлением $R = 2 \text{ МОм}$ подсоединяется к источнику постоянного напряжения $U = 50 \text{ В}$ (переключатель в положении 1). Определить законы изменения переходных напряжений и тока при заряде конденсатора и построить их графики. Затем цепь отключается от источника и одновременно переключатель переводится в положение 2, $R_p = 8 \text{ МОм}$. Определить законы изменения переходных напряжений и тока при разряде конденсатора и построить их графики. Определить практическую длительность заряда и разряда конденсатора и энергию электрического поля при $t = 3\tau$. Схема цепи приведена на рис. 2.47.

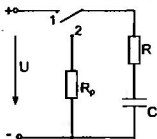


Рис. 2.47

Дано: $R = 2 \text{ МОм}$
 $C = 10 \text{ мкФ}$
 $R_p = 8 \text{ МОм}$
 $U = 50 \text{ В}$

Определить:
 $i = f(t), \text{ т}$,
 $u_c = f(t), \text{ В}$

1. Переключатель в положении 1 (заряд конденсатора).

Быстрота заряда конденсатора зависит от параметров цепи и характеризуется постоянной времени заряда конденсатора.

$$\tau = R \cdot C = 2 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 20 \text{ с}$$

На основании второго закона коммутации получены законы, характеризующие напряжение и ток при заряде конденсатора:

$$u_c = u_{yc\tau} + u_{cb} = U - Ue^{-\frac{t}{\tau}} = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

$$i = i_{cb} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = Ie^{-\frac{t}{\tau}},$$

где U – напряжение источника,

$u_{yc\tau} = U$ – установившееся значение напряжения при заряде конденсатора.

$u_{cb} = -Ue^{-\frac{t}{\tau}}$ – свободная составляющая напряжения при заряде конденсатора.

Зарядный ток равен свободной составляющей, т. к. ток установившегося режима равен 0 ($i_{yc\tau} = 0$).

Длительность заряда конденсатора

$$t = 5\tau = 5 \cdot 20 = 100 \text{ с}$$

Вычислим значения напряжения на конденсаторе при его заряде для значений времени $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau, 5\tau$.

$$t = 0, \quad u_{c0} = U \cdot (1 - e^{-\frac{0}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^0) = 0 \text{ В}$$

$$t = \tau, \quad u_{c1} = U \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-1}) = 50 \cdot (1 - 0,367) = 31,6 \text{ В}$$

$$t = 2\tau, \quad u_{c2} = U \cdot (1 - e^{-\frac{2\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-2}) = 50 \cdot (1 - 0,135) = 43,23 \text{ В}$$

$$t = 3\tau, \quad u_{c3} = U \cdot (1 - e^{-\frac{3\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-3}) = 50 \cdot (1 - 0,049) = 47,51 \text{ В}$$

$$t = 4\tau, \quad u_{c4} = U \cdot (1 - e^{-\frac{4\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-4}) = 50 \cdot (1 - 0,018) = 49,08 \text{ В}$$

$$t = 5\tau, \quad u_{c5} = U \cdot (1 - e^{-\frac{5\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-5}) = 50 \cdot (1 - 0,007) = 49,66 \text{ В}$$

Аналогично вычисляем значения зарядного тока согласно закону изменения переходного тока при заряде конденсатора для значений времени $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau, 5\tau$. Данные расчета сведены в таблицу 2.3.3.

Таблица 2.3.3

$t, \text{ с}$	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$i, \text{ мкА}$	25	9,19	3,38	1,24	0,46	0,17

Согласно полученным результатам строим графики зарядного напряжения и тока в зависимости от t (рис. 2.48).

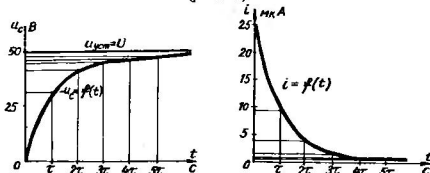


Рис. 2.48

Из построенных графиков $u_c(t)$ и $i(t)$ можно для любого момента времени определить значения u_c и i , а также рассчитать запасенную энергию в электрическом поле заряженного конденсатора.

Например, при $t = 3\tau$

$$W_{\text{э}} = \frac{C \cdot u_{c3}^2}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 47,51^2}{2} = 1128,6 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} \approx 0,113 \text{ Дж}$$

2. Переключатель в положении 2 (конденсатор разряжается через сопротивление R и R_p).

