МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

Прикладные вопросы электротехники

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Зерноград

2024 г.

Об издании – *1*
Содержание

УДК 621.3

Прикладные вопросы электротехники [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие по выполнению расчетно-графической работы по дисциплине для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / Сост. О.Б. Забродина, О.В. Кобзистый. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024. – 53 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Утверждено методической комиссией по направлениям подготовки 13.03.02 и 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рецензент: к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Эксплуатация энергетического оборудования и электрические машины» Гуляев П.В..

© Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ.....4
2 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ 6
2.1 Основные понятия 6
2.2 Симметричный режим работы трёхфазной сети.....8
2.3 Несимметричные режимы трёхфазных цепей.....11
2.4 Метод симметричных составляющих 15
3 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ.....28
4 ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ
«НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ» 36
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 53

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Дисциплина «Прикладные вопросы электротехники» (ПВЭ) является одной из основных дисциплин в системе обще профессиональной подготовки студентов. Содержание её основывается на знаниях, полученных студентами в результате изучения высшей математики, физики, теоретических основ электротехники. Целью дисциплины является расширение знаний, умений и навыков студентов в области применения теоретических знаний к решению прикладных задач электроэнергетики, знакомства с методами расчета, используемыми в электроэнергетике, в частности с методом симметричных составляющих, а также с особенностями расчета нелинейных цепей, широко распространенных в современной электротехнике.

Важная роль при изучении дисциплины отводится самостоятельной работе, одним из видов которой является выполнение расчетно-графической работы. Помощь в организации данного вида обучения и должно оказывать данное учебно-методическое пособие.

Настоящее учебно-методическое пособие содержит комментарии к выполнению работы, пример решения. В конце пособия приведены варианты заданий расчетной работы.

К выполнению расчетной работы следует приступать только после изучения теоретического материала по соответствующему разделу, изложенному в учебниках, приведенных в списке рекомендуемой литературы, полезно также просмотреть задачники, в которых приводится решение подобных задач, а также настоящее учебно-методическое пособие.

Решение должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями. При необходимых преобразованиях следует вычертить все промежуточные схемы.

Расчетная работа выполняется на листах формата А4, страница текстом заполняется только с одной стороны. Текст, формулы и числовые выкладки должны

быть написаны четко и аккуратно, обозначения в схемах и по ходу изложения соответствовать ГОСТам, а все величины выражаться в единицах СИ. Схемы, векторные диаграммы и графики вычерчиваться с помощью графических редакторов по выбору студента.

При решении задачи разными методами все напряжения и токи должны сохранять свои буквенные обозначения и направления. Расчеты производить до третьей значащей цифры.

В конце работы следует расписаться, поставить дату, указать используемую литературу.

Каждый студент получает задание по расчетной работе. Сдавая на кафедру работу, студент обязан на первой странице привести индивидуальное задание с указанием его номера. Расчетные работы, выполненные не по своему заданию, не зачитываются, а студенту выдается новое задание.

Если работа не зачтена, то студент все исправления выполняет в той же работе на оборотной стороне листов бумаги формата А4 или добавляет необходимое число листов. Какие-либо исправления в тексте, уже проверенном преподавателем, не допускаются.

Работы, выполненные с нарушением этих правил, не зачитываются, как и работы, содержащие серьезные ошибки.

2 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1 Основные понятия

Трёхфазной системой переменного тока называется совокупность трёх электрических цепей, в которых действуют ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе и создаваемые общим источником энергии. Три ЭДС трёхфазного генератора отличаются друг от друга только начальной фазой. Термин «фаза» имеет двоякий смысл: 1) фазой называется аргумент синусоидальной функции; 2) в трёхфазной системе фазой называют также конструктивную часть оборудования или часть этой системы. Например, выключатель фазы А, или ЭДС фазы А генератора.

Синхронные генераторы конструируют так, чтобы форма кривой ЭДС была как можно ближе к синусоидальной, а сумма мгновенных значений ЭДС в любой момент времени равнялась нулю. Это условие выполняется, если три обмотки генератора, в которых наводятся ЭДС, расположены под углом 120^0. Эти обмотки (фазы) обозначают буквами А, В и С. Если $e_A = E_m \sin \omega t$, то $e_B = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$, а $e_C = E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$. На векторной диаграмме эти три ЭДС изображаются тремя векторами, расположенными под 120^0 друг относительно друга, причём $\underline{E}_B$ отстаёт от $\underline{E}_A$, а $\underline{E}_C$ от $\underline{E}_B$. В этом случае получается прямой порядок чередования фаз.

Если же почему-то окажется, что $\underline{E}_B$ опережает $\underline{E}_A$, а $\underline{E}_C$ отстаёт от него, то получится обратный порядок чередования фаз. Как правило, применяется прямой порядок чередования фаз.

Обмотки трёхфазных машин и трансформаторов могут быть соединены или в треугольник, или в звезду. Если генератор и потребитель соединены в звезду и их узловые (нейтральные) точки соединены, то получается четырёхпроводная трёхфазная система. В других случаях система получается трёхпроводной.

Ток в каждой фазе генератора или потребителя называется фазным током, а ток в проводах линии электропередачи – линейным током. При соединении в звезду фазный ток равен линейному. В четвёртом (нулевом) проводе (если он есть) проходит геометрическая сумма линейных токов (рисунок 1).

$\underline{I}_N = \underline{I'}_a + \underline{I'}_в + \underline{I'}_c$, или $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$.

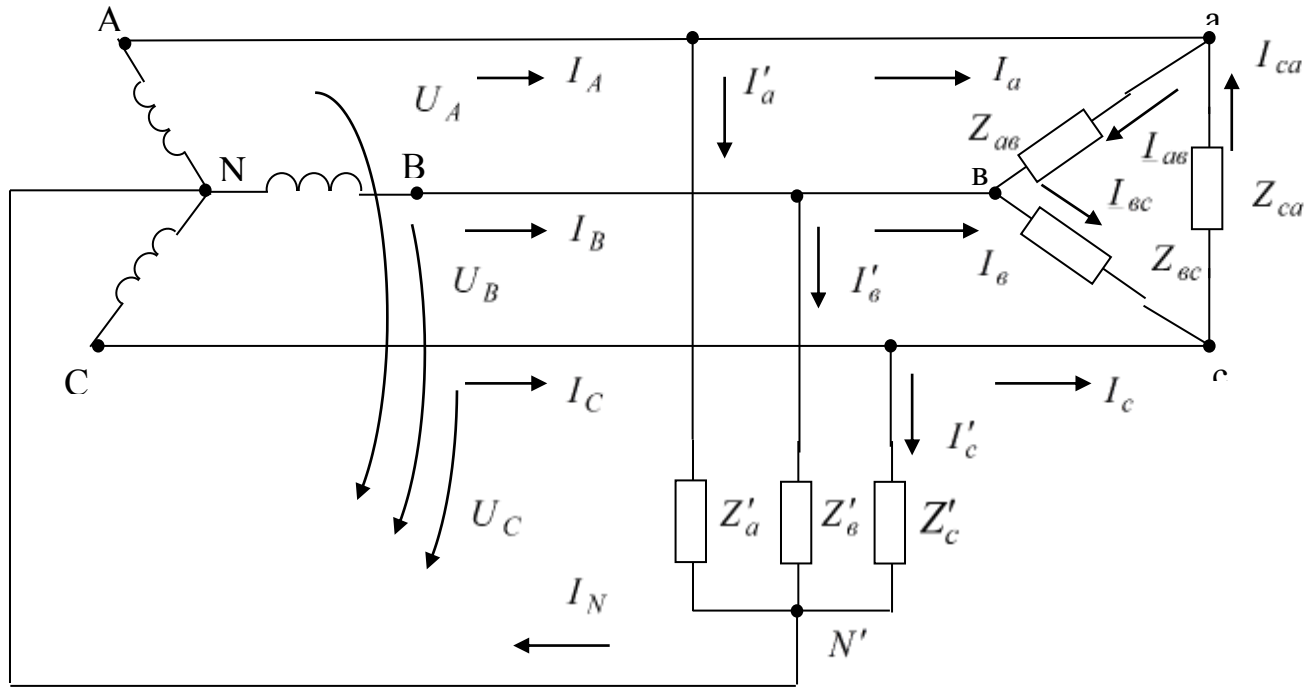


Рисунок 1 – Трёхфазная четырёхпроводная цепь

На рисунке 1 I_A, I_B, I_C - фазные токи генератора, они же линейные токи. I'_a, $I'_в$, I'_c - фазные (и линейные) токи трёхфазного потребителя Z'_a, $Z'_в$, Z'_c. $I_{ав}$, $I_{вс}$, $I_{са}$ - фазные токи потребителей $Z_{ав}$, $Z_{вс}$, $Z_{са}$, а I_a, $I_в$, I_c - их линейные токи.

Напряжение на фазе генератора или потребителя называется фазным напряжением, а между фазами (т.е. между линейными проводами) - линейным (т.е. междуфазным). На рисунке 1 U_A, U_B, U_C - фазные напряжения генератора, а U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} - линейные. Для потребителей $Z_{ав}$, $Z_{вс}$, $Z_{са}$ напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} являются и фазными, и линейными.

