



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П.О. Сухого»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРАКТИКУМ

**по курсу «Электротехника и электроника»
для студентов специальностей
1-36 01 01 «Технология машиностроения»,
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»,
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2006

УДК 621.3+621.38(075.8)
ББК 31.2я73
Э46

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 23.06.2005 г.)*

Авторы-составители: *А. Н. Вершинин, С. А. Грачев*

Рецензент: канд. тех. наук, доц. каф. «Электроснабжение»
ГГТУ им. П. О. Сухого *Л. Е. Евминов*

Электротехника : практикум по курсу «Электротехника и электроника» для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения», 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост.: А. Н. Вершинин, С. А. Грачев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 40 с. – Систем. требования: РС не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с титул. экрана.

Практикум содержит вопросы и задачи, которые можно использовать на практических занятиях при самостоятельной работе студентов, а также для контроля знаний, как по соответствующим разделам курса электротехники, так и при защите расчетно-графических работ.

Для студентов дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.3+621.38(075.8)
ББК 31.2я73

© Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2006

Введение

Настоящий курс предназначен для студентов машиностроительного и энергетического факультетов, изучающих электротехнику. В нем приведены вопросы и задачи, которые могут быть использованы на практических занятиях, при самостоятельной работе студентов, а также для контроля знаний, как по соответствующим разделам курса электротехники, так и при защите расчётно-графических работ.

Цель – оказание помощи преподавателям, ведущим практические занятия, и студентам, изучающим электротехнические курсы.

Вторая часть практикума содержит часть глав по следующим основным разделам: «Расчет трехфазных электрических цепей», «Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях» и «Расчет линейных электрических цепей несинусоидального тока и электрических фильтров».

Контроль подготовленности студентов к занятию производится по вопросам, приведенным во втором разделе главы, путём беглого устного или письменного опроса.

В третьем разделе главы приводится подробное решение типовых задач, рассмотрение которого целесообразно проводить, иллюстрируя решение на доске.

Для закрепления пройденного на занятиях материала в четвёртом разделе приведены варианты заданий для самостоятельного решения. Причём решение задач студенты должны проводить под контролем и при постоянной помощи со стороны преподавателя.

В зависимости от общего объёма практических занятий, объём задач для самостоятельного решения может быть изменён по усмотрению преподавателя.

Студенты машиностроительного факультета изучают электротехнику как общетехническую дисциплину. Она является теоретической базой для изучения других инженерных дисциплин. Поэтому без знания основных законов электротехники, принципов работы электротехнических устройств и приборов невозможно стать полноценным инженером.

1 РАСЧЁТ ТРЁХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

1.1. Домашнее задание

Подготовить теоретический материал к данному практическому занятию: Разд. 3.2-3.9 [1], 4.1-4.7 [2].

1.2. Вопросы для проверки подготовленности студентов к занятию

1. Что называется трехфазной электрической цепью ?
2. Нарисуйте электрические схемы соединения трех однофазных приемников треугольником и звездой.
3. Нарисуйте электрическую схему трёхпроводной и четырёхпроводной трехфазной цепей при соединении фаз нагрузки звездой.
4. Дайте определение симметричной и несимметричной нагрузок в трехфазной цепи.
5. Какая трехфазная система ЭДС называется симметричной? Изобразите ее схему.
6. Что называется линейным и фазным напряжениями трехфазной нагрузки ?
7. Между какими точками (покажите на схеме) измеряются линейные и фазные напряжения при соединении нагрузки звездой и треугольником ?
8. Дайте определение линейным и фазным токам.
9. Каковы соотношения между линейным и фазным напряжениями (токами) при соединении нагрузки звездой и треугольником ?
10. В каких случаях при соединении нагрузки звездой применяется нейтральный провод ?
11. Что называется линейными и нейтральными проводами ?
12. Что называется напряжением смещения нейтрали, и в каком случае оно возникает ?
13. Между какими точками (покажите на схеме) измеряется напряжение смещения нейтрали ?
14. Каково соотношение между линейными токами и током в нейтральном проводе (ток нейтрали) ?
15. Как аналитически и графически определить напряжение смещения нейтрали при несимметричной нагрузке ?
16. Почему при симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе равен нулю ?
17. В чем достоинства и недостатки соединения нагрузки треугольником ?
18. В чем достоинства и недостатки соединения нагрузки звездой ?
19. Почему в нейтральный провод не ставят предохранитель ?
20. К чему приводит обрыв линейного провода при соединении нагрузки звездой или треугольником ?

21. Как изменяются фазные напряжения несимметричной нагрузки при обрыве нейтрального провода ?

22. Чему равна суммарная мощность (полная, активная, реактивная) трехфазной нагрузки ?

23. В каком случае для измерения мощности трехфазной нагрузки может применяться метод двух ваттметров ?

1.3. Решение типовых задач

1.3.1. К зажимам трехфазного симметричного источника энергии с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380$ В подключена соединенная звездой несимметричная нагрузка (рис. 1.1), сопротивление фаз которой $\underline{Z}_{\text{a}} = (6 + j8)$ Ом, $\underline{Z}_{\text{b}} = (24 + j7)$ Ом, $\underline{Z}_{\text{c}} = 20$ Ом.

Определить токи и напряжения на каждой фазе, показания каждого ваттметра, мощность, расходуемую в нагрузке. Построить векторную диаграмму токов и напряжений [3].

Построить векторную диаграмму напряжений и лучевую диаграмму токов для случая обрыва фазы **c** и короткого замыкания фазы **b**.

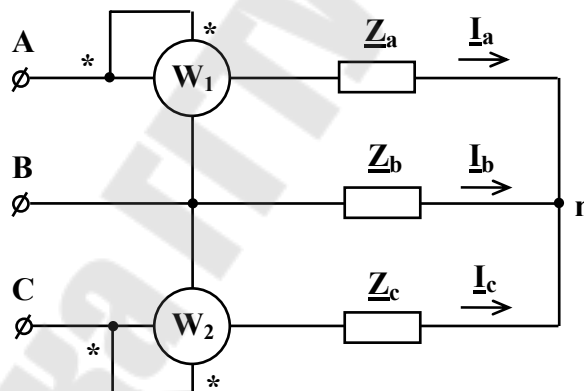


Рис. 1.1

Действующее значение фазных напряжений источника
 $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$ В, а внутренние сопротивления фаз источника равны нулю.

Проводимости фаз нагрузки

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a} = \frac{1}{6 + j8} = (0,06 - j0,08) = 0,1e^{-j53^\circ 10'} \text{ См},$$

$$\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b} = \frac{1}{24 + j7} = (0,0384 - j0,0112) = 0,04e^{-j16^\circ 16'} \text{ См},$$

$$\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ См}.$$

Комплексы напряжений фаз источника

$$\underline{U}_A = 220e^{j0^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_B = 220e^{-j120^\circ} \text{ В},$$

$$\underline{U}_C = 220e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Определим напряжение смещения нейтрали

$$\begin{aligned} \underline{U}_{Nn} &= \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \\ &= \frac{220e^{j0^\circ} \cdot 0,1e^{-j53^\circ 10'} + 220e^{-j120^\circ} \cdot 0,04e^{-j16^\circ 16'} + 220e^{j120^\circ} \cdot 0,05}{0,1e^{-j53^\circ 10'} + 0,04e^{-j16^\circ 16'} + 0,05} = \\ &= \frac{1,364 - j14,13}{0,1484 - j0,0912} = 49,0 - j64,9 = 81,2e^{-j52^\circ 57'} \text{ В}. \end{aligned}$$

Комплексы напряжений на фазах нагрузки

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{Nn} = 171 + j64,9 = 183e^{j20^\circ 46'} \text{ В},$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{Nn} = -159 - j126 = 203e^{-j141^\circ 42'} \text{ В},$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{Nn} = -159 + j255 = 301e^{j121^\circ 53'} \text{ В}.$$

Фазные токи определим по закону Ома для каждой фазы нагрузки

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a \cdot \underline{Y}_a = 183e^{j20^\circ 46'} \cdot 0,1e^{-j53^\circ 10'} = 18,3e^{-j32^\circ 24'} = (15,46 - j9,72) \text{ А},$$

$$\underline{I}_b = \underline{U}_b \cdot \underline{Y}_b = 203e^{-j141^{\circ}42'} \cdot 0,04e^{-16^{\circ}16'} = 8,12e^{-j157^{\circ}58'} = (-7,51 - j3,04) \text{ A},$$

$$\underline{I}_c = \underline{U}_c \cdot \underline{Y}_c = 301e^{j121^{\circ}53'} \cdot 0,05 = 15,05e^{j121^{\circ}53'} = (-7,95 + j12,76) \text{ A}.$$

Для проверки правильности решения составим уравнение по первому закону Кирхгофа для узла **n**

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 15,46 - j9,72 - 7,51 - j3,04 - 7,95 + j12,76 = 0.$$

Одновременно с расчетом напряжений и токов строим векторную диаграмму (рис. 1.2), предварительно задавшись масштабом напряжений m_U и токов m_I .