Быстрота разряда конденсатора также зависит от параметров цепи и характеризуется постоянной времени разряда конденсатора.

$$\tau = (R + R_p) \cdot C = (2 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^6) \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 10 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 100 \text{ с}$$

На основании второго закона коммутации получены законы, характеризующие напряжение и ток при разряде конденсатора:

$$u_c = u_{c\text{в}} = U e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i = i_{c\text{в}} = -\frac{U}{R + R_p} e^{-\frac{t}{\tau}} = -I e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где U — напряжение заряженного конденсатора до начала разряда.

Разрядные напряжения и ток равны их свободным составляющим, т. к. напряжение и ток установившегося режима после разряда равны 0 ($u_{c\text{уст}} = 0$, $i_{\text{уст}} = 0$).

Длительность разряда конденсатора

$$t = 5\tau = 100 \cdot 5 = 500 \text{ с}$$

Вычислим значения напряжения на конденсаторе при его разряде для значений времени $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau, 4\tau, 5\tau$.

$$t = 0, u_{c0} = Ue^{-\frac{0}{\tau}} = 50e^0 = 50 \text{ В};$$

$$t = \tau, u_{c1} = Ue^{-\frac{\tau}{\tau}} = 50e^{-1} = 18,39 \text{ В};$$

$$t = 2\tau, u_{c2} = Ue^{-\frac{2\tau}{\tau}} = 50e^{-2} = 6,77 \text{ В};$$

$$t = 3\tau, u_{c3} = Ue^{-\frac{3\tau}{\tau}} = 50e^{-3} = 2,49 \text{ В};$$

$$t = 4\tau, u_{c4} = Ue^{-\frac{4\tau}{\tau}} = 50e^{-4} = 0,92 \text{ В};$$

$$t = 5\tau, u_{c5} = Ue^{-\frac{5\tau}{\tau}} = 50e^{-5} = 0,34 \text{ В}$$

Аналогично вычислим значения разрядного тока согласно закону изменения переходного тока при разряде конденсатора для тех же значений времени

$$i = -\frac{U}{R + R_p} e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{50}{10 \cdot 10^6} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ А}$$

Знак “-” говорит о том, что разрядный ток имеет обратное направление зарядному.

$$t = 0, i_0 = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{0}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^0 = -5 \cdot 10^{-6} \text{ А} = -5 \text{ мкА};$$

$$t = \tau, i_1 = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-1} = -1,84 \cdot 10^{-6} \text{ А} = -1,84 \text{ мкА};$$

$$t = 2\tau, i_2 = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{2\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,135 = -0,68 \cdot 10^{-6} \text{ А} = -0,68 \text{ мкА};$$

$$t = 3\tau, i_3 = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{3\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,049 = -0,25 \cdot 10^{-6} \text{ А} = -0,25 \text{ мкА};$$

$$t = 4\tau, i_4 = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{4\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,018 = -0,092 \cdot 10^{-6} \text{ А} = -0,092 \text{ мкА};$$

$$t = 5\tau, i_5 = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{5\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,007 = -0,034 \cdot 10^{-6} \text{ А} = -0,034 \text{ мкА}$$

Согласно полученным расчетам строим графики разрядного напряжения и тока в зависимости от t (рис. 2.49).

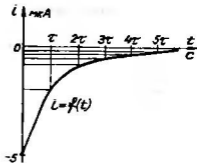
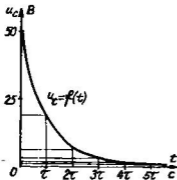


Рис. 2.49

Энергия электрического поля конденсатора в момент времени $t = 3\tau$

$$W_{\text{Э}} = \frac{C \cdot u_{\text{сз}}^2}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 2,49^2}{2} = 31 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$$

4. РЕКОМЕНДАЦИИ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

Каждая задача из приведенных контрольных заданий, кроме задания 1.2, может быть решена с помощью ЭВМ. Для этого приведено десять программ, которые могут быть введены в ЭВМ пользователем самостоятельно перед выполнением соответствующего задания.

В программе использованы операторы, встречающиеся во всех версиях языка программирования БЕЙСИК.

Приводятся программы в виде распечатки листингов, что исключает возможность типографских ошибок. Однако после ввода программ в ЭВМ необходимо тщательно проверить их по контрольным примерам.

Программы содержат детальный диалог с пользователем, поэтому подробное описание правил пользователя каждой программой не приводится.

Наименование программы дается в первой строке листинга.

Все эти программы имеются в банке программ для ЭВМ на кафедре теоретических основ электротехники БГПА.