2.2 Симметричный режим работы трёхфазной сети

Трёхфазная сеть называется симметричной, если комплексные сопротивления каждой фазы одинаковы. Обычно источниками электроэнергии являются мощные генераторы, у которых сопротивление обмоток очень малы. Если ими можно пренебречь, то напряжение на зажимах генератора равно ЭДС. В этом случае генератор на схеме не показывают и считают напряжение в начале линии неизменным. Режим работы трёхфазной цепи называется симметричным, если сама цепь симметрична и к ней приложена симметричная система напряжений. Например, если нагрузка соединена звездой (рисунок 2), фазные напряжения по модулю равны и сдвинуты по фазе на 120^0, то есть $U_A = U_B = U_C = U_\phi$ и $\underline{U}_B = \underline{U}_A \cdot e^{-j120^0}$, $\underline{U}_C = \underline{U}_A \cdot e^{j120^0}$, а $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$, то имеет место симметричный режим работы цепи.

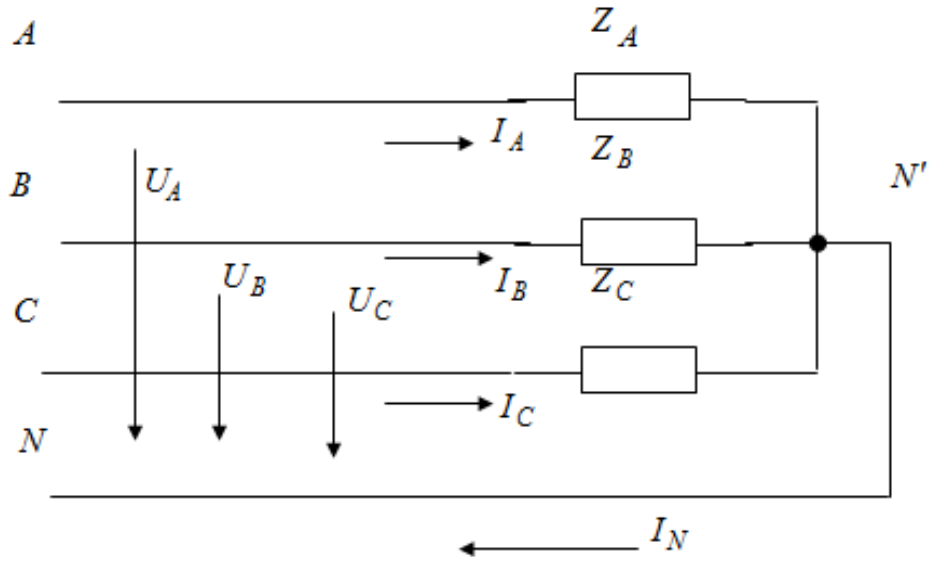


Рисунок 2 – Соединение нагрузки звездой с нулевым проводом

По закону Ома ток в фазе равен: $\underline{I}_A = \dfrac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A}$. Так как напряжения симметричны, то и токи образуют симметричную систему (рисунок 3).

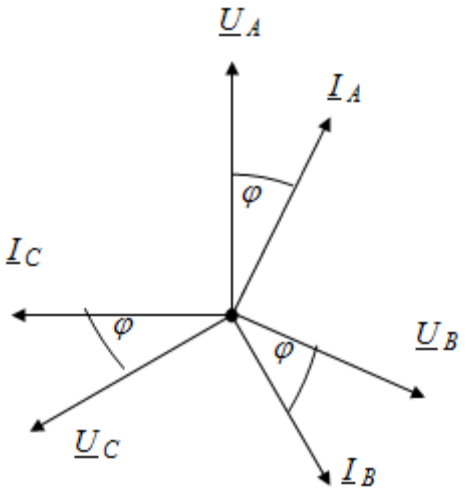


Рисунок 3 – Векторная диаграмма напряжений и токов симметричной цепи

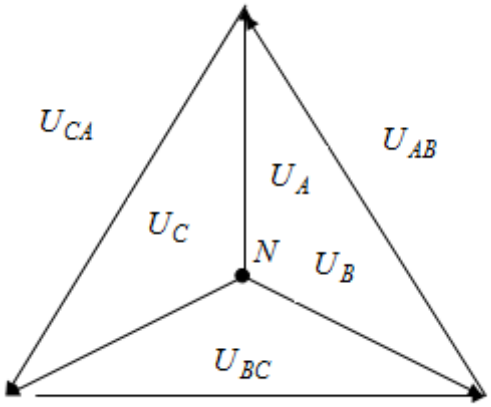


Рисунок 4 – Векторная диаграмма напряжений

Ток в нулевом проводе

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_A \cdot \left(1 + e^{-j120^0} + e^{j120^0}\right) = 0$$

Так как $\underline{I}_N = 0$, сечение нулевого провода часто выбирают меньше, чем сечение линейных проводов, или применяют трёхпроводную систему (без нулевого провода). Из второго закона Кирхгофа следует, что линейные напряжения также равны векторной разности фазных напряжений:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B;$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C;$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Для симметричной системы $U_A = U_B = U_C = U_\phi$; $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_Л$.

Поэтому $U_Л = \sqrt{3} \cdot U_\phi$, (см. векторную диаграмму, рисунок 4).

Так как векторы линейных напряжений всегда образуют замкнутый треугольник, то $\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0$, то если нагрузка соединена в треугольник (рисунок 5), то $U_Л = U_\phi$, и при построении векторной диаграммы напряжений и

токов векторы напряжений лучше строить из начала координат (рисунок 6). Но в этом случае диаграмма напряжений уже не будет топографической.

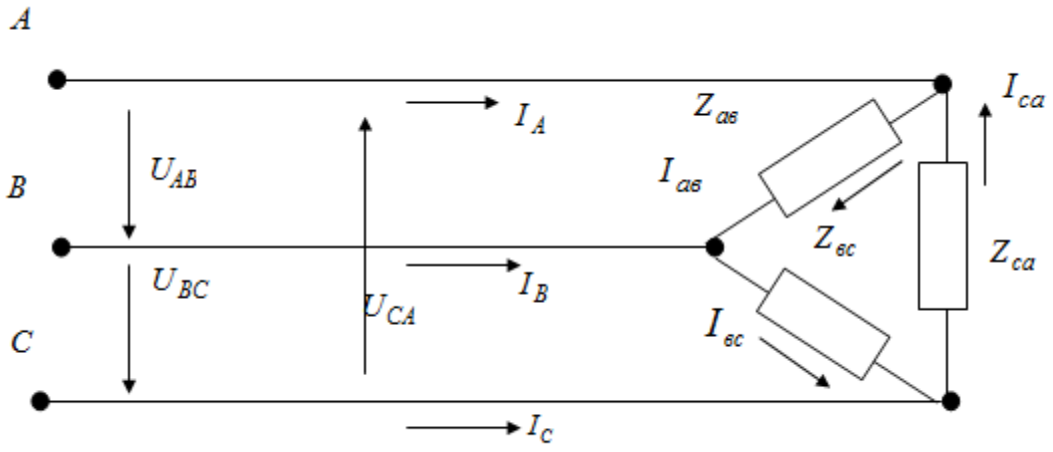


Рисунок 5 – Соединение нагрузки треугольником

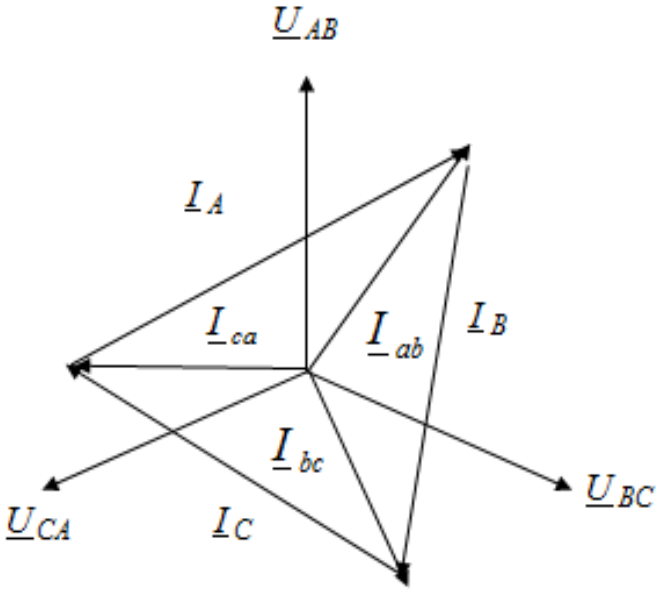


Рисунок 6 – Векторная диаграмма токов и напряжений к рисунку 5

Для симметричной цепи модули всех фазных токов равны

$$I_{ав} = I_{вс} = I_{са} = \frac{U_ф}{Z},$$

и всех линейных токов равны, т.е.

$$I_A = I_B = I_C = I_Л .$$

Из векторной диаграммы рисунок 6 следует, что $I_л = \sqrt{3} \cdot I_ф$.