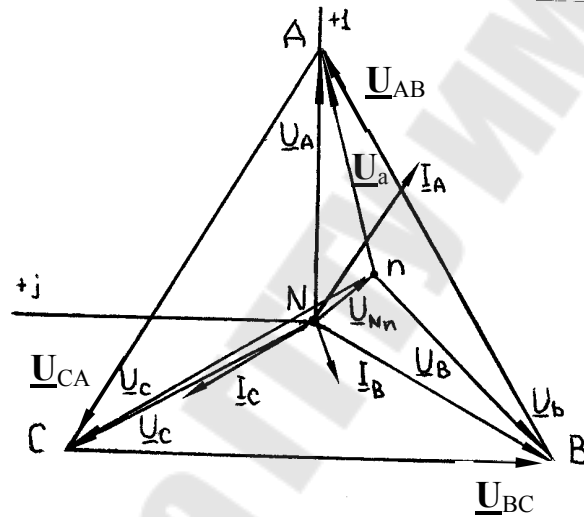


Рис. 1.2

Определим показания каждого ваттметра

$$P_1 = \text{Re}[\underline{U}_{AB} \cdot \underline{I}_a^*] = \text{Re}[380e^{j30^{\circ}} \cdot 18,3e^{j32^{\circ}24'}] = 3230 \text{ Вт},$$

$$P_2 = \text{Re}[\underline{U}_{CB} \cdot \underline{I}_c^*] = \text{Re}[380e^{j90^{\circ}} \cdot 15,05e^{-j121^{\circ}53'}] = 4870 \text{ Вт}.$$

Сумма показаний ваттметров дает мощность, потребляемую трехфазной нагрузкой

$$P = P_1 + P_2 = 3230 + 4870 = 8100 \text{ Вт}.$$

Определим суммарную активную мощность другим способом

$$P = I_a^2 R_a + I_b^2 R_b + I_c^2 R_c = (18,3)^2 \cdot 6 + (8,12)^2 \cdot 24 + (15,05)^2 \cdot 20 = 2000 + 1580 + 4520 = 8100 \text{ Вт.}$$

Обрыв фазы с :

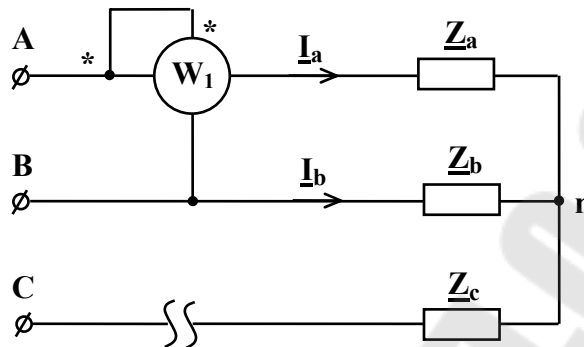


Рис. 1.2а

Фазы **a** и **b** включены последовательно на линейное напряжение \underline{U}_{AB} , поэтому

$$\begin{aligned} \underline{I}_A = -\underline{I}_B &= \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B} = \frac{380e^{j30^\circ}}{6 + 8j + 24 + 7j} = \frac{380e^{j30^\circ}}{30 + 15j} = \frac{380e^{j30^\circ}}{33,54e^{j26,56^\circ}} = \\ &= 11,33e^{j3,44^\circ} \text{ А; } \underline{I}_B = 11,33e^{-j176,56^\circ} \text{ А,} \end{aligned}$$

$$P_W = U_{AB} I_A \cos(\underline{U}_{AB} \angle \underline{I}_A) = 380 \cdot 11,33 \cos(30 - 3,44) = 3851 \text{ Вт,}$$

$$\underline{I}_C = 0.$$

Векторная диаграмма токов и напряжений показана на рис. 1.2б.

$$M_U = 20 \text{ В/см}$$

$$M_I = 2 \text{ А/см}$$

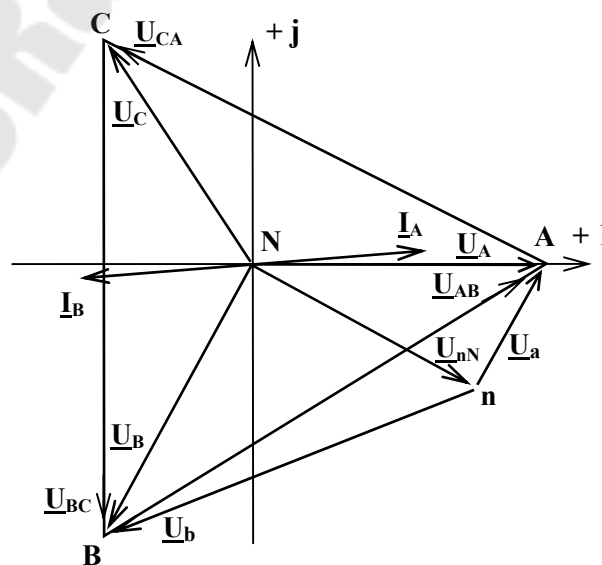


Рис. 1.2б

Короткое замыкание фазы **b** :

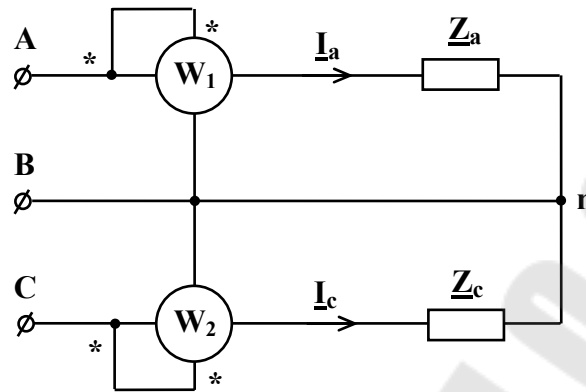


Рис. 1.2б

$$\underline{U}_{Nn} = \underline{U}_B ;$$

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_a} = \frac{380e^{j30^\circ}}{10e^{j53,13^\circ}} = 38e^{-j23,13^\circ} \text{ A} ;$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{CB}}{\underline{Z}_c} = -\frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_c} = \frac{-380e^{-j90^\circ}}{20} = \frac{380e^{j90^\circ}}{20} = 19e^{j90^\circ} \text{ A}.$$

Показание ваттметров

$$P_{W1} = U_{AB} I_A \cos(\underline{U}_{AB} \wedge \underline{I}_A) = 380 \cdot 38 \cos(30 - 23,13) = 8664,02 \text{ Вт},$$

$$P_{W2} = U_{CB} I_C \cos(\underline{U}_{CB} \wedge \underline{I}_C) = 380 \cdot 19 \cos(90 - 90) = 7220 \text{ Вт},$$

$$\underline{I}_B = -(\underline{I}_A + \underline{I}_C) = -\left(38e^{-j23,13^\circ} + 19e^{j90^\circ}\right) = -35,18e^{j6,65^\circ} = 35,18e^{-j173,35^\circ} \text{ A}.$$

Векторная диаграмма токов и напряжений приведена на рис. 1.2г.

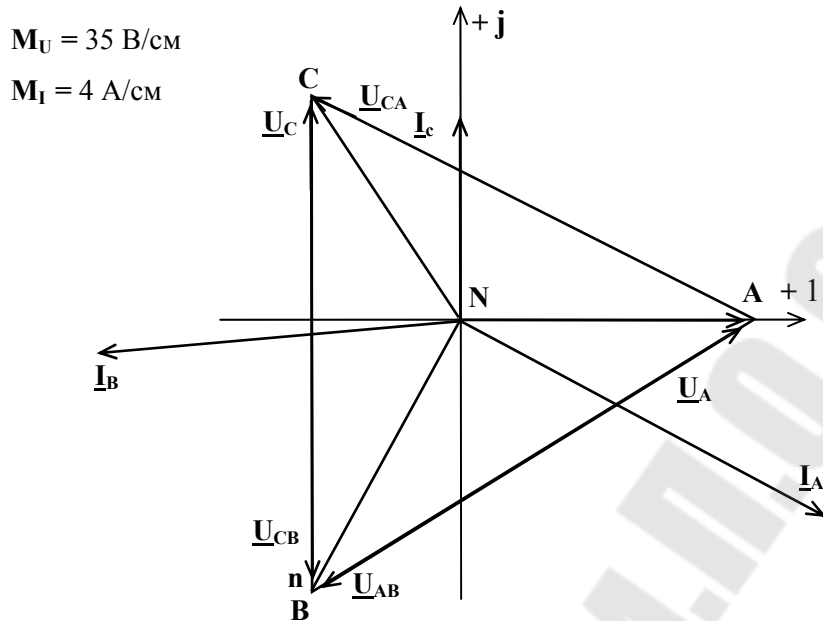


Рис. 1.2г

1.3.2 К симметричному трехфазному источнику с линейным напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ и частотой $f = 50 \text{ Гц}$ подключена равномерная нагрузка, соединенная по схеме «звезда», с полным фазным сопротивлением $Z = 90 \text{ Ом}$ и индуктивностью $L = 180 \text{ мГн}$. Определить активную, реактивную и полную мощности, коэффициент мощности, действующие значения линейных токов. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

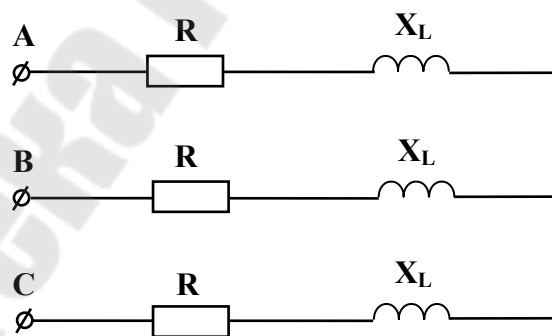


Рис. 1.3

Схема трехфазного симметричного приемника приведена на рис.1.3. Определим действующее значение фазного напряжения

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

Действующее значение фазного тока определим в соответствии с законом Ома

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z} = \frac{220}{90} = 2,45 \text{ А.}$$

Линейный ток при соединении нагрузки «звездой» равен фазному

$$I_{\text{л}} = I_{\phi} = 2,45 \text{ А.}$$

Реактивное сопротивление фазы

$$X_L = 2 \pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,18 = 56,5 \text{ Ом.}$$

Зная реактивное и полное сопротивление фазы, можем определить его активное значение

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L^2} = \sqrt{90^2 - 56,5^2} = 70 \text{ Ом.}$$

Определим коэффициент мощности нагрузки

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{70}{90} = 0,778.$$

Мощности, потребляемые нагрузкой

-активная:

$$P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 \cdot 0,778 = 1,26 \text{ кВт,}$$

или через линейные величины:

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = 1,73 \cdot 380 \cdot 2,45 \cdot 0,778 = 1,26 \text{ кВт,}$$

-реактивная:

$$Q = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 \cdot 0,628 = 1,01 \text{ кВАр,}$$

или через линейные величины:

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi = 1,73 \cdot 380 \cdot 2,45 \cdot 0,628 = 1,01 \text{ кВАр}$$

-полная мощность:

$$S = 3 U_{\phi} I_{\phi} = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 = 1,62 \text{ кВА}$$

или через линейные величины:

$$S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} = 1,73 \cdot 380 \cdot 2,45 = 1,62 \text{ кВА},$$

или через активную и реактивную мощности:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{1,26^2 + 1,01^2} = 1,62 \text{ кВА}.$$

Построение векторной диаграммы начинаем с построения равностороннего треугольника векторов линейных напряжений, предварительно задавшись масштабами по напряжению m_U и по току m_I (рис. 1.4).

Проведя медианы из вершин равностороннего треугольника в точке их пересечения, находим нейтральную точку нагрузки n , которая совпадает с нейтральной точкой источника N .