По дополнительным заказам кафедра теоретических основ электротехники может представить указанные программы или их усовершенствованные версии на гибких магнитных дисках заинтересованным лицам или организациям.

```

10 PRINT " решение системы из N линейных уравнений"
20 PRINT " с вещественными коэффициентами – код 1 "
30 PRINT ""
40 PRINT " полиномиальная аппроксимация – код 2 "
50 PRINT ""
60 INPUT "введите код операции "; D
70 IF D > 1 THEN 370
80 INPUT "задайте число уравнений N="; N
90 REDIM A (N, N), B(N), C(N, N), G(N), X(N)
100 FOR I = 1 TO N
110 PRINT "введите коэфф. левой части уравнения "; I; ""
115 FOR J = 1 TO N
120 PRINT "A( ; I, J )="; : INPUT A( I, J). NEXT J
130 PRINT "введите коэфф. правой части уравнения", I, ""
140 PRINT "B( ; I, )="; : INPUT B(I) : NEXT I
150 GOSUB 180
155 IF D > 1 THEN 170
160 FOR I = 1 TO N
165 PRINT "X( ; I, )="; X(I) : NEXT I : GOTO 80
170 FOR I = 1 TO N
175 PRINT "A( ; 2 * I - 1, )="; X(I) : NEXT I : GOTO 80
180 LET N1 = N - 1 : FOR K = 1 TO N1
190 IF ABS(A(K, K)) > 0 GOTO 260
200 LET K1 = K + 1 : FOR M = K1 TO N
210 IF ABS(A(M, K)) > 0 GOTO 230
220 GOTO 245
230 FOR L = 1 TO N : LET V = A(K, L) : LET A(K, L) = A(M, L)
240 LET A(M, L) = V : NEXT L
245 NEXT M
250 LET V = B(K) : LET B(K) = B(M) : LET B(M) = V
260 LET G(K) = B(K) / A(K, K) : LET K1 = K + 1
270 FOR I = K1 TO N : LET B(I) = B(I) - A(I, K) * G(K)
280 FOR J1 = K TO N
290 LET J = N - J1 + K : LET C(K, J) = A(K, J) / A(K, K)
300 LET A(I, J) = A(I, J) - A(I, K) * C(K, J)
310 NEXT J1 : NEXT I : NEXT K
320 LET M = N : LET X(M) = B(M) / A(M, M)

```

```

330 LET M=M - 1: LET S=0: FOR L = M TO N1
340 LET S = S + C(M, L + 1) * X(L + 1): NEXT L
350 LET X(M)=G(M) - S. IF M>1 GOTO 330
380 RETURN
370 INPUT "введите число точек аппроксимации N=": N
380 REDIM A(N, N), B(N), C(N, N), G(N), X(N)
390 FOR I = 1 TO N
400 PRINT "введите "; I; "-ю пару значений X, Y:"
410 PRINT "X("; I; ")=": INPUT P
420 FOR J = 1 TO N: LET A(I, J) = ABS(P) (2 * J - 1)
430 NEXT J: PRINT "Y("; I; ")=": INPUT B(I)
440 NEXT I: GOTO 150: END

```

Программа 2

```

10 PRINT "преобразования соединений сопротивлений:"
20 PRINT "треугольника в звезду—код 1
30 PRINT "звезды в треугольник —код 2
40 INPUT "введите код преобразования K=": K
50 IF K = 1 THEN 110
60 INPUT "введите R(12), R(23), R(31)": R4, R5, R6
70 LET R = R4 + R5 + R6
80 PRINT "R1=": R4 * R6 / R
85 PRINT "R2=": R5 * R4 / R
90 PRINT "R3=": R6 * R5 / R
100 GOTO 40
110 INPUT "введите R1, R2, R3": R1, R2, R3
120 LET R = R1 * R2 + R2 * R3 + R3 * R1
130 PRINT "R(12)=": R / R3
140 PRINT "R(23)=": R / R1
150 PRINT "R(31)=": R / R2
160 GOTO 40: END

```

Программа 3

```

10 PRINT "расчет баланса мощностей в цепи постоянного тока"
15 PRINT ""
20 PRINT "мощность источников: E1*I1+E2*I2+...+U1*I1+U2*I2+..."
30 PRINT "мощность в сопротивлениях: R1*I1^2+R2*I2^2+R3*I3^2+..."
35 PRINT ""
40 INPUT "введите число ветвей с резисторами N=": N
45 DIM E(N), R(N), I(N), J(N)
50 PRINT "введите ЭДС источников : "
60 FOR I = 1 TO N: PRINT "E("; I; ")=": INPUT E(I): NEXT I
70 PRINT "введите значения токов источников тока: "
75 FOR I = 1 TO N: PRINT "J("; I; ")=": INPUT J(I): NEXT I
80 PRINT "введите значения сопротивления ветвей:"
100 FOR I = 1 TO N: PRINT "R("; I; ")=": INPUT R(I): NEXT I