Мощность симметричной трёхфазной цепи:

$$P = P_A + P_B + P_C = 3 \quad P_ф = 3 \cdot U_ф \cdot I_ф \cdot \cos\varphi .$$

При соединении звездой $U_л = \sqrt{3} \cdot U_ф ; \quad I_л = I_ф$, поэтому

$$P = 3 \cdot \frac{U_л}{\sqrt{3}} \cdot I_л \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_л \cdot I_л \cdot \cos\varphi .$$

При соединении треугольником $U_ф = U_л ; \; I_л = \sqrt{3} \cdot I_ф .$

$$P = \cdot 3 \cdot U_л \cdot \frac{I_л}{\sqrt{3}} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_л \cdot I_л \cdot \cos\varphi .$$

Аналогично $Q = \sqrt{3} \cdot U_л \cdot I_л \cdot \sin\varphi ; \; S = \sqrt{3} \cdot U_л \cdot I_л \cdot \cos\varphi .$

Следовательно, для определения мощности, отдаваемой генератором потребителям, не обязательно знать схемы соединения фаз приемника.

2.3 Несимметричные режимы трёхфазных цепей

Несимметрия в трёхфазной цепи может быть вызвана несимметричностью нагрузки или несимметрией питающих напряжений. Несимметричные короткие замыкания также можно рассматривать как несимметричную нагрузку. Расчёт токов и напряжений при несимметричном режиме может производиться теми же методами, что и расчёт однофазных цепей. В большинстве случаев самым рациональным оказывается метод двух узлов и, при необходимости, преобразование схемы. Если имеется динамическая нагрузка, то следует применять метод симметричных составляющих, который рассмотрен ниже (см. раздел 3).

Для примера рассмотрим несимметричную четырёхпроводную цепь, показанную на рис. 7.

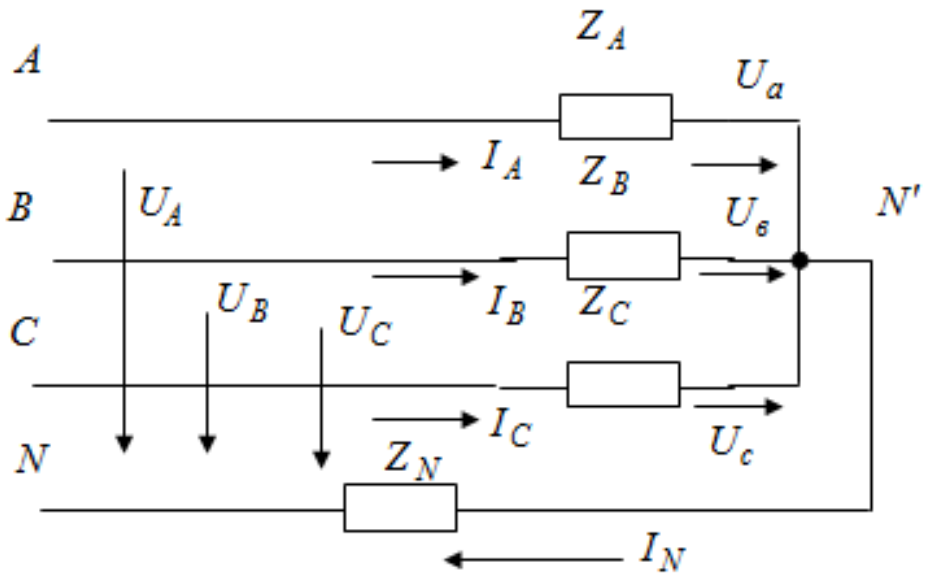


Рисунок 7 – К расчёту цепи методом двух узлов

Предположим известны: $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$, $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$, $\underline{Z}_C$, $\underline{Z}_N$, а надо определить токи и фазные напряжения. на участках цепи. Для решения применим метод двух узлов. Один узел – точка N', а второй – точка N у генератора, который на схеме не показан

Напряжение $N_{N'N}$ называют ***напряжением смещения нейтрали***.

Так как точка N часто бывает заземлена и её потенциал принимается равным нулю (нейтральная точка).

$$\underline{U}_{N'N} = \frac{\sum \underline{U}_k \cdot \underline{Y}_k}{\sum Y_k} = \frac{\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{U}_C \cdot Y_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N},$$

где $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$ - проводимость ветви.

Напряжения на фазах приемника (фазные):

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{N'N};\ \underline{U}_в = \underline{U}_B - \underline{U}_{N'N};\ \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{N'N}.$$

Фазные токи: $$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a};\ \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_в}{\underline{Z}_в};\ \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c}.$$

Ток в нулевом проводе $$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{N'N}}{\underline{Z}_N}.$$

Если $\underline{Z}_N = 0$, то $\underline{U}_{N'N} = 0$ и расчёты упрощаются.

Если $Z_N = \infty$, т.е. нулевого провода нет (или обрыв нулевого провода), то схема становится трёхпроводной. Векторная диаграмма напряжений может иметь примерно такой вид (рисунок 8):

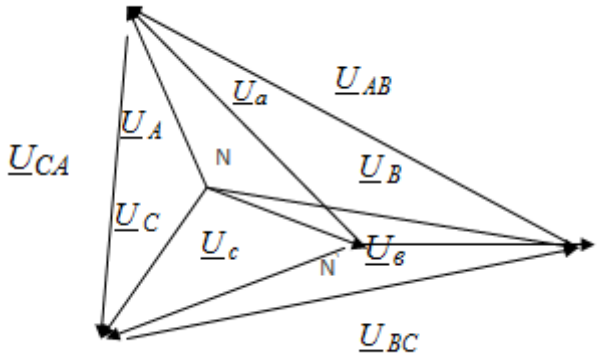


Рисунок 8 – Векторная диаграмма напряжений несимметричной цепи

Если расчёты выполняются для действующей электроустановки, то напряжения $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ (или $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$) необходимо определить по результатам измерений. Для этого измеряют все три линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} и все три фазные напряжения - U_A, U_B, U_C. Затем строят (лучше в масштабе) треугольник линейных напряжений (с помощью засечек) и векторы фазных напряжений.

Используя формулы тригонометрии (например, теорему косинусов), вычисляют необходимые углы.

При точном построении те же углы можно измерить (рис. 9). $\underline{U}_A = U_A e^{j\psi_A}$. На рисунке 9 $\psi_A < 0$ и $\psi_B < 0$, а $\psi_{AB} = 0$.

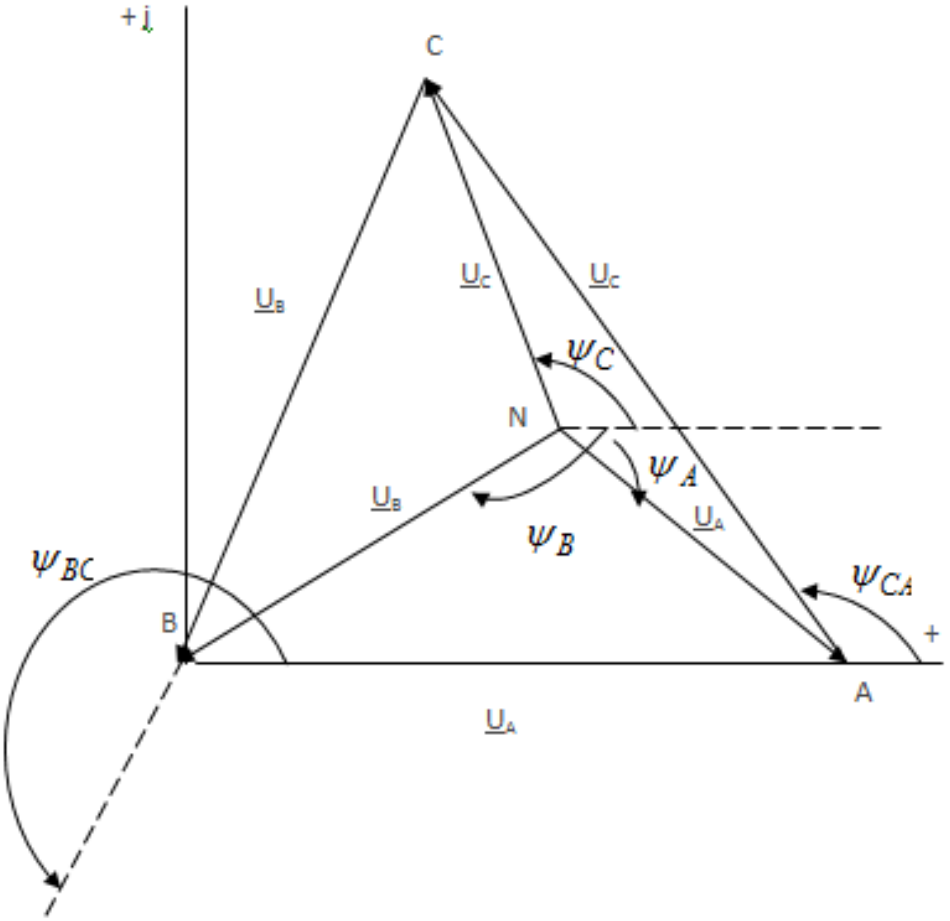


Рисунок 9 – Треугольник линейных напряжений

Мощность несимметричной трёхфазной системы можно вычислить как сумму мощностей, отдаваемых генератором, или как сумму потребляемых мощностей.

Для генератора:

$$\tilde{S} = \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + \tilde{S}_C = \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C^* + \underline{U}_{N'N} \cdot I^*_N = P + jQ,$$

где $P = P_A + P_B + P_C$ - активная мощность;

$Q = Q_A + Q_B + Q_C$ - реактивная мощность.