Соединив точку n с вершинами треугольника ABC получаем векторы фазных напряжений \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C . При активно – индуктивной нагрузке ток отстаёт от напряжения, поэтому вектора токов \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C откладываем под углом φ от соответствующих фазных напряжений (рис. 1.4).

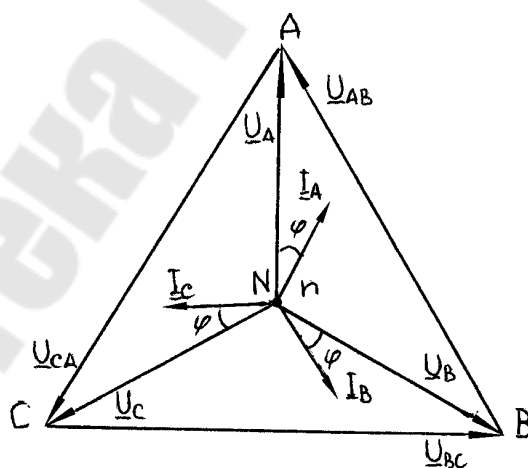


Рис. 1.4

1.3.3 К трёхфазной линии с симметричными линейными напряжениями $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ подключён треугольником приёмник, сопротивление каждой фазы которого $\underline{Z} = (10 + j10) \text{ Ом}$ (рис.1.5). Найти токи в каждой фазе

нагрузки, линии и показания каждого ваттметра. Найти те же величины в случае обрыва в точке **a** [3].

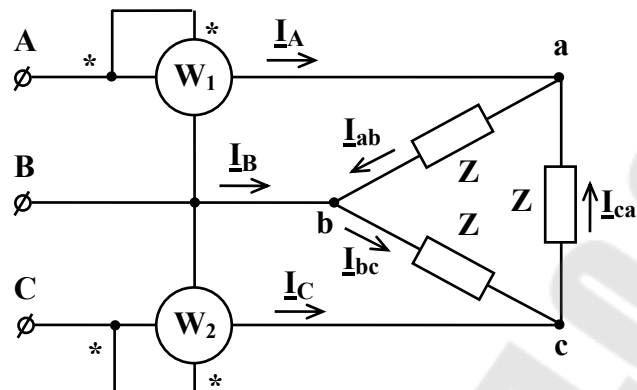


Рис. 1.5

Предположим, что комплекс линейного напряжения \underline{U}_{AB} вещественен. Тогда комплексы линейных напряжений

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_{ab} = 220 \text{ В}, \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_{bc} = 220 e^{-j120^\circ} \text{ В}, \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_{ca} = 220 e^{-j240^\circ} \text{ В}.\end{aligned}$$

Определим комплексы фазных токов

$$\begin{aligned}\underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}} = \frac{220}{10 + j10} = 15,6 e^{-j45^\circ} = (11 - j11) \text{ А}, \\ \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}} = \frac{220 e^{-j120^\circ}}{10 + j10} = 15,6 e^{-j165^\circ} = (-15 - j4,03) \text{ А}, \\ \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}} = \frac{220 e^{-j240^\circ}}{10 + j10} = 15,6 e^{-j75^\circ} = (4,03 + j15) \text{ А}.\end{aligned}$$

Комплексы линейных токов определим составив уравнения по первому закону Кирхгофа для узлов **a**, **b** и **c**:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 6,97 - j26 = 26,9 e^{-j75^\circ} \text{ А}, \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -26 + j6,97 = 26,9 e^{j165^\circ} \text{ А},\end{aligned}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 19 + j19 = 26,9 e^{j45^\circ} \text{ A.}$$

Найдём показания ваттметров

$$P_1 = \operatorname{Re}[\underline{U}_{AB} \cdot \underline{I}_A^*] = \operatorname{Re}\left[220 \cdot 26,9 e^{j75^\circ}\right] = 220 \cdot 26,9 \cos 75^\circ = 1530 \text{ Вт,}$$

$$\begin{aligned} P_2 &= \operatorname{Re}[\underline{U}_{CB} \cdot \underline{I}_C^*] = \operatorname{Re}\left[-220 e^{-j120^\circ} \cdot 26,9 e^{-j45^\circ}\right] = \\ &= \operatorname{Re}\left[220 e^{j60^\circ} \cdot 26,9 e^{-j45^\circ}\right] = 220 \cdot 26,9 \cos 15^\circ = 5730 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Активная мощность трёхфазной нагрузки:

$$P = P_1 + P_2 = 1530 + 5730 = 7260 \text{ Вт.}$$

Определим активную мощность другим способом

$$P = 3 I_\phi^2 R = 3 \cdot 15,6^2 \cdot 10 = 7260 \text{ Вт.}$$

Векторная диаграмма приведена на рис.1.6. Последовательность её построения описана в примере 1.3.2.

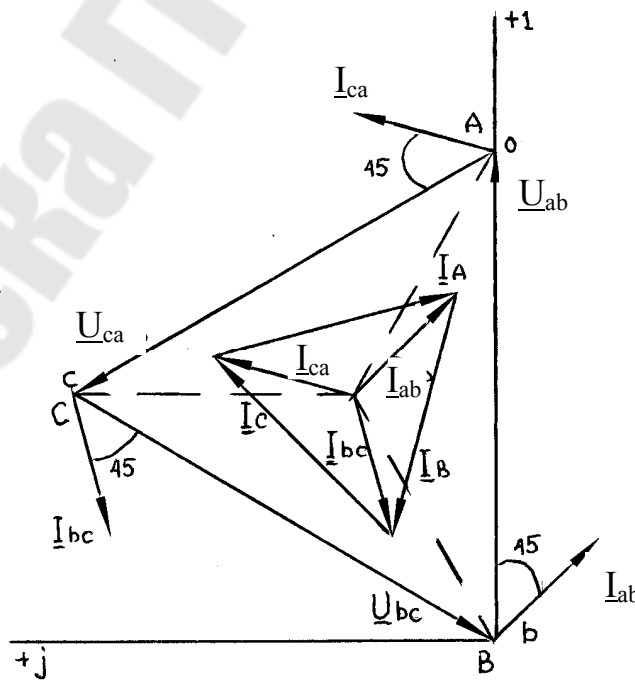


Рис. 1.6

При обрыве линейного провода в точке **a**, трёхфазная цепь превращается в однофазную: фазы **ab** и **ca** включены последовательно на линейное напряжение \underline{U}_{bc} и параллельно с фазой **bc**.

Фазные токи:

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}} = \frac{220 e^{-j120^\circ}}{10 + j10} = (-15 - j4,04) \text{ A},$$

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{cb}}{2\underline{Z}} = \frac{220 e^{j120^\circ}}{2(10 + j10)} = (7,5 + j2,02) \text{ A}.$$

Вычислим линейные токи

$$\underline{I}_A = 0, \quad \underline{I}_C = -\underline{I}_B = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 22,5 + j6,05 = 23,3 e^{j15^\circ} \text{ A}.$$

Определим показания ваттметров:

$$P_1 = 0,$$

$$P_2 = \operatorname{Re}[\underline{U}_{CB} \cdot \underline{I}_C^*] = \operatorname{Re}\left[220 e^{j60^\circ} \cdot 23,3 e^{-j15^\circ}\right] =$$

$$= 220 \cdot 23,3 \cos 45^\circ = 3630 \text{ Вт}.$$

1.4 Варианты задач для самостоятельного решения

К симметричному трёхфазному источнику подключена электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 1.7. Значения линейного напряжения U_L , активных R , индуктивных X_L и ёмкостных X_C сопротивлений приёмников приведены в таблице 1.1.

Необходимо:

1. При соединении приёмников “звездой” определить токи в линейных и нейтральном проводах, а также активную, реактивную и полную мощности потребляемые цепью в следующих режимах:

а) трёхфазном, при симметричной системе напряжений с нейтральным проводом;

б) трёхфазном, при симметричной системе напряжений без нейтрального провода;

в) при обрыве одной из фаз (табл. 1.1) без нейтрального провода;

г) при коротком замыкании одной из фаз (табл. 1.1) без нейтрального провода;

Для всех режимов построить топографические диаграммы напряжений и на них показать векторы токов.

2. Те же приёмники соединить “треугольником” и определить фазные и линейные токи. Определить активную, реактивную и полную мощности потребляемые цепью в двух режимах:

- а) трёхфазном, при симметричной системе напряжений;
- б) при обрыве одного из линейных проводов;

Для каждого режима построить топографические векторные диаграммы напряжений и показать на них векторы токов.

Таблица 1.1

| Вариант | $U_{л},$ В | Сопротивления, Ом | | | | | | | | | Оборва- на фаза | КЗ фазы |
|---------|---------------|-------------------|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|--------------------|---------|
| | | r1 | XL1 | XC1 | r2 | XL2 | XC2 | r3 | XL3 | XC3 | | |
| 1 | 220 | 7 | 8 | 12 | 11 | 8 | 7 | 9 | 6 | 4 | А | В |
| 2 | 380 | 8 | 9 | 6 | 5 | 9 | 4 | 6 | 8 | 9 | В | С |
| 3 | 380 | 10 | 7 | 3 | 4 | 8 | 9 | 6 | 8 | 7 | С | А |
| 4 | 220 | 4 | 8 | 7 | 7 | 10 | 5 | 5 | 9 | 4 | А | В |
| 5 | 220 | 6 | 8 | 5 | 4 | 9 | 11 | 7 | 10 | 6 | В | С |
| 6 | 380 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 10 | 11 | 12 | С | А |
| 7 | 220 | 9 | 6 | 8 | 6 | 5 | 5 | 7 | 11 | 4 | А | В |
| 8 | 380 | 8 | 10 | 6 | 7 | 9 | 4 | 5 | 11 | 12 | В | С |
| 9 | 220 | 7 | 6 | 5 | 4 | 8 | 9 | 10 | 12 | 9 | С | А |
| 0 | 380 | 4 | 8 | 6 | 6 | 5 | 9 | 6 | 8 | 10 | А | В |