```

```

110 PRINT "введите (с учетом знаков) напряжения источников тока."
120 FOR I = 1 TO N: PRINT "Uj( ; 1, ")="; : INPUT U(I) : NEXT I
130 PRINT "введите (с учетом знаков) токи в каждом из резисторов"
140 FOR I = 1 TO N: PRINT "I( ; 1, ")="; : INPUT I(I) : NEXT I
150 LET P1 = 0. FOR I = 1 TO N LET P1 = P1 + E(I) * I(I) NEXT I
160 LET P2 = 0 FOR I = 1 TO N LET P2 = P2 + U(I) * J(I) NEXT I
170 LET P = P1 + P2. LET Q = 0 FOR I = 1 TO N
180 LET Q = Q + R(I) * I(I) * I(I) : NEXT I
190 LET A = ABS(P - Q). IF A / ((P + Q) / 2) < 01 THEN 195
194 PRINT "баланса мощностей нет ! проверьте расчеты !" : GOTO 200
195 PRINT "баланс мощностей есть ! задача решена правильно !"
200 PRINT "суммарная мощность источников P_в ="; P
210 PRINT "суммарная мощность потерь в сопротивлениях P_c ="; Q
220 END

```

Программа 4

```

10 PRINT "операции с комплексными числами для расчета"
20 PRINT "электрических цепей синусоидального тока"
30 PRINT "--"
40 PRINT "перевод в алгебраическую форму -- код 1"
50 PRINT "перевод в показательную форму -- код 2"
80 PRINT "умножение двух комплексных чисел -- код 3"
70 PRINT "деление двух комплексных чисел -- код 4"
80 PRINT "--"
90 INPUT "введите код операции K=", K
100 LET P = 3,14159
110 IF K > 1 THEN 170
120 INPUT "введите модуль комплексного числа Y="; Y
130 INPUT "введите аргумент комплексного числа (в град.) X="; X
140 LET X = X * P / 180 LET M = Y * COS(X) LET N = Y * SIN(X)
150 PRINT "--"
160 PRINT "Z="; M, " ", N, "j". GOTO 30
170 IF K > 2 THEN 240
180 INPUT "введите вещественную часть числа ReZ ="; M
190 INPUT "введите мнимую часть числа ImZ ="; N
200 GOSUB 490
210 PRINT "--"
220 PRINT "Z="; Y, " *E^"; X, "j". GOTO 30
230 PRINT "--"
240 PRINT "укажите форму записи 1-го комплексного числа."
250 INPUT "алгебраическая-- код 5, показательная-- код 6: K=", L
260 IF L = 6 THEN 320
270 INPUT "введите вещественную часть ReZ1 ="; A
280 INPUT "введите мнимую часть ImZ1 ="; B
290 LET M = A. LET N = B

```



```

300 GOSUB 490
310 LET Y1 = Y: LET X1 = X: GOTO 340
320 INPUT "введите модуль Y1="; Y1
330 INPUT "введите аргумент (в град.) X1="; X1
340 PRINT "укажите форму записи 2-го комплексного числа."
350 INPUT "алгебраическая— код 5, показательная— код 6: K="; S
360 IF S = 6 THEN 420
370 INPUT "введите вещественную часть ReZ2 = "; C
380 INPUT "введите мнимую часть ImZ2 = "; D
390 LET M = C: LET N = D
400 GOSUB 490
410 LET Y2 = Y: LET X2 = X: GOTO 440
420 INPUT "введите модуль Y2="; Y2
430 INPUT "введите аргумент (в град.) X2="; X2
440 IF K = 4 THEN 460
450 LET Y = Y1 * Y2: LET X = (X1 + X2): GOTO 470
460 LET Y = Y1 / Y2: LET X = (X1 - X2)
470 PRINT ""
480 PRINT "Z=", Y; " *E^"; X; "i": GOTO 30: END
490 LET Z = SQR(M * M + N * N)
500 IF M = 0 THEN 540
510 LET X = ATN(ABS(N / M)) * 180 / P
520 IF M > 0 THEN 590
530 GOTO 640
540 IF N < 0 THEN 570
550 LET Y = N: LET X = 90
560 RETURN
570 LET Y = ABS(N): LET X = - 90
580 RETURN
590 IF N >= 0 THEN 620
600 LET Y = Z: LET X = - X
610 RETURN
620 LET Y = Z: LET X = X
630 RETURN
640 IF N >= 0 THEN 670
650 LET Y = Z: LET X = X + 180
660 RETURN
670 LET Y = Z: LET X = 180 - X
680 RETURN

```

Программа 5

```

10 PRINT " решение системы из N уравнений с комплексными"
15 PRINT " коэффициентами : "
20 PRINT ""