При расчетах в формулу подставляют сопряженные комплексы токов.

Для приемника :

$$\tilde{S} = \tilde{S}_a + \tilde{S}_в + \tilde{S}_c + S_N = \underline{U}_a \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_в \cdot \underline{I}_B^* + \underline{U}_c \cdot I_N^* + \underline{U}_{N'N} \cdot I_N^* = P + jQ.$$

В конце расчётов полезно выполнить проверку. Например,

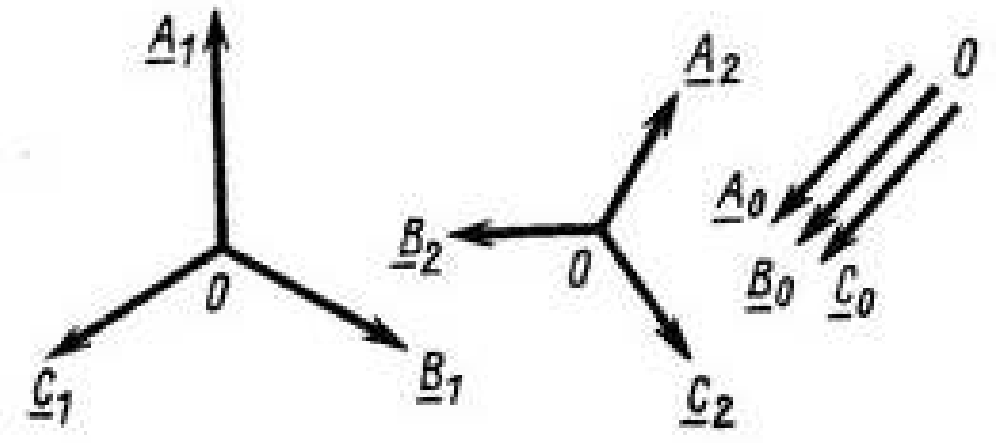
$$P = \sum I^2 \cdot R = I_A^2 \cdot R_A + I_B^2 \cdot R_B + I_C^2 \cdot R_C + I_N^2 \cdot R_N \,.$$

2.4 Метод симметричных составляющих

2.4.1 Симметричные составляющие трёхфазной системы векторов

Любую несимметричную систему трёх векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$ (токов, напряжений, магнитных потоков и др.) одинаковой частоты можно однозначно представить в виде суммы трёх систем: нулевой, прямой и обратной последовательностей.

Система прямой последовательности (рис. 10, а) состоит из



а) б) в)

Рисунок 10 – Симметричные составляющие трёхфазной системы векторов

трёх векторов: $\underline{A}_1$, $\underline{B}_1$, и $\underline{C}_1$, равных по величине и повёрнутых относительно друг друга на 120^0, причём $\underline{B}_1$ отстаёт от $\underline{A}_1$, а $\underline{C}_1$ опережает $\underline{A}_1$

Система обратной последовательности (рис.10, б) также состоит из трёх векторов, но $\underline{B}_2 = A_2 \cdot e^{j120^0}$, а $\underline{C}_2 = A_2 \cdot e^{-j120^0}$.

Система нулевой последовательности (рис. 10, в):

$$\underline{A}_0 = \underline{B}_0 = \underline{C}_0 .$$

Введём понятие «фазный множитель» и обозначим его буквой a. $a = e^{j120^0}$. Тогда $a^2 = e^{j240^0} = e^{-j120^0}$; $a^3 = e^{j360^0} = 1$; $a^4 = a^3 \cdot a = a$; $1 + a + a^2 = 0$.

Фазу А обычно принимают за основную и индекс не пишут (опускают), а симметричные составляющие фаз B и C выражают через фазу A. поэтому $\underline{B}_1 = a^2 \cdot \underline{A}_1$; $\underline{C}_1 = a \cdot \underline{A}_1$, $\underline{B}_2 = a \cdot \underline{A}_2$; $\underline{C}_2 = a^2 \cdot \underline{A}_2$.

Каждый из векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$ и $\underline{C}$ равен сумме его симметричных составляющих, т.е. $\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0$; $\underline{B} = \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0$; $\underline{C} = \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0$, или:

$$\begin{cases} \underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{B} = a^2 \cdot A_1 + a \cdot A_2 + \underline{A}_0; \\ \underline{C} = a \cdot A_1 + a^2 \cdot A_2 + \underline{A}_0. \end{cases}$$

Решив эту систему относительно A_1, A_2, A_0, получим:

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{3} \cdot \left(A + a \cdot B + a^2 \cdot C\right); \qquad (1)$$

$$\underline{A}_2 = \frac{1}{3} \cdot \left(A + a^2 \cdot B + a \cdot C\right); \qquad (2)$$

$$\underline{A}_0 = \frac{1}{3} \cdot \left(A + B + C\right). \qquad (3).$$

Расчёт методом симметричных составляющих производят в следующем порядке:

1) Несимметричную систему представляют как сумму трёх симметричных систем, используя формулы (1), (2), (3).

2) Делают расчёты для одной фазы (фазы А) для каждой системы.

3) Суммируя результаты, получают действительные значения искомых величин.

2.4.2 Сопротивления элементов электрической цепи для токов различных последовательностей.

Обозначим $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$; $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$; $\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$ - сопротивления токам прямой, обратной и нулевой последовательности. Кроме того, все элементы цепи разделим на статические (трансформаторы, нагревательные приборы и др.) и динамические (электрические машины).

Для статических элементов $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$, но $Z_0 \neq \underline{Z}_1$.

Например, для линии электропередачи активное сопротивление R_1 зависит только от материала провода, его длины и сечения. Реактивное сопротивление X_1 (индуктивное) зависит от ЭДС самоиндукции, наводимыми переменными магнитными потоками, а эта ЭДС зависит не только от размеров провода, но и от размеров контура, пересекаемого магнитными потоками (в основном от расстояния между линейными проводами, подробнее см. курс ТОЭ). От порядка чередования фаз ни активные, ни реактивные сопротивления не зависят.

Токи нулевой последовательности равны по величине и по фазе, т.е. $\underline{I}_{AO} = \underline{I}_{BO} = \underline{I}_{CO}$, поэтому они могут замыкаться по нулевому проводу (если он есть) или через землю (если есть заземлённые точки). Поэтому $Z_0 \neq \underline{Z}_1$.

Для динамической нагрузки $\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_0$, причём $\underline{Z}_2 < \underline{Z}_1$. Это происходит потому, что во вращающихся машинах прямая система токов создаёт магнитное поле, вращающееся в одном направлении с ротором, а поле от токов обратной последовательности вращается в противоположную сторону.

2.4.3 Пример расчёта симметричной цепи с динамической нагрузкой при несимметричной системе приложенных напряжений.

Для схемы рис.11 дано: $U_{AB} = 400\,B$; $U_{BC} = 350\,B$; $U_{CA} = 420\,B$; $U_A = 270\,B$; $U_B 187\,B$; $U_C = 217\,B$.

Сопротивление линии: $\underline{Z}_{Л1} = \underline{Z}_{Л2} = 1{,}5 + j1{,}2$ Ом; $\underline{Z}_{Л0} = 1{,}5 + j3{,}0$ Ом.

Сопротивление конденсатора: $Z_C = -jX_C = -j70{,}7$ Ом.

Динамическая нагрузка: $\underline{Z}_1 = 30 + j30$ Ом; $\underline{Z}_2 = 20 + j10$ Ом;

$\underline{Z}_0 = j20$ Ом.

Сопротивление нулевого провода $\underline{Z}_N = 10$ Ом.

Определить все токи и напряжения U_a, $U_в$, U_c, $U_{ав}$, $U_{вс}$, $U_{са}$.