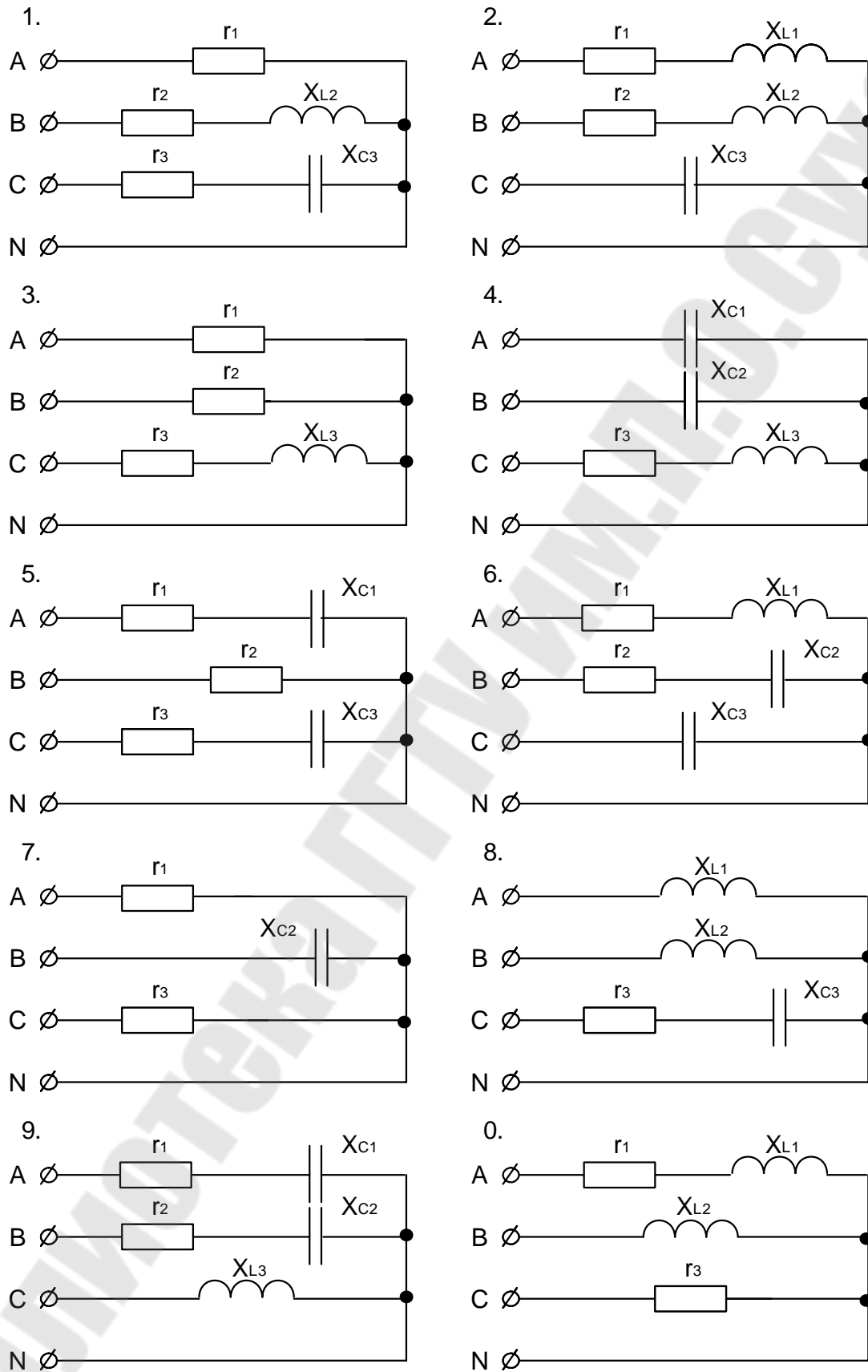


Рис. 1.7

2 РАСЧЁТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

2.1 Домашнее задание

Подготовить теоретический материал к данному практическому занятию: Разд. 5.1-5.5, 5.8/5/.

2.2 Вопросы для проверки подготовленности студентов к занятию

1. Что называется переходным процессом в электрической цепи ?
2. Что является причиной возникновения переходных процессов ?
3. Какие существуют методы расчёта переходных процессов ?
4. Какие значения токов и напряжений цепи называются установившимися (вынужденными) ?
5. Какие токи и напряжения цепи называются свободными ?
6. Сформулируйте первый закон коммутации.
7. Как формулируется второй закон коммутации ?
8. Что называется начальными условиями ?
9. Какие начальные условия называются ненулевыми (нулевыми) ?
10. Что называется постоянной времени цепи ?
11. Какова размерность постоянной времени цепи ?
12. Что называется докоммутационными (послекоммутационными) начальными условиями ?
13. Чему равна длительность переходного процесса ?
12. Какие этапы содержит расчёт переходного процесса классическим методом ?

2.3 Решение типовых задач

2.3.1 Катушка, активное сопротивление которой $R = 10$ Ом и индуктивность $L = 100$ мГн, включается в сеть постоянного тока с напряжением $U = 100$ В (рис. 2.1).

Построить кривую изменения тока в катушке и определить энергию магнитного поля для момента времени $t = 0,01$ с после замыкания переключателя SA.

До замыкания переключателя SA ток в цепи отсутствовал — $i(0_-) = 0$. Поэтому сразу после замыкания переключателя, в соответствии с первым законом коммутации, $i(0_+) = 0$.

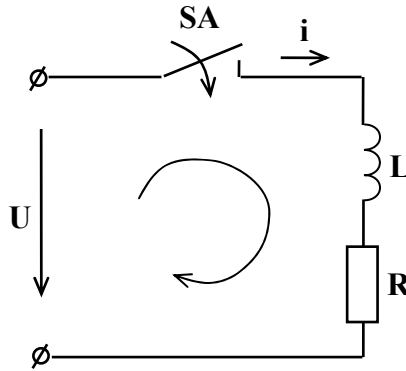


Рис. 2.1

Уравнение, составленное для рассматриваемой цепи по второму закону Кирхгофа сразу после коммутации, имеет вид

$$U_L + i \cdot R - U = 0,$$

где $U_L = L \frac{di}{dt}$ — напряжение на катушке, В.

Отсюда получаем линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка

$$L \frac{di}{dt} + i \cdot R = U.$$

Закон изменения тока в цепи $i(t)$ определяется решением этого дифференциального уравнения:

$$i(t) = i_y + i_{св},$$

где i_y — установившееся значение тока в цепи, А;

$i_{св}$ — свободная составляющая тока, А.

Установившийся ток i_y равен току в цепи $i(\infty)$ после окончания переходного процесса $\left(\frac{di}{dt} = 0 \right)$:

$$i_y = \frac{U}{R}.$$

Свободную составляющую тока будем искать в виде

$$i_{св} = A \cdot e^{pt},$$

где A — произвольная постоянная интегрирования,

$$p = -\frac{R}{L} \text{ — корень характеристического уравнения } Lp + R = 0.$$

Постоянную интегрирования A определяем из начальных условий. Соответственно первому закону коммутации $i(0) = 0$, поэтому общее решение дифференциального уравнения будет иметь вид

$$0 = \frac{U}{R} + A,$$

откуда
$$A = -\frac{U}{R}.$$

Подставив найденное значение A в выражение закона изменения тока в цепи, получим

$$i(t) = \frac{U}{R} - \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

где $\tau = -\frac{1}{p} = \frac{L}{R}$ — постоянная времени цепи, с.

С учётом числовых значений, закон изменения тока $i(t)$ примет вид

$$i(t) = 11(1 - e^{-\frac{t}{0,01}}).$$

Для построения кривой переходного процесса $i(t)$ по $k = 10$ точкам зададимся значениями моментов времени $t_k = t_{k-1} + \Delta t$ ($\Delta t = \frac{5\tau}{k}$) и для этих моментов времени вычислим значения $i(t_k)$. По результатам вычислений строим переходную кривую $i(t)$ (рис. 2.2).

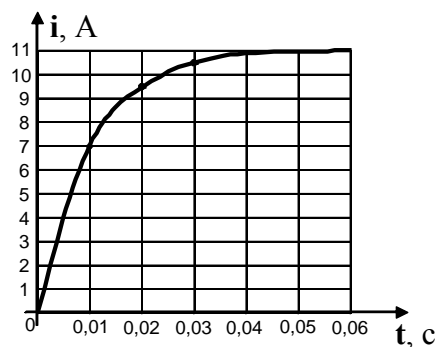


Рис. 2.2

Энергия магнитного поля катушки определяется по формуле

$$W_M = \frac{L \cdot i^2}{2}.$$

Подставляя в эту формулу числовое значение индуктивности катушки ($L = 0,1$ Гн) и величину мгновенного значения тока при $t = 0,01$ с, получаем

$$W_M = \frac{0,1 \cdot 6,95^2}{2} = 2,42 \text{ Дж.}$$

2.3.2 Катушка, сопротивление которой $R = 4$ Ом и индуктивность $L = 5$ Гн, отключается от сети постоянного тока напряжением $U = 110$ В и замыкается на резистор R_1 сопротивлением $R_1 = 6$ Ом (Рис. 2.3).

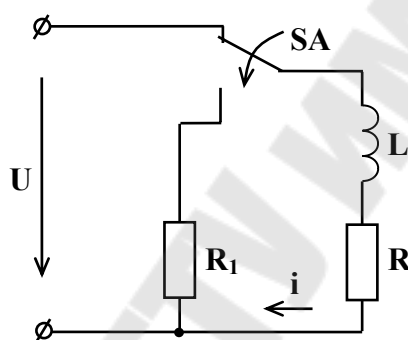


Рис. 2.3

Определить закон изменения тока в цепи и построить график $i(t)$. Найти значение тока для момента $t = 1$ с после отключения катушки. Найти максимальное значение ЭДС самоиндукции, индуктированной в цепи после отключения катушки.

Перед отключением катушки от источника напряжения ток в цепи имеет значение

$$i(0_-) = \frac{U}{R} = \frac{110}{4} = 27,5 \text{ А.}$$

Уравнение электрического равновесия цепи сразу после отключения цепи от источника напряжения

$$U_L + i(R_1 + R) = 0, \quad L \frac{di}{dt} + i(R_1 + R) = 0.$$

Решение линейного дифференциального уравнения имеет вид

$$i(t) = i_y + i_{св} = i_y + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Так как вся энергия, запасённая в катушке к моменту коммутации, после окончания переходного процесса выделится в виде тепла на сопротивлениях R и R_1 , то ток в цепи будет равен нулю $i(\infty) = i_y = 0$.

Решение дифференциального уравнения для момента $t = 0$

$$\frac{U}{R} = 0 + A,$$

отсюда постоянная интегрирования $A = \frac{U}{R} = 27,5 \text{ А}$.