```

```

25 PRINT "(A11+jB11)*I11 + (A12+jB12)*I22 + ... = C11+jD11"
30 PRINT "(A21+jB12)*I11 + (A22+jB22)*I22 + ... = C22+jD22"
32 PRINT " "
34 PRINT "(AN1+jBN1)*I11 + ... + (ANN+jBNN)*I1N = CNN+jDNN"
35 PRINT " "
36 PRINT "          введите исходные данные : "
36 INPUT "число уравнений N = ", N
40 DIM A(N, N), B(N, N), X(N), Y(N)
42 FOR I = 1 TO N
44 PRINT "комплексы коэффициентов левой части уравнения ", I, " : "
46 FOR J = 1 TO N
48 PRINT "A( ", I, J, ") = ", INPUT A(I, J)
50 PRINT "B( ", I, J, ") = ", INPUT B(I, J) NEXT J
52 PRINT "комплексы коэффициентов правой части уравнения ", I, " : "
54 PRINT "C( ", I, I, ") = ", INPUT X(I)
56 PRINT "D( ", I, I, ") = ", INPUT Y(I) NEXT I
66 LET E1 = 1E-18: LET E2 = E1 * E1
70 IF N = 1 THEN 118
74 FOR I = 1 TO N - 1: D1 = A(I, I) : D2 = B(I, I)
78 D3 = D1 * D1 + D2 * D2: IF D3 < E2 THEN 170
82 FOR J = I + 1 TO N
66 R1 = (A(J, I) * D1 + B(J, I) * D2) / D3
90 R2 = (B(J, I) * D1 - A(J, I) * D2) / D3
94 IF (ABS(R1) + ABS(R2)) = 0 THEN 118
98 FOR K = I + 1 TO N
102 A(J, K) = A(J, K) - R1 * A(I, K) + R2 * B(I, K)
106 B(J, K) = B(J, K) - R1 * B(I, K) - R2 * A(I, K) NEXT K
110 X(J) = X(J) - R1 * X(I) + R2 * Y(I)
114 Y(J) = Y(J) - R1 * Y(I) - R2 * X(I)
116 NEXT J
117 NEXT I
118 FOR J = N TO 1 STEP - 1: D1 = X(J): D2 = Y(J)
122 IF J = N THEN 138
126 FOR K = N TO J + 1 STEP - 1
130 D1 = D1 - A(J, K) * X(K) + B(J, K) * Y(K)
134 D2 = D2 - B(J, K) * X(K) - A(J, K) * Y(K): NEXT K
138 R1 = A(J, J): R2 = B(J, J): R3 = R1 * R1 + R2 * R2
142 IF R3 < E2 THEN 170
146 X(J) = (D1 * R1 + D2 * R2) / R3
150 Y(J) = (D2 * R1 - D1 * R2) / R3
152 IF Y(J) < 0 THEN 156
154 PRINT "I( ", J, J, ") = ", X(J), " + j ", Y(J): GOTO 166

```

```

158 PRINT "I( "; J; J; ") =": X(J); " - j "; ABS(Y(J))
166 NEXT J
168 END
170 PRINT "решение невозможно ! ": GOTO 166

```

Программа 8

```

10 PRINT " расчет баланса мощностей в цепи"
20 PRINT " синусоидального тока"
30 PRINT ""
40 INPUT "введите число ветвей схемы: "; N
50 DIM E(N), R(N), X(N), I(N), P(N), Q(N)
80 PRINT "введите исходные данные."
70 PRINT "модули и аргументы (в град.) ЭДС ветвей"
80 FOR J = 1 TO N PRINT "E( "; J; ")=": INPUT E(J)
80 PRINT "Ae( "; J; ")=": INPUT A1(J): NEXT
100 PRINT "активные и реактивные (без учета взаимной индукции) ",
110 PRINT "сопротивления ветвей"
120 FOR J = 1 TO N: PRINT "R( "; J; ")=": INPUT R(J)
130 PRINT "X( "; J; ")=": INPUT X(J): NEXT J
132 PRINT "сопротивления взаимнойиндукции между ветвями ";
134 PRINT "с учетом знаков."
136 INPUT "X(12) = "; Z1: INPUT "X(13) = "; Z2
138 INPUT "X(23) = "; Z3
140 PRINT "модули и аргументы (в град.) токов ветвей:"
150 FOR J = 1 TO N: PRINT "I( "; J; ")=": INPUT I(J)
160 PRINT "A2( "; J; ")=": INPUT A2(J): NEXT J
170 LET P1 = 0: LET Q1 = 0: LET P2 = 0
180 LET Q6 = 0: LET A = 3.14159 / 180
185 FOR J = 1 TO N
190 LET P1 = P1 + E(J) * I(J) * COS((A1(J) - A2(J)) * A)
200 LET P2 = P2 + R(J) * I(J) ^ 2
210 LET Q1 = Q1 + E(J) * I(J) * SIN((A1(J) - A2(J)) * A)
220 LET Q6 = Q6 + X(J) * I(J) ^ 2: NEXT J
222 LET Q3 = 2 * (I(1) * I(2) * COS((A2(1) - A2(2)) * A)) * Z1
224 LET Q4 = 2 * (I(1) * I(3) * COS((A2(1) - A2(3)) * A)) * Z2
226 LET Q5 = 2 * (I(2) * I(3) * COS((A2(2) - A3(3)) * A)) * Z3
226 LET Q2 = Q3 + Q4 + Q5 + Q6
230 LET P = ABS(P1 - P2)
235 LET Q = ABS(ABS(Q1) - ABS(Q2))
240 IF P / ((P1 + P2) / 2) > .01 THEN 320
250 PRINT "суммарная акт. мощность источников P_а=": P1
260 PRINT "суммарная акт. мощность приемников P_п=": P2
270 PRINT ""
280 IF Q / ((ABS(Q1) + ABS(Q2)) / 2) > .01 THEN 330