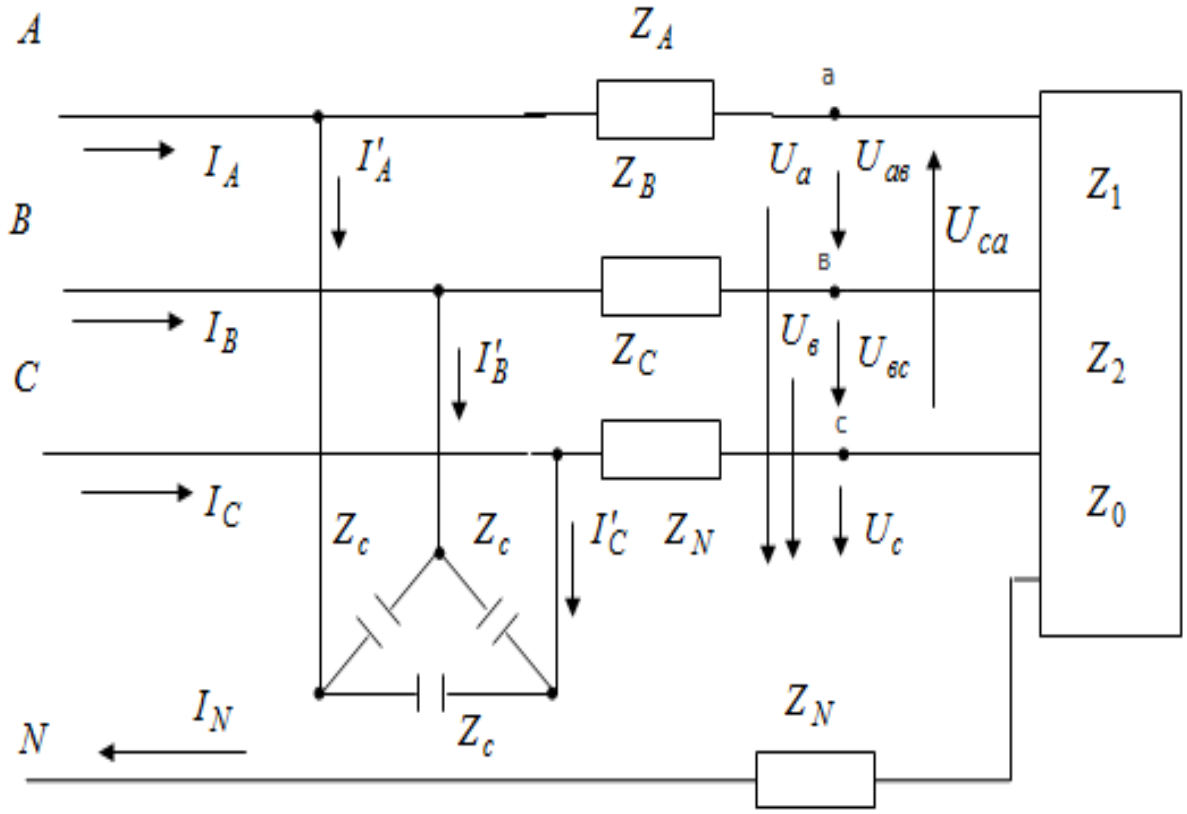


Рисунок 11 – Схема электрической цепи

Решение

Построим треугольник линейных напряжений U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} и определим все его углы (рис. 12). По теореме косинусов $BC^2 = AB^2 + CA^2 - 2 \cdot AB \cdot CA \cdot cos\alpha$, откуда

$$\alpha = arc\cos\frac{AB^2 + CA^2 - BC^2}{2 \cdot AB \cdot CA} = arc\cos\frac{400^2 + 420^2 - 350^2}{2 \cdot 400 \cdot 420} = 50{,}46^0.$$

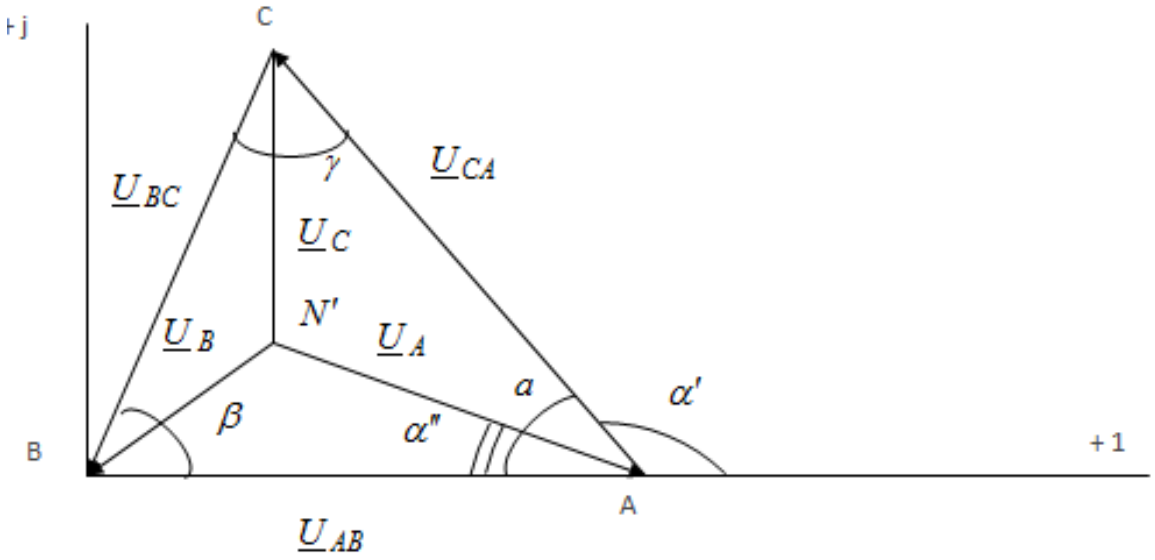


Рисунок 12 – К определению углов треугольника линейных напряжений

По теореме синусов: $\frac{BC}{\sin\alpha} = \frac{AC}{\sin\beta}$, откуда

$$\beta = arc\sin\frac{AC}{BC}\cdot\sin\alpha = arc\sin\cdot\frac{420}{350}\cdot\sin 50{,}46^0 = 67{,}73^0.$$

$$\gamma = 180^0 - \alpha - \beta = 180^0 - 50{,}46^0 - 67{,}73^0 = 61{,}81^0.$$

$$\alpha' = 180^0 - \alpha = 129{,}54^0;\ \beta' = 180^0 - \beta = 112{,}27^0.$$

Комплексы линейных напряжений:

$\underline{U}_{AB} = 400$ В; $\underline{U}_{BC} = 350e^{-j112{,}27^0}$ В; $\underline{U}_{CA} = 420e^{j129{,}54^0}$ В.

Чтобы определить комплексы $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ наметим ориентировочно точку N' внутри треугольника линейных напряжений и соединим её с вершинами треугольника. Тогда для $\Delta ABN'$ имеем $U_B^2 = U_A^2 + U_{AB}^2 - 2U_A\cdot U_{AB}\cdot\cos\alpha''$, откуда $\alpha'' = 23{,}6^0$. Следовательно, $\underline{U}_A = 270e^{-j23{,}6^0}$ В.

Аналогично $\underline{U}_B = 187e^{-j145{,}4^0}$ В, $\underline{U}_C = 217e^{j94{,}7^0}$ В.

Разложим фазные напряжения на симметричные составляющие $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}_0$

.

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}\cdot\left(\underline{U}_A + a\cdot\underline{U}_B + a^2\cdot\underline{U}_C\right) =$$

$$= \frac{1}{3}\cdot\left(270e^{-j23,6^0} + e^{j120^0}\cdot 187e^{-j145,4^0} + e^{-j120^0}\cdot 217e^{j94,7^0}\right) = 224,8e^{-j24,3^0} \text{ В.}$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}\cdot\left(\underline{U}_A + a^2\cdot\underline{U}_B + a\cdot\underline{U}_C\right) =$$

$$= \frac{1}{3}\cdot\left(270e^{-j23,6^0} + e^{-j120^0}\cdot 187e^{-j145,4^0} + e^{+j120^0}\cdot 217e^{j94,7^0}\right) = 23,7e^{-j41,5^0} \text{ В.}$$

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}\cdot\left(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C\right) = \frac{1}{3}\cdot\left(270e^{-j23,6^0} + 187e^{-j145,4^0} + 217e^{j94,7^0}\right) = 25 \text{ В.}$$

Теперь определим токи во всех ветвях.

Токи в статической нагрузке (конденсаторы). Их можно определить по закону Ома, не прибегая к методу симметричных составляющих.

Фазные токи: $\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ав}} = \frac{400}{-j70,7} = 5,66e^{j90^0}$ А.

$$\underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{вс}} = \frac{350e^{-j112,3^0}}{-j70,7^0} = 4,95e^{-j22,3^0} \text{ А.}$$

$$\underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{са}} = \frac{420e^{j120,5^0}}{-j70,7^0} = 5,94e^{j219,5^0} \text{ А.}$$

Линейные токи: $I'_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA} = 10,5e^{j64,1^0}$ А.

$$\underline{I}'_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = 7,98e^{-j55^0} \text{ А.}$$

$$\underline{I}'_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC} = 10,8e^{-j148,3^0} \text{ А.}$$

Если бы конденсаторы были соединены в звезду, то можно применить метод двух узлов, или преобразовать звезду в эквивалентный треугольник.

Для определения остальных токов составим схему для одной фазы (фаза А) для токов прямой последовательности (рис. 13). По закону Ома

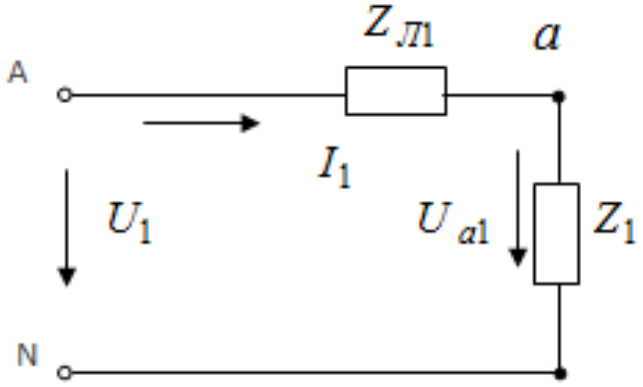


Рисунок 13 – Схема для токов прямой последовательности

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{экв1}} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{Л1} + \underline{Z}_1} == \frac{224{,}8e^{-j24{,}3^0}}{1{,}5 + j1{,}2 + 30 + j30} == 5{,}07e^{-j69^0} = 1{,}82 - j4{,}73\,A.$$

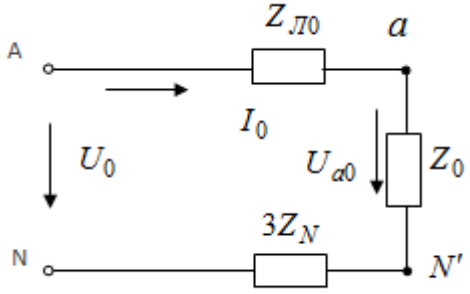
$$\underline{U}_{a1} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = 5{,}07e^{-j69^0} \cdot 30\sqrt{2} \cdot e^{j45^0} = 215{,}1e^{-j24^0}\ \text{В}.$$

Аналогично для обратной последовательности:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{экв2}} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{Л2} + \underline{Z}_2} = \frac{23{,}7e^{-j41{,}5^0}}{1{,}5 + j1{,}2 + 20 + j10} = 0{,}98e^{-j39^0} = 0{,}76 - j0{,}62\,A.$$

$$\underline{U}_{a2} = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 = 0{,}98e^{-j30^0} \cdot (20 + j10) = 21{,}9e^{-j12{,}4^0}\ \text{В}.$$

Для токов нулевой последовательности (рис. 14).