Постоянная времени цепи

$$\tau = \frac{L}{R + R_1} = \frac{5}{10} = 0,5 \text{ с}.$$

С учётом числовых значений выражение решения дифференциального уравнения

$$i(t) = 27,5 e^{-\frac{t}{0,5}} \text{ А}.$$

График изменения тока $i(t)$ приведён на рис. 2.4.

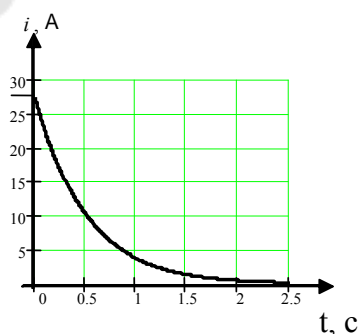


Рис. 2.4

В момент времени $t = 1 \text{ с}$, значение тока в цепи $i(1) = 27,5 \cdot 0,135 = 3,71 \text{ А}$.

ЭДС самоиндукции, индуктированную в катушке, определим по формуле:

$$e_L = -L \frac{di(t)}{dt} = -L \frac{d}{dt} \left[\frac{U}{R + R_1} e^{-\frac{t}{\tau}} \right] = -L \frac{d}{dt} \left(27.5 e^{-\frac{R+R_1}{L}t} \right) =$$

$$= (R + R_1) \cdot 27.5 e^{-\frac{R+R_1}{L}t} = 275 e^{-\frac{t}{0.5}} \text{ В.}$$

Из этого выражения видно, что максимальное значение ЭДС e_L принимает в момент $t = 0$

$$e_{L\max} = 275 \text{ В.}$$

2.3.3 Электрическая цепь (рис. 2.5), параметры которой $R_1 = 5 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$, $R_3 = 5 \text{ Ом}$, $R_4 = 15 \text{ Ом}$, $C = 1 \text{ мкФ}$, при разомкнутом переключателе SA находится в установившемся режиме под воздействием постоянного напряжения $U = 15 \text{ В}$. После замыкания переключателя SA требуется определить докоммутационные значения токов и напряжения на конденсаторе, а также законы изменения тока через конденсатор и напряжения на нём.

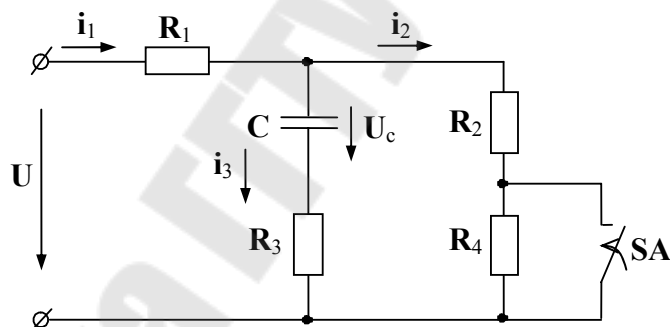


Рис.2.5

Докоммутационные (до замыкания переключателя SA) значения токов и напряжение на конденсаторе

$$i_1(0_-) = i_2(0_-) = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_4} = \frac{15}{5 + 10 + 15} = 0,5 \text{ А,}$$

$$i_3(0_-) = 0,$$

$$U_C(0_-) = i_2(0_-)(R_2 + R_4) = 0,5(10 + 15) = 12,5 \text{ В.}$$

Определим установившееся значение токов и напряжение $U_C(\infty)$

$$i_1(\infty) = i_2(\infty) = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{15}{5 + 10} = 1 \text{ A},$$

$$i_3(\infty) = 0,$$

$$U_C(\infty) = i_2(\infty) R_2 = 1 \cdot 10 = 10 \text{ В}.$$

Для расчёта законов изменения тока и напряжения на конденсаторе в переходном режиме, составим систему уравнений по законам Кирхгофа для момента времени $t = 0_+$ (т. е. после замыкания переключателя SA)

$$\begin{aligned} i_1 - i_2 - i_3 &= 0, \\ i_1 R_1 + i_3 R_3 + U_C &= U, \\ i_2 R_2 - i_3 R_3 - U_C &= 0. \end{aligned}$$

Выразим ток i_3 через напряжение на конденсаторе U_C :
 $i_3 = C \frac{dU_C}{dt}$. Подставим это выражение в систему Кирхгофа

Решим систему относительно тока i_3 :

$$i_3 [R_2(R_1 + R_3) + R_1 R_3] + U_C (R_2 + R_1) = U R_2.$$

Подставив в это уравнение выражение тока i_3 , через напряжение на конденсаторе $i_3 = C \frac{dU_C}{dt}$, получим исходное дифференциальное уравнение

$$C \frac{dU_C}{dt} [R_2(R_1 + R_3) + R_1 R_3] + U_C (R_2 + R_1) = U R_2.$$

Для определения постоянной времени цепи τ найдём корень характеристического уравнения

$$p C [R_2(R_1 + R_3) + R_1 R_3] + (R_2 + R_1) = 0,$$

$$p = \frac{R_2 + R_1}{C [R_2(R_1 + R_3) + R_1 R_3]} = -\frac{10 + 5}{10^{-6} [10(5 + 5) + 5 \cdot 5]} = -12 \cdot 10^4 \text{ 1/с}.$$

Постоянная времени цепи

$$\tau = -\frac{1}{p} = \frac{1}{12 \cdot 10^4} = 0,083 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Решение однородного дифференциального уравнения запишем в виде

$$U_C(t) = U_{cy} + (U_C)_{св} = U_{cy} + B \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $U_{cy} = U_C(\infty) = 10 \text{ В}$, в соответствии со вторым законом коммутации;

B — постоянная интегрирования, определяемая из решения дифференциального уравнения, записанного для момента времени $t = 0$:

$$U_C(0_-) = U_C(\infty) + B,$$

$$B = U_C(0_-) - U_C(\infty) = 12,5 - 10 = 2,5 \text{ В.}$$

Окончательно решение дифференциального уравнения получим в виде

$$U_C(t) = 10 + 2,5 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Для определения закона изменения тока через конденсатор продифференцируем $U_C(t)$ согласно выражению

$$\begin{aligned} i_3(t) &= C \frac{dU_C(t)}{dt} = C \frac{d}{dt} \left(U_{cy} + B \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = -\frac{CB}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \\ &= -\frac{10^{-6} \cdot 2,5}{0,083 \cdot 10^{-4}} e^{-\frac{t}{\tau}} = -0,3 e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ А.} \end{aligned}$$

Задаваясь значениями моментов времени $t_1 = \tau$, $t_2 = 2\tau$, $t_3 = 3\tau$, $t_4 = 4\tau$ и подставляя их в выражение $U_C(t)$ и $i_3(t)$, получим кривые законов изменения напряжения на конденсаторе и тока через него (рис.2.6).

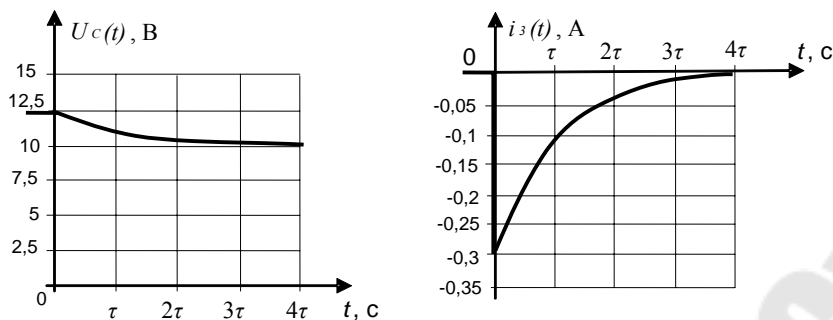


Рис. 2.6

2.4 Варианты задач для самостоятельного решения

2.4.1 На рис. 2.7 приведены схемы электрической цепи постоянного тока, содержащей один реактивный элемент (катушку индуктивности или конденсатор).

Параметры элементов цепи, а также напряжения источников питания указаны в табл. 2.1.

Переходной процесс в цепи возникает в результате коммутации рубильника. Замыкание или размыкание переключателя SA определяется направлением стрелки на контакте переключателя.

Для заданной схемы необходимо:

1. Определить выражения законов изменения от времени тока $i_L(t)$ и Э.Д.С. самоиндукции $e_L(t)$ в ветви с катушкой индуктивности или напряжения $U_C(t)$ и тока $i_C(t)$ в ветви с конденсатором.
2. Построить графики переходных процессов.

Таблица 2.1

| № п/п | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $U, В$ | 10 | 12 | 15 | 20 | 30 | 36 | 42 | 50 | 65 | 90 |
| $R1, Ом$ | 80 | 15 | 60 | 5 | 40 | 16 | 20 | 65 | 10 | 72 |
| $R2, Ом$ | 6 | 92 | 18 | 75 | 100 | 24 | 32 | 80 | 45 | 8 |
| $R3, Ом$ | 180 | 15 | 80 | 28 | 120 | 140 | 35 | 40 | 60 | 70 |
| $L, мГн$ | 100 | 400 | 300 | 250 | 80 | 60 | 350 | 450 | 500 | 120 |
| $C, мкФ$ | 240 | 80 | 120 | 200 | 160 | 100 | 60 | 50 | 250 | 300 |