```

```

290 PRINT "суммарная реакт. мощность источников Qг="; Q1
300 PRINT "суммарная реакт. мощность приемников Qп="; Q2
310 PRINT " "; GOTO 340
320 PRINT "баланса активных мощностей нет"
325 GOTO 280
330 PRINT "баланса реактивных мощностей нет"
340 END

```

Программа 7

```

10 PRINT " расчет напряжения сдвига нейтрали"
20 PRINT ""
30 PRINT "введите комплексные сопротивления ветвей"
40 INPUT "ReZ1="; R1: INPUT "ImZ1="; X1
50 INPUT "ReZ2="; R2: INPUT "ImZ2="; X2
60 INPUT "ReZ3="; R3: INPUT "ImZ3="; X3
70 LET B = 3: IF B > 3 THEN 110
80 INPUT "ReZ4="; R4: INPUT "ImZ4="; X4
90 LET Z4 = R4 ^ 2 + ABS(X4) ^ 2
100 LET G4 = R4 / Z4: LET B4 = -X4 / Z4
110 PRINT "введите модули и аргументы (в град.)";
120 PRINT "комплексов ЭДС."
130 INPUT "E1="; E1: INPUT "A1="; A1: INPUT "E2="; E2
140 INPUT "A2="; A2: INPUT "E3="; E3: INPUT "A3="; A3
150 LET Q = 3.14159 / 180: LET Z1 = R1 ^ 2 + ABS(X1) ^ 2
160 LET G1 = R1 / Z1: LET B1 = -X1 / Z1
170 LET Z2 = R2 ^ 2 + ABS(X2) ^ 2: LET G2 = R2 / Z2
180 LET B2 = -X2 / Z2: LET Z3 = R ^ 2 + ABS(X3) ^ 2
190 LET G3 = R3 / Z3: LET B3 = -X3 / Z3
200 LET C1 = E1 * COS(A1 * Q): LET D1 = E1 * SIN(A1 * Q)
210 LET C2 = E2 * COS(A2 * Q): LET D2 = E2 * SIN(A2 * Q)
220 LET C3 = E3 * COS(A3 * Q): LET D3 = E3 * SIN(A3 * Q)
230 LET M1 = C1 * G1 - D1 * B1 + C2 * G2 - D2 * B2
240 LET M2 = C3 * G3 - D3 * B3: LET M = M1 + M2
250 LET N1 = D1 * G1 + C1 * B1 + D2 * G2 + C2 * B2
260 LET N2 = D3 * G3 + C3 * B3: LET N = N1 + N2
270 LET K = G1 + G2 + G3 + G4: LET L = B1 + B2 + B3 + B4
280 LET P = K ^ 2 + ABS(L) ^ 2
290 LET X = M * K + N * L: LET Y = N * K - M * L
300 PRINT "напряжение между узлами N1, N равно ";
310 PRINT "U(N1, N) ="; X / P; " "; Y / P; " j": END

```

```

10 PRINT "      расчет комплекса тока в ветви схемы : "
20 PRINT "      I=(E+U(12))/(R+jX) "
30 PRINT ""
40 PRINT "      введите с учетом знаков:"
45 PRINT ""
50 INPUT "модуль комплекса ЭДС E="; E
60 INPUT "аргумент комплекса ЭДС (в град) Aв="; A1
70 INPUT "модуль комплекса напряжения ветви U(12)="; U
80 INPUT "аргумент комплекса напряжения (в град.) Aн="; A2
90 INPUT "активное сопротивление ветви R="; R
100 INPUT "реактивное сопротивление ветви X="; X
110 LET Q = 3.14159 / 180
120 LET M = E * COS(A1 * Q) + U * COS(A2 * Q)
130 LET N = E * SIN(A1 * Q) + U * SIN(A2 * Q)
140 LET L = R ^ 2 + ABS(X) ^ 2
150 LET Y = M * R + N * X: LET Z = N * R - M * X
155 LET I1 = Y / L: LET I2 = Z / L
160 PRINT ""
165 PRINT "вещественная часть Re(I) = "; I1
170 PRINT "мнимая часть      Im(I) = "; I2
180 END