$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_{экв0}} = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}_{Л0} + \underline{Z}_0 + 3\underline{Z}_N} =$$

$$= \frac{25}{1{,}5 + j3{,}0 + j20 + 3 \cdot 10} = 0{,}641e^{-j36{,}1^0}\,A.$$

$$\underline{U}_{a0} = \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_0 = 0{,}641e^{-j36{,}1^0} \cdot j20 = 12{,}82e^{j53{,}9^0}\ \text{В}$$

Рисунок 14 – Схема для токов нулевой последовательности

Теперь определим действительные токи во всех линейных проводах и в нулевом проводе:

$$\underline{I}_a = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 5{,}07e^{-j69^0} + 0{,}98e^{-j39^0} + 0{,}64e^{-j36{,}1^0} = 6{,}59e^{-j62^0}\,A.$$

$$\underline{I}_в = \underline{I}_{в1} + \underline{I}_{в2} + \underline{I}_{в0} = a^2 \cdot \underline{I}_1 + a \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 4{,}55e^{j162{,}4^0}\,A.$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} + \underline{I}_{c0} = a \cdot \underline{I}_1 + a^2 \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 4{,}26e^{j48{,}9^0}\ A.$$

$$\underline{I}_N = \underline{I}_0 + \underline{I}_{в0} + \underline{I}_{c0} = 3\underline{I}_0 = 1{,}92e^{-j36{,}1^0}\ A..$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}'_A + \underline{I}_a = 8{,}49e^{j25{,}2^0}\ A;\ \underline{I}_B = \underline{I}'_B + \underline{I}_в = 5{,}16e^{-j90^0}\ A.$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}'_C + \underline{I}_c = 6{,}82e^{-j159^0}\ A.$$

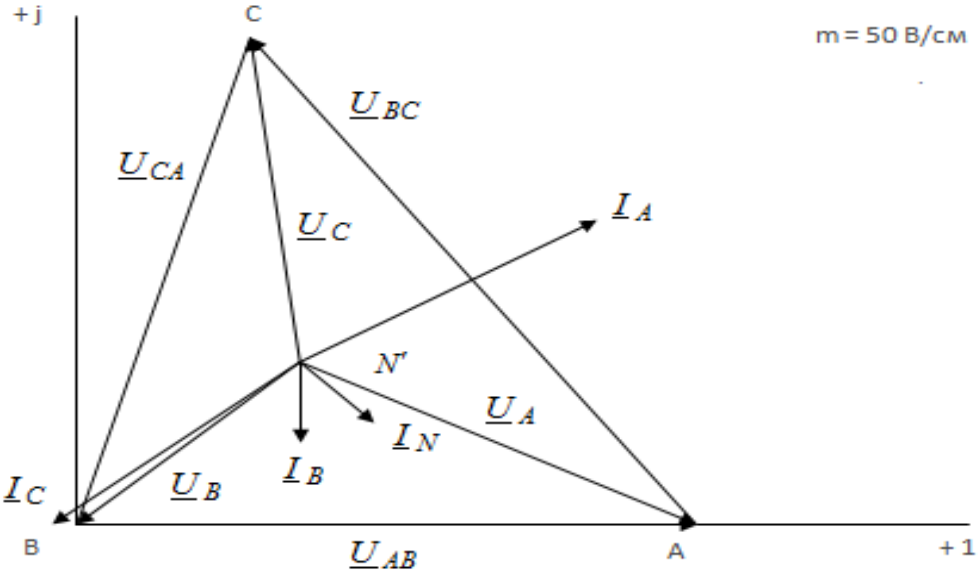


Рисунок 15 – Векторная диаграмма

Определим напряжения в конце линии:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_0 = 239{,}8e^{-j19{,}9^0}\ \text{В}.$$

$$\underline{U}_в = \underline{U}_{в1} + \underline{U}_{в2} + \underline{U}_0 = a^2 \cdot \underline{U}_{a1} + a \cdot \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = 188{,}8e^{-j140{,}2^0}\ \text{В}.$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2} + \underline{U}_0 = a \cdot \underline{U}_{a1} + a^2 \cdot \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} = 242{,}3e^{j97^0}\ \text{В}.$$

$$\underline{U}_{ав} = \underline{U}_a - \underline{U}_в = 239{,}8e^{-j19{,}9} - 188{,}8e^{-j140{,}2^0} = 372{,}6e^{j6{,}5^0}\ \text{В}.$$

(Или можно так: $\underline{U}_{ав} = \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{a0} - \underline{U}_{в1} - \underline{U}_{в2} - \underline{U}_{в0}$) В.

$$\underline{U}_{вс} = \underline{U}_в - \underline{U}_c = 188{,}8e^{-j140{,}2^0} - 242{,}3e^{j97^0} = 379{,}4e^{-j107{,}7^0}\ \text{В}.$$

$$\underline{U}_{са} = \underline{U}_c - \underline{U}_a = 242{,}3e^{j97^0} - 239{,}8e^{-j19{,}9} = 410{,}8e^{j128{,}4^0}\ \text{В}.$$

$$\underline{U}_{N'N} = \underline{I}_N \cdot \underline{Z}_N = 1{,}92e^{-j36{,}1^0} \cdot 10 = 19{,}2e^{-j36{,}1^0}\ \text{В}.$$

2.4.4 Расчёт цепи с несимметричной нагрузкой при симметричной системе ЭДС

Несимметричные режимы часто возникают в аварийных условиях. Например, несимметричное короткое замыкание можно рассматривать как несимметричную нагрузку (поперечная несимметрия). Обрыв одного из проводов ЛЭП также создаёт несимметрию (продольную).

Рассмотрим расчёт цепи с поперечной несимметрией методом симметричных составляющих на примере рис.16.

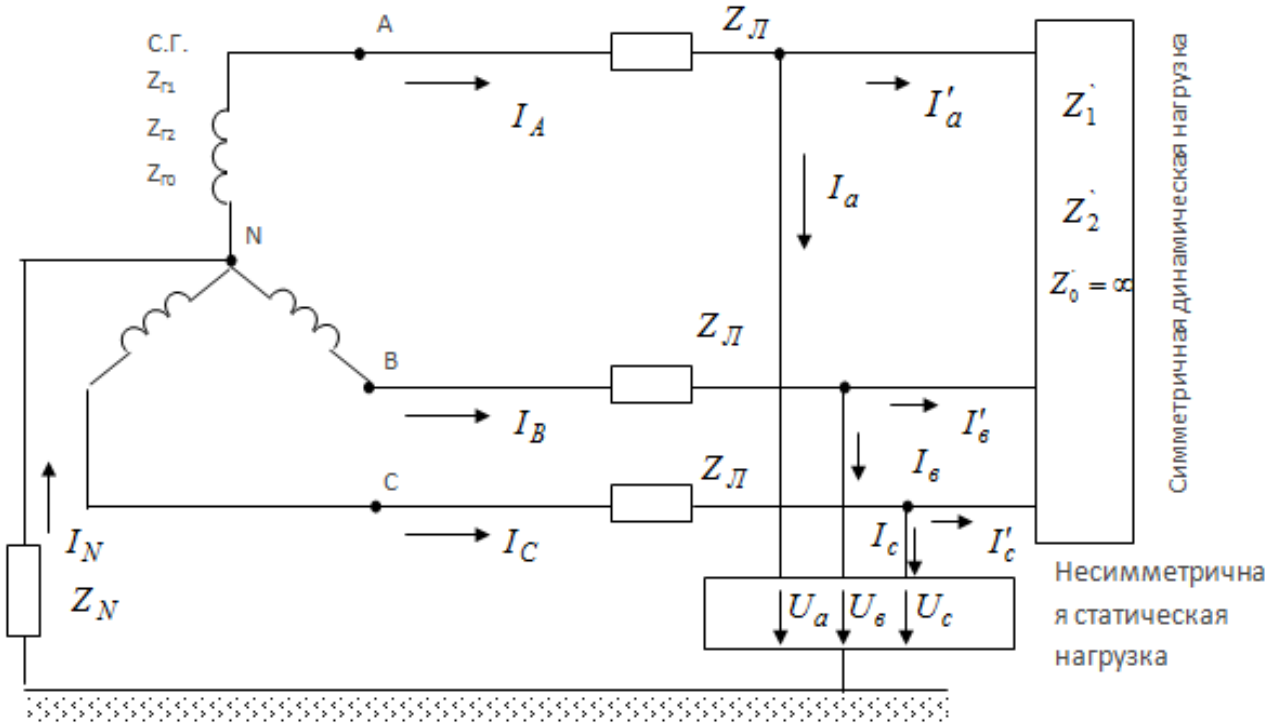


Рисунок 16 – К расчёту цепи с поперечной несимметрией

Синхронный генератор С.Г. с сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей $\underline{Z}_{Г1}$, $\underline{Z}_{Г2}$, $\underline{Z}_{Г0}$ передаёт энергию симметричной динамической нагрузке $\underline{Z}'_1$, $\underline{Z}'_2$, $\underline{Z}'_0$ по линии с сопротивлением $\underline{Z}_{Л1}$, $\underline{Z}_{Л2}$, $\underline{Z}_{Л0}$; $\underline{Z}_{Л1} = \underline{Z}_{Л2} = \underline{Z}_{Л}$. ЭДС генератора известны. В конце линии происходит несимметричное замыкание.