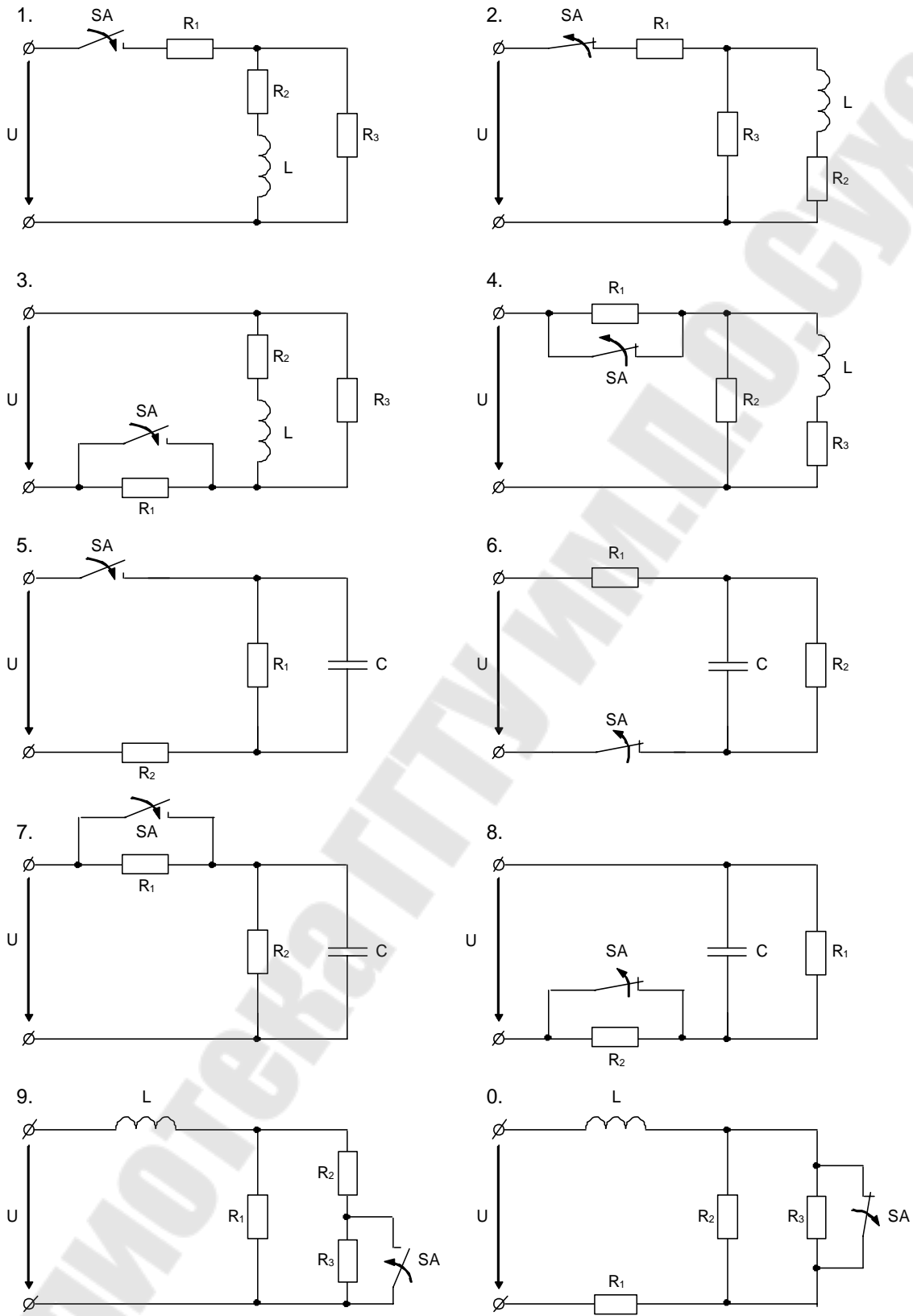


Рис. 2.7

3 РАСЧЁТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

3.1 Домашнее задание

Подготовить теоретический материал к данному практическому занятию: Разд. 6.1 - 6.6 /1/, Гл. 7 /2/, Разд. 4.1 - 4.4 /5/.

3.2 Вопросы для проверки подготовленности студентов к занятию

1. Какова причина возникновения несинусоидальных токов в электрических цепях?
 2. В каких формах может быть задана периодическая несинусоидальная функция?
 3. Какие составляющие содержит представление периодической несинусоидальной функции в виде ряда Фурье?
 4. Какой метод применяется при расчёте линейных электрических цепей несинусоидального тока?
 5. Как рассчитывается действующее значение периодической несинусоидальной величины?
 6. Как рассчитывается активная мощность периодического несинусоидального тока?
 7. Как рассчитывается реактивная мощность периодического несинусоидального тока?
 8. Как рассчитывается полная мощность периодического несинусоидального тока ?
 9. Что называется электрическим фильтром ?
 10. Какие фильтры называются сглаживающими ?
 11. Какие электрические фильтры называются резонансными ?
 12. Какие фильтры называются избирательными ?
 13. Что называется коэффициентом пульсаций ?
 14. Как рассчитывается коэффициент сглаживания фильтра ?
- Что называется коэффициентом амплитуды периодического несинусоидального тока ?
15. Что называется коэффициентом формы периодической несинусоидальной величины ?
 16. По какому соотношению рассчитывается коэффициент искажения периодической несинусоидальной величины ?

3.3 Решение типовых задач

3.3.1 Напряжение источника, питающего потребитель с активным сопротивлением $R = 8 \text{ Ом}$, изменяется по трапецеидальному закону (рис. 3.1).

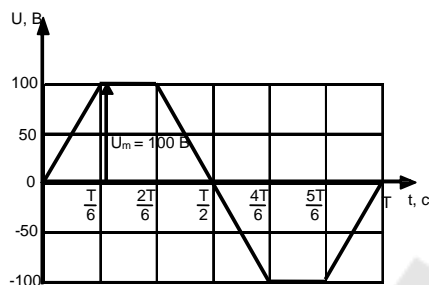


Рис. 3.1

Найти действующие значения напряжения и тока, а также мощность приёмника. Определить процентное содержание высших гармоник напряжения и тока относительно основной гармоники. При разложении в ряд ограничиться седьмой гармоникой включительно.

Для напряжения трапецеидальной формы можно написать следующий ряд:

$$U = \frac{4 U_m}{\pi \cdot \alpha} \left[\sin \alpha \cdot \sin \omega t + \frac{1}{3^2} \sin 3 \alpha \cdot \sin 3 \omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5 \alpha \cdot \sin 5 \omega t + \frac{1}{7^2} \sin 7 \alpha \cdot \sin 7 \omega t + \dots \right]$$

Для заданной трапеции

$$\alpha = \omega t = \frac{2 \pi}{T} \cdot \frac{T}{6} = \frac{\pi}{3} = 60^\circ,$$

поэтому амплитуды гармоник, кратных трём, будут равны нулю, и в ряде напряжения будут присутствовать только первая, пятая и седьмая гармоники

$$U = \frac{4 \cdot 100}{\pi \cdot \frac{\pi}{3}} \left[\sin \frac{\pi}{3} \cdot \sin \omega t + \frac{1}{5^2} \sin 5 \frac{\pi}{3} \cdot \sin 5 \omega t + \frac{1}{7^2} \sin 7 \frac{\pi}{3} \cdot \sin 7 \omega t \right] \text{ В},$$

или

$$U = (105 \sin \omega t - 4,2 \sin 5 \omega t + 2,14 \sin 7 \omega t) \text{ В}.$$

Активное сопротивление приёмника для каждой из гармоник остаётся неизменным, поэтому для получения ряда тока достаточно разделить каждую составляющую ряда напряжений на величину $R = 8 \text{ Ом}$.

Тогда

$$i = (13,1 \sin \omega t - 0,526 \sin 5 \omega t + 0,268 \sin 7 \omega t) \text{ A.}$$

Действующие значения напряжения и тока:

$$U = \sqrt{U_{(1)}^2 + U_{(5)}^2 + U_{(7)}^2} = 74,5 \text{ В,}$$

$$I = \sqrt{I_{(1)}^2 + I_{(5)}^2 + I_{(7)}^2} = 9,29 \text{ A.}$$

Мощность приёмника определяется суммой мощностей отдельных гармоник:

$$P = P_{(1)} + P_{(5)} + P_{(7)} = RI_{(1)}^2 + RI_{(5)}^2 + RI_{(7)}^2 = RI^2 = 690 \text{ Вт.}$$

Процентное содержание высших гармоник напряжения относительно основной гармоники:

$$\frac{U_{(5)m}}{U_{(1)m}} \cdot 100\% = \frac{I_{(5)m}}{I_{(1)m}} \cdot 100\% = \frac{4,2}{105} \cdot 100\% = \frac{0,526}{13,1} \cdot 100\% = 3,83\%,$$

$$\frac{U_{(7)m}}{U_{(1)m}} \cdot 100\% = \frac{I_{(7)m}}{I_{(1)m}} \cdot 100\% = \frac{2,14}{105} \cdot 100\% = \frac{0,269}{13,1} \cdot 100\% = 2,04\%.$$

Кривая тока будет подобна кривой напряжения.

3.3.2. На рис. 3.2 изображена схема цепи, параметры которой при основной частоте имеют $\omega_1 L = 12 \text{ Ом}$, $\frac{1}{\omega_1 C} = 30 \text{ Ом}$, а активные сопротивления:

$R_1 = 6 \text{ Ом}$, $R_2 = 5 \text{ Ом}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$.

Приложенное к цепи напряжение

$$u = U_0 + U_{(1)m} \sin \omega_1 t + U_{(3)m} \sin (3\omega_1 t + \psi_3), \text{ где } U_0 = 30 \text{ В,}$$

$$U_{(1)m} = 100 \text{ В, } U_{(3)m} = 40 \text{ В, } \psi_3 = 20^\circ.$$

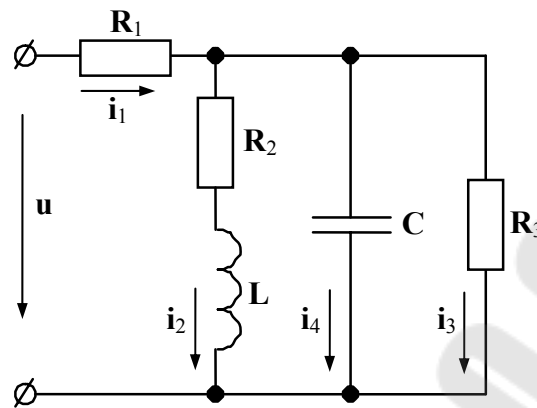


Рис. 3.2

Записать уравнение мгновенного значения тока неразветвлённого участка цепи. Определить действующее значение каждого тока. Вычислить активную мощность, потребляемую цепью.