```

Программа 9

```

10 PRINT "      расчет баланса активных мощностей "
20 PRINT "      в цепи несинусоидального тока "
25 PRINT ""
30 PRINT "введите данные : "
40 INPUT "число ветвей схемы L = "; L
50 INPUT "номер высшей гармоники ЭДС источника K = "; K
60 DIM E(L, K), A(L, K), I(L, K), B(L, K), R(L)
70 PRINT "постоянные составляющие ЭДС и тока : "
80 FOR I = 1 TO L: PRINT "ветви "; I, " : "
90 PRINT "E("; I, 0; ")="; : INPUT E(I, 0)
100 E(I, 0) = SQR(2)*E(I, 0) : A(I, 0) = 0
110 PRINT "I("; I, 0; ")="; : INPUT I(I, 0)
120 I(I, 0) = SQR(2)*I(I, 0) : B(I, 0) = 0: NEXT I
130 PRINT "амплитуды и начальные фазы гармоник ЭДС и тока : "
140 FOR I = 1 TO L: PRINT "ветви "; I, " : "
150 FOR J = 1 TO K:
160 PRINT "Em("; I, J; ")="; : INPUT E(I, J)
170 PRINT "Фe("; I, J; ")="; : INPUT A(I, J)
180 PRINT "Im("; I, J; ")="; : INPUT I(I, J)
200 PRINT "Фi("; I, J; ")="; : INPUT B(I, J)
210 NEXT J: NEXT I
220 PRINT "активные сопротивления ветвей : "

```

```

230 FOR J = 1 TO L
240 PRINT "R(", J, ")=": INPUT R(J): NEXT J
250 Z = 3.14159 / 160: P = 0: Q = 0
260 FOR I = 1 TO L
270 FOR J = 0 TO K
280 C = COS((A(I, J) - B(I, J)) * Z)
300 P = P + .5 * E(I, J) * I(I, J) * C
310 Q = Q + .5 * R(I) * I(I, J) ^ 2
320 NEXT J: NEXT I: P1 = P: Q1 = Q
330 IF ABS(P1 - Q1) / ((P1 + Q1) / 2) < .01 THEN 350
340 PRINT "баланса мощностей нет | проверьте расчеты Г"
350 PRINT "      Pн = "; P
360 PRINT "      Pг = "; Q
370 END

```

Программа 10

```

10 PRINT "      расчет переходных процессов в линейных цепях "
20 PRINT "      с источником постоянного тока "
30 PRINT " "
40 PRINT "      введите исходные данные "
50 PRINT " "
60 PRINT "      коэффициенты характеристического уравнения "
70 PRINT "      (A2*X^2 + A1*X + A0) = 0 "
80 INPUT "A2 = "; C: INPUT "A1 = "; B: INPUT "A0 = "; A
90 PRINT "значения искомой величины (тока или напряжения);
100 PRINT " и ее производной в момент времени t = 0 "
110 INPUT "F(0) = "; F1: INPUT "(dF/dt)t=0 = "; E
120 INPUT "установившееся значение искомой величины Fу = "; F2
125 PRINT " "
126 PRINT "      ответ : "
128 PRINT " "
130 F3 = F1 - F2 + 1E-20: D = B / 2 / C: F = D * D - A / C
140 Q = SQR(ABS(F)): IF Q / D <= .000001 THEN 360
145 IF F < 0 THEN 230
150 P1 = -D + SQR(F): P2 = -D - SQR(F): P3 = P1 - P2
160 A1 = (-F3 * P2 + E) / F3: A2 = (-E + F3 * P1) / P3
170 A3 = ABS(A1): A4 = ABS(A2)
180 IF A1 < 0 THEN 194
185 IF A2 < 0 THEN 220
190 PRINT "f(t) = "; F2; " + "; A3; "*EXP( "; P1; ") + "; A4;
192 PRINT "*EXP( "; P2; ")": GOTO 390
194 IF A2 > 0 THEN 210
200 PRINT "f(t) = "; F2; " - "; A3; "*EXP( "; P1; ") - "; A4;
205 PRINT "*EXP( "; P2; ")": GOTO 390