Рассчитать токи.

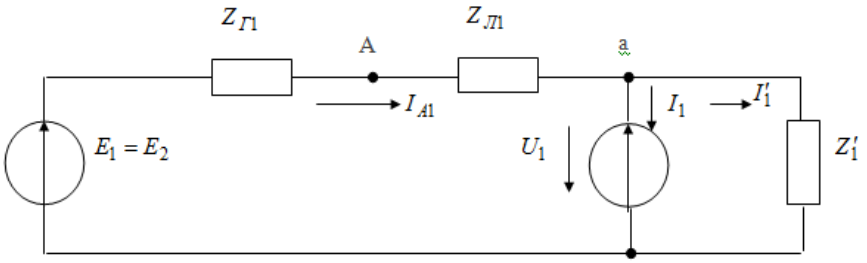
Решение

Заменим несимметричную нагрузку источниками неизвестных напряжений $\underline{U}_a$, $\underline{U}_в$, $\underline{U}_c$ (или встречно направленных ЭДС – по теореме компенсации).

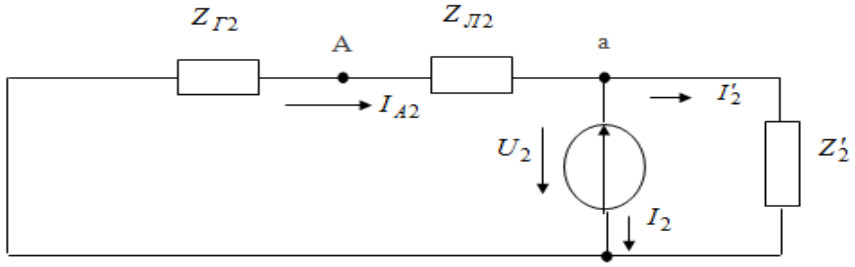
Эти напряжения разложим на симметричные составляющие, и тогда вместо одной (исходной) схемы можно рассматривать три, но более простые, для каждой симметричной составляющей отдельно.

Так как каждая из них симметрична, то можно рассматривать одну фазу.

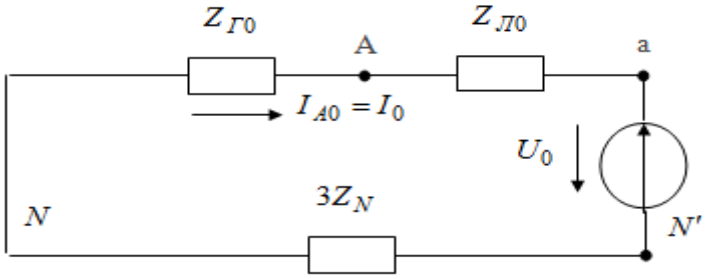
Фазу А принимаем за основную и тогда индекс А не пишем. Эти три схемы показаны на рис. 17.



а)



б)



в)

Рисунок 17 – Схемы для симметричных составляющих прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей фазы А

При составлении схем учитываем следующее:

1). Генератор симметричный, поэтому $\underline{E}_1 = \underline{E}_A$, $\underline{E}_2 = 0$, $\underline{E}_0 = 0$;

2). Для узла N сумма токов равна I_N, но $\underline{I}_{a1} + \underline{I}_{в1} + \underline{I}_{c1} = 0$ и $\underline{I}_{a2} + \underline{I}_{в2} + \underline{I}_{c2} = 0$, и поэтому через нулевой провод проходят только токи нулевой последовательности: $\underline{I}_{a0} = \underline{I}_{в0} = \underline{I}_{c0} = \underline{I}_0$; $\underline{I}_N = 3\underline{I}_0$.

$$\underline{U}_{N'N} = 3 \cdot \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_N = \underline{I}_0 \cdot 3 \cdot \underline{Z}_N .$$

3). В нашей задаче динамическая нагрузка не соединена с нулевым проводом, поэтому $I_0' = 0$ и на схеме рис. 16 этой ветви нет.

Теперь преобразуем каждую из многоконтурных схем рис. 17 в одноконтурные, но так, чтобы ветви с токами $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{I}_0$ остались без изменений. Получим схемы, показанные на рис. 18.

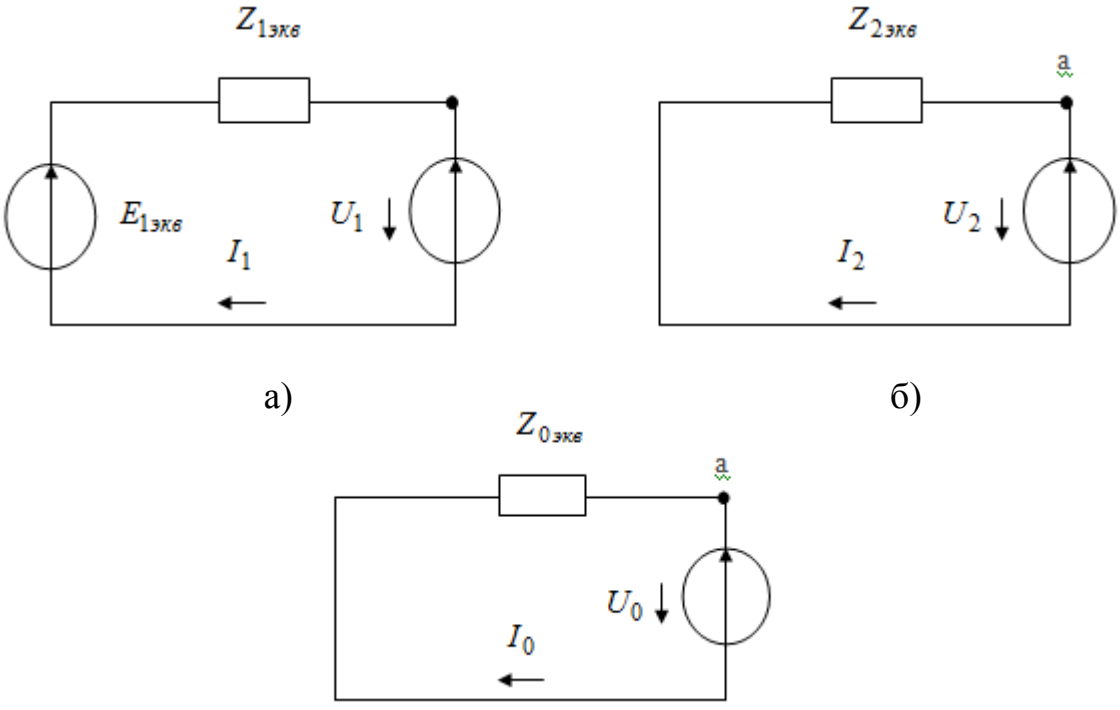


Рисунок 18 – Эквивалентные схемы замещения для симметричных составляющих прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей фазы А

Для этих схем справедливы уравнения

$$\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{экв1} + \underline{U}_1 = \underline{E}_{экв1} \qquad (1);$$

$$\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{экв2} + \underline{U}_2 = 0 \qquad (2);$$

$$\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{экв0} + \underline{U}_0 = 0 \qquad (3),$$

которые называются основными.

Они имеют шесть неизвестных: $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{I}_0$, $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}_0$.

Чтобы их найти, необходимо составить ещё три дополнительных уравнения с учётом конкретной несимметричной нагрузки.