Расчёт постоянной составляющей

Эквивалентное сопротивление цепи и величины постоянного тока в неразветвленной части цепи и в ветвях с сопротивлениями R_2 и R_3 определяются по формулам

$$R_{\text{экв}(0)} = R + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 10 \text{ Ом},$$

$$I_{1(0)} = \frac{U_{(0)}}{R_{\text{экв}(0)}} = \frac{30}{10} = 3 \text{ А},$$

$$I_{2(0)} = I_{1(0)} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 2,4 \text{ А},$$

$$I_{3(0)} = I_{1(0)} - I_{2(0)} = 0,6 \text{ А},$$

$$I_{4(0)} = 0.$$

Расчёт для первой гармоники

Определим комплексное эквивалентное сопротивление трёх параллельных ветвей:

$$\frac{1}{Z_{\text{ab}(1)}} = \frac{1}{Z_{2(1)}} + \frac{1}{Z_{3(1)}} + \frac{1}{Z_{4(1)}} = \frac{1}{5 + j12} + \frac{1}{20} + \frac{1}{-j30} = (79,6 - j37,7) \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

отсюда

$$\underline{Z}_{ab(1)} = \frac{1}{(79,6 - j 37,7) \cdot 10^{-3}} = 11,4 e^{j25^{\circ}20'} = (10,25 + j 4,83) \text{ Ом.}$$

Комплекс эквивалентного сопротивления всей цепи

$$\underline{Z}_{\text{экв}(1)} = \mathbf{R}_1 + \underline{Z}_{ab(1)} = 16,25 + j 4,83 = 17 e^{j16^{\circ}30'} \text{ Ом.}$$

Комплексы амплитудных значений тока в неразветвлённой части цепи, напряжения на параллельных ветвях и токов в них:

$$\underline{I}_{1m(1)} = \frac{\underline{U}_{m(1)}}{\underline{Z}_{\text{экв}(1)}} = \frac{100}{17 e^{j16^{\circ}30'}} = 5,88 e^{-j16^{\circ}30'} \text{ А,}$$

$$\underline{U}_{abm(1)} = \underline{I}_{1m(1)} \underline{Z}_{ab} = 5,88 e^{-j16^{\circ}30'} \cdot 11,4 e^{j25^{\circ}20'} = 67 e^{j8^{\circ}50'} \text{ В,}$$

$$\underline{I}_{2m(1)} = \frac{\underline{U}_{abm(1)}}{\underline{Z}_{2(1)}} = \frac{67 e^{j8^{\circ}50'}}{5 + j12} = 5,15 e^{-j58^{\circ}30'} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_{3m(1)} = \frac{\underline{U}_{abm(1)}}{\underline{Z}_{3(1)}} = \frac{67 e^{j8^{\circ}50'}}{20} = 3,35 e^{j8^{\circ}50'} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_{4m(1)} = \frac{\underline{U}_{abm(1)}}{\underline{Z}_{4(1)}} = \frac{67 e^{j8^{\circ}50'}}{-j30} = 2,23 e^{j98^{\circ}50'} \text{ А.}$$

Расчёт для третьей гармоники производится аналогично:

$$\underline{Z}_{1(3)} = 6 \text{ ,}$$

$$\underline{Z}_{2(3)} = \mathbf{R}_2 + j\omega_1 \mathbf{L} = 5 + j36 = 36,5 e^{j82^{\circ}10'} \text{ ,}$$

$$\underline{Z}_{3(3)} = 20 \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}_{4(3)} = -j \frac{1}{3\omega_1 \mathbf{C}} = -j \frac{1}{3} 30 = -j10 \text{ Ом,}$$

$$\frac{1}{\underline{Z}_{ab(3)}} = \frac{1}{5 + j36} + \frac{1}{20} + \frac{1}{-j10} = (53,77 + j72,8) \cdot 10^{-3} \text{ См,}$$

$$\underline{Z}_{ab(3)} = \frac{1}{(53,77 - j72,8) \cdot 10^{-3}} = 11,05 \cdot e^{-j53^{\circ}35'} = (6,56 - j8,9) \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}_{\text{экв}(3)} = \underline{Z}_{1(3)} + \underline{Z}_{ab(3)} = 12,56 - j8,9 = 15,35 e^{-j35^{\circ}5'} \text{ Ом,}$$

$$\underline{I}_{1m(3)} = \frac{40 e^{j20^\circ}}{15,35 e^{-j35^\circ 5'}} = 2,6 e^{j55^\circ 5'} \text{ A,}$$

$$\underline{U}_{abm(3)} = 2,6 e^{j55^\circ 5'} \cdot 11,05 e^{-j53^\circ 35'} = 28,7 e^{j1^\circ 30'} \text{ B,}$$

$$\underline{I}_{2m(3)} = \frac{\underline{U}_{abm(3)}}{\underline{Z}_{2(3)}} = 0,79 e^{-j80^\circ 40'} \text{ A,}$$

$$\underline{I}_{3m(3)} = \frac{\underline{U}_{abm(3)}}{\underline{Z}_{3(3)}} = 1,44 e^{j1^\circ 30'} \text{ A,}$$

$$\underline{I}_{4m(3)} = \frac{\underline{U}_{abm(3)}}{\underline{Z}_{4(3)}} = 2,87 e^{j31^\circ 30'} \text{ A.}$$

Уравнение тока в неразветвлённой части цепи имеет вид

$$i_1 = [3 + 5,88 \sin(\omega_1 t - 16^\circ 30') + 2,6 \sin(3\omega_1 t + 55^\circ 5')] \text{ A.}$$

Действующее значение каждого тока определяется по формуле:

$$I_1 = \sqrt{3^2 + \frac{5,88^2 + 2,6^2}{2}} = 5,45 \text{ A,}$$

$$I_2 = \sqrt{2,4^2 + \frac{5,15^2 + 0,79^2}{2}} = 4,4 \text{ A,}$$

$$I_3 = \sqrt{0,6^2 + \frac{3,52^2 + 1,44^2}{2}} = 2,64 \text{ A,}$$

$$I_4 = \sqrt{\frac{2,23^2 + 2,87^2}{2}} = 2,57 \text{ A.}$$

Мощность, потребляемую цепью, определим по формуле

$$\begin{aligned} P &= U_{(0)} I_{1(0)} + \frac{1}{2} U_{m(1)} I_{1m(1)} \cos 16^\circ 30' + \frac{1}{2} U_{m(3)} I_{1m(3)} \cos 35^\circ 5' = \\ &= 30 \cdot 3 + \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 5,88 \cos 16^\circ 30' + \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 2,6 \cos 35^\circ 5' = 415 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

3.3.3 Для уменьшения пульсаций напряжения на нагрузке R_H , подключённой к однополупериодному выпрямителю, применён Г-образный RC-фильтр, схема которого изображена на рис. 3.3.

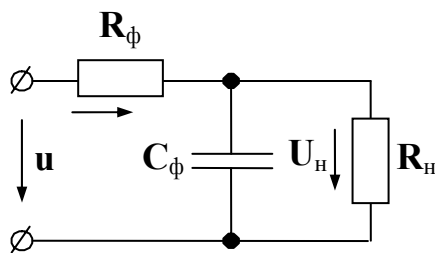


Рис. 3.3

Определить коэффициенты пульсаций S_u и S_n для напряжения питания и напряжения на нагрузке, если параметры фильтра $R_\phi = 1$ кОм, $C_\phi = 10$ мкФ, а сопротивление нагрузки $R_n = 10$ кОм. Напряжение на выходе выпрямителя задано уравнением

$$u = (70 + 60 \sin \omega t) \text{ В.}$$

Коэффициент пульсаций для напряжения питания

$$S_u = \frac{U_{(1)m}}{U} = \frac{60}{70} = 0,857.$$

Чтобы определить коэффициент пульсаций для напряжения на нагрузке, проведём расчёт схемы от постоянной составляющей и основной гармонике напряжения.

Постоянная составляющая напряжения на нагрузке

$$U_{n(0)} = \frac{R_n U_{(0)}}{R_\phi + R_n} = \frac{10000 \cdot 70}{11000} = 63,6 \text{ В.}$$

Основная гармоника напряжения на нагрузке

$$U_{nm(1)} = \frac{U_{m(1)}}{Z_{(1)}} Z_{p(1)},$$

где $Z_{(1)}$ - входное сопротивление схемы (рис. 3.3) по первой гармонике;

$Z_{p(1)}$ - сопротивление разветвления от первой гармонике.

Для определения величин $Z_{(1)}$ и $Z_{p(1)}$ воспользуемся комплексными сопротивлениями

$$\underline{Z}_{p(1)} = \frac{R_H \left(-j \frac{1}{\omega C_\Phi} \right)}{R_H - j \frac{1}{\omega C_\Phi}} = \frac{10000(-j318)}{10000 - j318} = (10,1 - j318) \text{ Ом},$$

$$Z_{p(1)} = 318 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{(1)} = R_\Phi + \underline{Z}_{p(1)} = (1010,1 - j318) \text{ Ом},$$

$$Z_{(1)} = 1060 \text{ Ом}.$$

Амплитуда основной гармоники напряжения нагрузки

$$U_{nm(1)} = \frac{U_{m(1)} Z_{p(1)}}{Z_{(1)}} = \frac{60 \cdot 318}{1060} = 18,06 \text{ В}.$$

Коэффициент пульсаций для напряжения на нагрузке

$$S_H = \frac{U_{nm(1)}}{U_{H(0)}} = \frac{18,06}{63,6} = 0,284.$$

3.3.4 Для выделения на нагрузке R_H второй гармоники приложенного напряжения применён фильтр, схема которого изображена на рис. 3.4.