```

```

210 PRINT "f(t) = "; F2; " - "; "*EXP( P1; ) + "; A4;
215 PRINT "*EXP( P2; )": GOTO 390
220 PRINT "f(t) = "; F2; " + "; A3; "*EXP( P1; ) - "; A4;
225 PRINT "*EXP( P2; )": GOTO 390
230 R = -D: J = SQR(-F): M = F3: N = (E - R * F3) / J
240 Z = SQR(M ^ 2 + N ^ 2): V1 = ATN(ABS(M) / ABS(N))
250 IF N > 0 THEN 280
260 IF M < 0 THEN 310
270 V = 3.14159 - V1: GOTO 314
280 IF M > 0 THEN 300
290 V = -V1: GOTO 314
300 V = V1: GOTO 314
310 V = V1 + 3.14159
314 V = V * 190 / 3.14159
316 IF V < 0 THEN 330
320 PRINT "f(t) = "; F2; " + "; Z; "*EXP( R; *)*SIN( J;
325 PRINT "t + "; V; ")": GOTO 390
330 PRINT "f(t) = "; F2; " + "; Z; "*EXP( R; *)*SIN( J;
335 PRINT "t - "; V; ")": GOTO 390
360 P = -D: B1 = F3: B2 = E - F3 * P: B3 = ABS(B2)
365 IF B2 < 0 THEN 380
370 PRINT "f(t) = "; F2; " + ( B1; " + "; B3; "*t)*EXP( P;
375 PRINT "*t)": GOTO 390
380 PRINT "f(t) = "; F2; " + ( B1; " - "; B3; "*t)*EXP( P;
390 PRINT "*t)": END

```

ЛИТЕРАТУРА

Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. — М., 1978.

Буртаев Ю. В., Овсянников П. Н. Теоретические основы электротехники. — М., 1984.

Государственные стандарты Республики Беларусь.

Данилов И. А., Иванов П. М. Общая электротехника с основами электроники. — М., 1989.

Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электротехники. — М., 1981.

Зайчик М. Ю. Сборник задач и упражнений по теоретической электротехнике. — М., 1989.

Мельников А. К. Сборник контрольных заданий и программ для решения задач с использованием ЭВМ по теоретическим основам электротехники. — Мн., 1992.

Попов В. С. Теоретическая электротехника. — М., 1978.

Частослов Л. А. Электротехника. — М., 1989.

Шебес М. О. Сборник задач по теории электрических цепей. — М., 1982.

ОГЛАВЛЕНИЕ

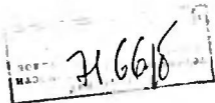
Предисловие	3
1. Анализ электрического состояния линейных и нелинейных электрических цепей постоянного тока	5
1.1. Расчет линейных электрических цепей постоянного тока (задание)	5
1.2. Расчет нелинейных электрических цепей постоянного тока (задание)	11
1.3. Методика расчета линейных электрических цепей постоянного тока	13
1.4. Методика расчета нелинейных электрических цепей постоянного тока	21
2. Анализ электрического состояния линейных электрических цепей переменного тока: однофазных, трехфазных. Исследование переходных процессов в электрических цепях.	24
2.1. Расчет однофазных линейных электрических цепей переменного тока (задание)	24
2.2. Расчет трехфазных линейных электрических цепей переменного тока (задание)	30
2.3. Исследование переходных процессов в электрических цепях (задание)	31
2.4. Методика расчета однофазных линейных электрических цепей переменного тока	32
2.5. Методика расчета трехфазных электрических цепей переменного тока	38
2.5.1. Методика расчета трехфазных электрических цепей переменного тока при соединении потребителей звездой	38
2.5.2. Методика расчета трехфазных электрических цепей переменного тока при соединении треугольником	42
2.6. Методика исследования переходных процессов в электрических цепях	46
2.6.1. Методика исследования переходных процессов в электрических цепях, содержащих катушку индуктивности	46
2.6.2. Методика исследования переходных процессов в электрических цепях, содержащих конденсатор и сопротивление	51
Рекомендации к использованию программ для ЭВМ	55
Программы для решения задач на ЭВМ	56
Литература	66

Учебное издание

Гилицкая Лидия Николаевна

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Курсовое проектирование



Редактор Е. Е. Соколова
Ответственный за выпуск А. И. Новиков
Технический редактор Д. Л. Малиновский
Корректор Р. Л. Карчик

Подписано в печать 17.12.97. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 3,96. Уч.-изд. л. 3,27.

Тираж 1700 экз. Заказ 237. Код 203.

Республиканский институт профессионального образования.

Лицензия ЛВ № 54 от 29.10.97.

220004, г. Минск, ул. К. Либкнехта, 32