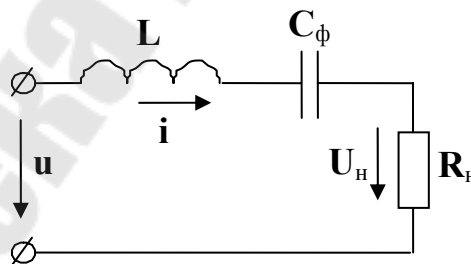


Рис. 3.4

Определить отношение действующего значения напряжения второй гармоники к действующему значению напряжения источника питания и напряжение на нагрузке, если $R_H = 500 \text{ Ом}$, $C_\Phi = 0,001 \text{ мкФ}$, $L_\Phi = 63,4 \text{ мГн}$, $f = 10 \text{ кГц}$, а приложенное напряжение задано уравнением

$$u = 10,5 \sin \omega t + 4,7 \sin 2 \omega t + 1,1 \sin 3 \omega t.$$

Определим действующее значение напряжения источника питания

$$U = \sqrt{U_{(1)}^2 + U_{(2)}^2 + U_{(3)}^2} = \sqrt{\frac{10,5^2 + 4,7^2 + 1,1^2}{2}} = 8,2 \text{ В.}$$

Отношение действующего напряжения второй гармоники к действующему значению напряжения источника питания

$$\frac{U_{(2)}}{U} = \frac{4,7}{\sqrt{2} \cdot 8,2} = 0,407.$$

Первая гармоника напряжения на нагрузке

$$U_{н(1)} = \frac{U_{(1)}}{Z_{(1)}} R_n = \frac{10,5 \cdot 500}{\sqrt{2} \cdot 11940} = 0,313 \text{ В,}$$

где $Z_{(1)} = \sqrt{R_n^2 + (X_{L(1)} - X_{C(1)})^2} = 11940 \text{ Ом.}$

В свою очередь

$$X_{L(1)} = 2 \pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 63,4 \cdot 10^{-3} = 3980 \text{ Ом,}$$

$$X_{C(1)} = \frac{1}{2 \pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,001 \cdot 10^{-6}} = 15920 \text{ Ом.}$$

Вторая гармоника напряжения на нагрузке

$$U_{н(2)} = \frac{U_{(2)}}{Z_{(2)}} R_n,$$

где $Z_{(2)} = \sqrt{R_n^2 + (X_{L(2)} - X_{C(2)})^2} = R_n = 500 \text{ Ом,}$

$$X_{L(2)} = 2 \pi \cdot 2 f L = 2 \cdot X_{L(1)} = 7960 \text{ Ом,}$$

$$X_{C(2)} = \frac{1}{2 \pi \cdot 2 f C} = \frac{X_{C(1)}}{2} = 7960 \text{ Ом.}$$

Как видно $X_{L(2)} = X_{C(2)}$, следовательно, в схеме (рис. 3.4) на частоте 20 кГц возникает резонанс напряжений, поэтому

$$U_{н(2)} = U_{(2)} \frac{R_H}{Z_{(2)}} = U_{(2)} = \frac{4,7}{\sqrt{2}} = 3,33 \text{ В.}$$

Третья гармоника напряжения на нагрузке

$$U_{н(3)} = \frac{U_{(3)}}{Z_{(3)}} R_H,$$

где $Z_{(3)} = \sqrt{R_H^2 + (X_{L(3)} - X_{C(3)})^2} = 6650 \text{ Ом,}$

$$X_{L(3)} = 2\pi \cdot 3f L = 3 \cdot X_{L(1)} = 11940 \text{ Ом,}$$

$$X_{C(3)} = \frac{1}{2\pi \cdot 3f C} = \frac{X_{C(1)}}{3} = 5307 \text{ Ом.}$$

С учётом вышеприведённого,

$$U_{н(3)} = 0,0587 \text{ В.}$$

Действующее значение напряжения в нагрузке

$$U_H = \sqrt{U_{н(1)}^2 + U_{н(2)}^2 + U_{н(3)}^2} = 3,34 \text{ В.}$$

Отношение действующего значения напряжения второй гармоники к действующему напряжению в нагрузке

$$\frac{U_{н(2)}}{U_H} = \frac{3,33}{3,34} = 0,997.$$

Следовательно, схема фильтра (рис. 3.4) обладает избирательными свойствами: на нагрузке выделяется только вторая гармоника приложенного напряжения.

3.4 Варианты задач для самостоятельного решения

3.4.1 На рис. 3.5 изображена схема электрической цепи, параметры которой приведены в табл. 3.1. Выражение мгновенного значения приложенного к цепи напряжения приведено в табл. 3.2. Основная частота напряжения источника питания $f = 50 \text{ Гц}$.

Необходимо:

1. Записать уравнения мгновенных значений токов в ветвях схемы.
2. Определить действующее значение каждого тока.
3. Вычислить активную мощность, потребляемую элементами цепи.

Таблица 3.1

| Вариант | $R1,$ Ом | $R2,$ Ом | $R3,$ Ом | $L1,$ мГн | $L2,$ мГн | $L3,$ мГн | $C1,$ мкФ | $C2,$ мкФ | $C3,$ мкФ |
|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0 | 100 | 90 | 80 | 15 | 65 | 115 | 1000 | 120 | 150 |
| 1 | 90 | 80 | 70 | 20 | 70 | 120 | 900 | 90 | 250 |
| 2 | 80 | 70 | 60 | 25 | 75 | 125 | 800 | 95 | 350 |
| 3 | 70 | 60 | 50 | 30 | 80 | 130 | 700 | 80 | 450 |
| 4 | 60 | 50 | 40 | 35 | 85 | 135 | 600 | 85 | 550 |
| 5 | 50 | 40 | 30 | 40 | 90 | 140 | 500 | 70 | 650 |
| 6 | 40 | 30 | 20 | 45 | 95 | 145 | 400 | 75 | 750 |
| 7 | 30 | 20 | 10 | 50 | 100 | 150 | 300 | 60 | 850 |
| 8 | 20 | 10 | 100 | 55 | 105 | 10 | 200 | 65 | 950 |
| 9 | 10 | 100 | 90 | 60 | 110 | 15 | 100 | 50 | 1050 |

Таблица 3.2

| Вариант | Мгновенное значение напряжения источника питания, В |
|---------|--|
| 1 | $u = 100 + 157 \cos \omega t + 66,7 \cos 2\omega t$ |
| 2 | $u = 200 + 133,3 \cos 2\omega t - 26,7 \cos 4\omega t$ |
| 3 | $u = 259 + 64,9 \cos 3\omega t - 14,8 \cos 6\omega t$ |
| 4 | $u = 300 + 17,1 \cos 6\omega t - 4,19 \cos 12\omega t$ |

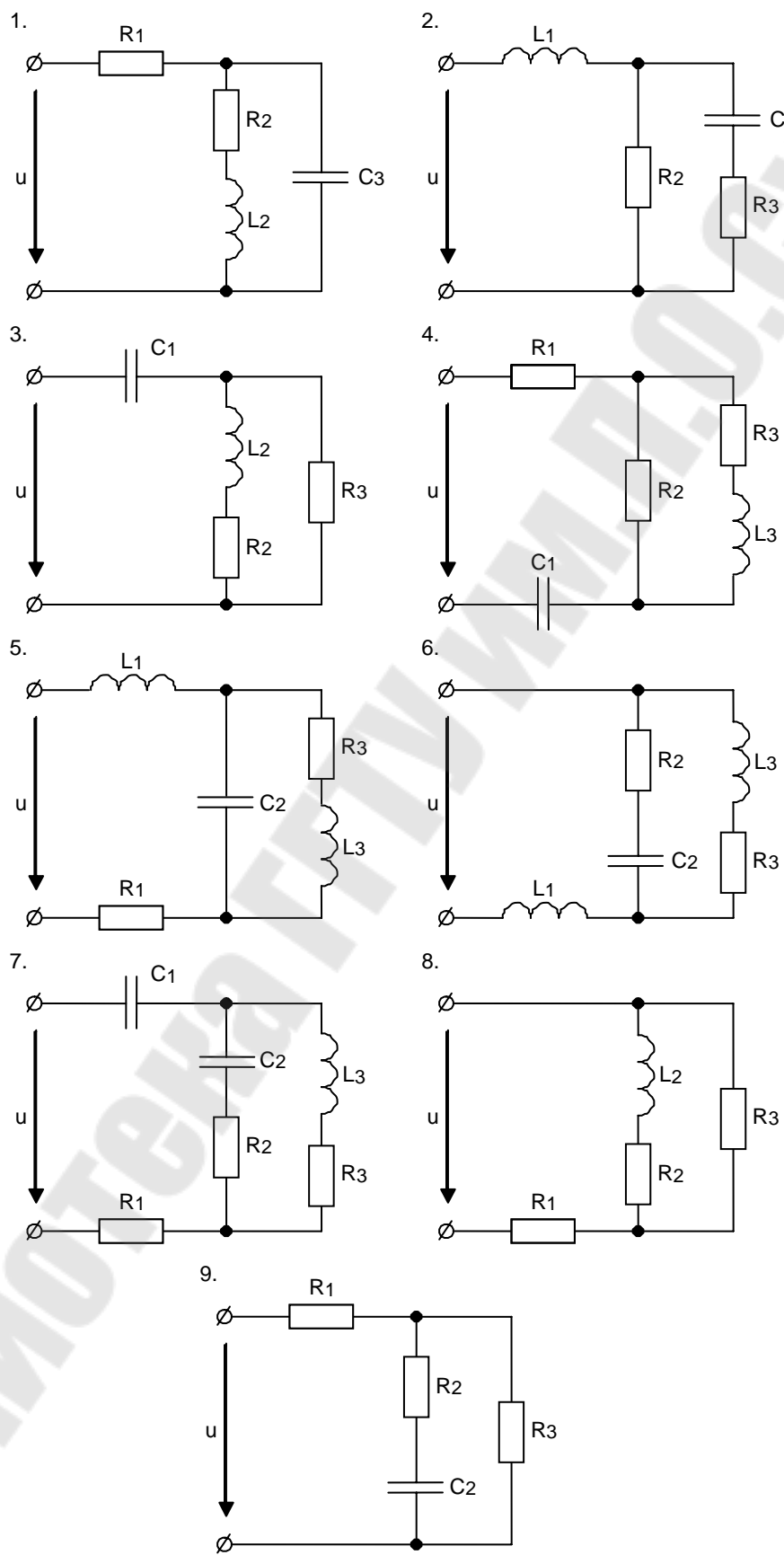


Рис. 3.5

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехника: Учебник для неэлектротехнических спец. вузов / Под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.
2. Сборник задач по общей электротехнике. Под ред. В. С. Пантюшина. М., “Высш. школа” 1973. 280 с.
3. Волынский Б. А. и др. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1987.
1. Электротехника / Под ред. проф. В. С. Пантюшина. М.: Высшая школа, 1976.
2. Шebes М. Р. Теория линейных электрических цепей в упражнения и задачах. Учебное пособие для электротехнич. и радиотехнич. специальностей вузов. М., “Высшая школа”, 1973.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Практикум

**по курсу «Электротехника и электроника»
для студентов специальностей
1-36 01 01 «Технология машиностроения»,
1-36 01 03 «Технологическое оборудование
машиностроительного производства»,
1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика»
дневной и заочной форм обучения**

Авторы-составители: **Вершинин** Андрей Николаевич
Грачев Станислав Анатольевич

Подписано в печать 09.11.06.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Ризография. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 2,25.

Изд. № 106.

E-mail: ic@gstu.gomel.by

<http://www.gstu.gomel.by>

Отпечатано с макета оригинала авторского для внутреннего использования.

Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого».

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.