Например, при однофазном замыкании на землю (рис. 19) имеем:

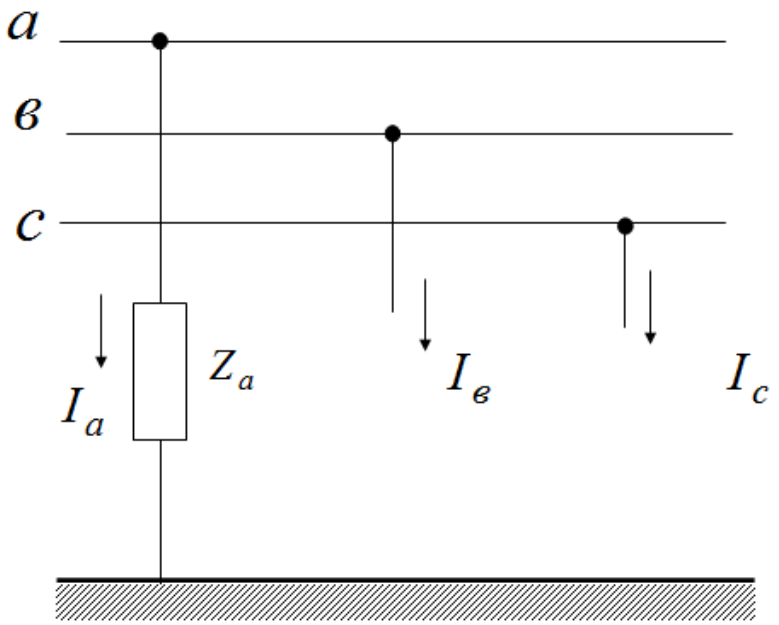


Рисунок 19 – Однофазное замыкание на землю

$$\underline{U}_a = \underline{I}_a \cdot \underline{Z}_a \qquad (4);$$

$$\underline{I}_в = 0 \qquad (5);$$

$$\underline{I}_c = 0 \qquad (6).$$

Если $\underline{Z}_a$ = 0 (короткое замыкание), то $\underline{U}_a = 0$ (4). Уравнения (4), (5), (6) – дополнительные.

Выразим $\underline{U}_a$, $\underline{I}_в$, $\underline{I}_c$ через их симметричные составляющие:

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \quad (4');$$

$$\underline{I}_{в1} + \underline{I}_{в2} + \underline{I}_0 = 0 \quad (5');$$

$$\underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} + \underline{I}_{c0} = 0 \quad (6').$$

Но $\underline{I}_{в1} = a^2 \cdot \underline{I}_1$;

$\underline{I}_{в2} = a \cdot \underline{I}_2$;

$\underline{I}_{c1} = a \cdot \underline{I}_1$; $\underline{I}_{c2} = a^2 \cdot \underline{I}_2$.

Поэтому получим $\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0$ (4″);

$$a^2 \cdot \underline{I}_1 + a \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (5'');$$

$$a \cdot \underline{I}_1 + a^2 \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \quad (6'').$$

Решив эти уравнения совместно с основными, получим:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0 = \frac{\underline{E}_{э1}}{\underline{Z}_{экв1} + \underline{Z}_{экв2} + \underline{Z}_{экв0}}.$$

Далее

$\underline{I}_a = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_0$;

$\underline{I}_в = a^2 \cdot \underline{I}_1 + a \cdot \underline{I}_2 + \underline{I}_0$; $\underline{I}_c = \grave{a}\underline{I}_1 + \grave{a}^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0$

и т.д.

3 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

В симметричной трехфазной цепи заданы: R, L, C и ординаты кривой $e_A(\omega t)$ или $e_{AB}(\omega t)$.

Требуется:

1. Разложить кривую $e_A(\omega t)$ или $e_{AB}(\omega t)$ в тригонометрический ряд, построить в одних осях эту кривую и составляющие ее гармоники и записать выражения для $e_B(\omega t)$ и $e_C(\omega t)$ или $e_{BC}(\omega t)$ и $e_{CA}(\omega t)$.

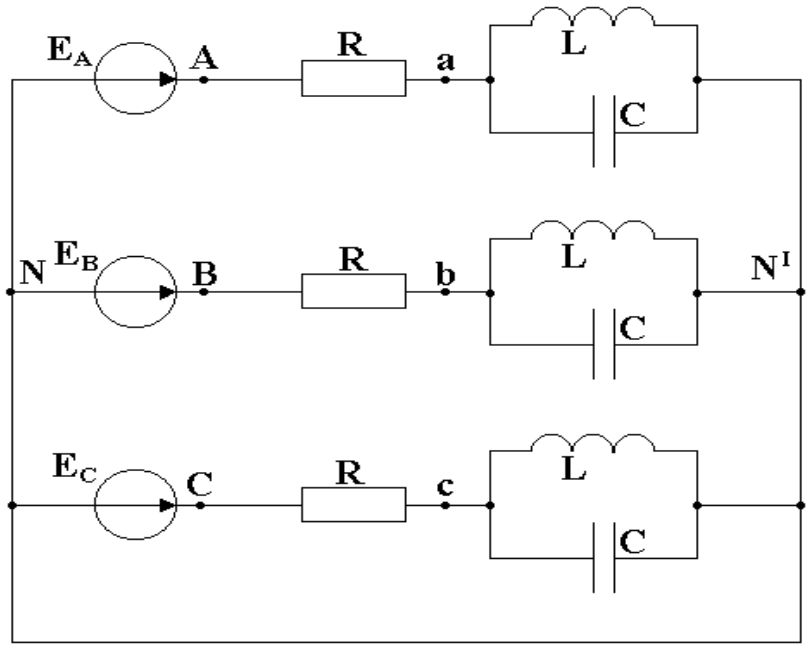
2. Определить мгновенное значение напряжения между точками, указанными в нижней строке таблицы, и его действующее значение.

3. Определить активную P и полную S мощности трехфазной системы, коэффициент мощности.

4. Определить линейные токи при указанном в задании аварийном режиме и разложить их на симметричные составляющие.

Исходные данные:

Расчетная схема электрической цепи согласно заданию:



Заданы параметры : R=4,2Ом; L = $7{,}5\cdot10^{-3}$Гн; C=$37{,}5\cdot10^{-6}$Ф и точки C, N^I

Мгновенные значения ЭДС фазы А :

ωt,	0	15	30	45	60	75	90	105
e(ωt)	175	194,7	173	139,9	125	139,3	173	194

ωt	120	135	150	165	180	195	210	225
e(ωt)	175	104,8	0	-104,8	-175	-194,6	-173	-139,9

ωt	240	255	270	285	300	315	330	345
e(ωt)	-125	-139,3	-173	-194,6	-175	-104,8	0	104,8

РЕШЕНИЕ

Для разложения заданной функции в гармонический ряд удобно воспользоваться методом, изученным в дисциплине «Теоретические основы электротехники» и любым математическим пакетом. Разобъем функцию ЭДС на 24 интервала. Расчет выполнен в табличной форме.

p	1	2	3	4	5	6	7
ωt в гр.	7,5	20,1	37,5	52,5	67,5	82,5	97,5
ωt в рад.	0,130833	0,350633	0,654167	0,915833	1,1775	1,439167	1,700833
e(ωt)	175	192,2	156	130	130	156	187
sin(ωt)	0,13046	0,343493	0,608498	0,79307	0,923651	0,991349	0,991557
cos(ωt)	0,991454	0,939155	0,793555	0,60913	0,383235	0,13125	-0,12967
e(ωt)sin(ωt)	22,83057	66,01929	94,92571	103,0992	120,0746	154,6505	185,4212
e(ωt)cos(ωt)	173,5044	180,5057	123,7946	79,18689	49,82057	20,47498	-24,2484
3ωt в гр.	22,5	60,3	112,5	157,5	202,5	247,5	292,5
3ωt в рад.	0,3925	1,0519	1,9625	2,7475	3,5325	4,3175	5,1025
sin(3ωt)	0,382499	0,868367	0,92426	0,383971	-0,38103	-0,92304	-0,92487
cos(3ωt)	0,923956	0,495922	-0,38176	-0,92335	-0,92456	-0,38471	0,380291
e(ωt)sin(3ωt)	66,93741	166,9001	144,1846	49,91617	-49,5336	-143,994	-172,95
e(ωt)cos(3ωt)	161,6922	95,31622	-59,5551	-120,035	-120,193	-60,0141	71,11443

p	8	9	10	11	12	13	14
ωt в гр.	112,5	127,5	142,5	157,5	172,5	187,5	202,5
ωt в рад.	1,9625	2,224167	2,485833	2,7475	3,009167	3,270833	3,5325
e(ωt)	190	146	54	-54	-146	-190	-187
sin(ωt)	0,92426	0,79404	0,609761	0,383971	0,132039	-0,12888	-0,38103
cos(ωt)	-0,38176	-0,60787	-0,79259	-0,92335	-0,99124	-0,99166	-0,92456
e(ωt)sin(ωt)	175,6094	115,9298	32,92711	-20,7344	-19,2777	24,48743	71,25214
e(ωt)cos(ωt)	-72,5351	-88,7484	-42,7996	49,86065	144,7217	188,4154	172,8934
3ωt в гр.	337,5	382,5	427,5	472,5	517,5	562,5	607,5
3ωt в рад.	5,8875	6,6725	7,4575	8,2425	9,0275	9,8125	10,5975
sin(3ωt)	-0,38544	0,379554	0,922425	0,925471	0,38691	-0,37808	-0,92181
cos(3ωt)	0,922733	0,925169	0,386175	-0,37882	-0,92212	-0,92577	-0,38764
e(ωt)sin(3ωt)	-73,2337	55,41495	49,81097	-49,9755	-56,4888	71,8353	172,3783
e(ωt)cos(3ωt)	175,3192	135,0747	20,85347	20,45615	134,6292	175,8968	72,48941

p	15	16	17	18	19	20	21
ωt в гр.	217,5	232,5	247,5	262,5	277,5	292,5	307,5
ωt в рад.	3,794167	4,055833	4,3175	4,579167	4,840833	5,1025	5,364167
e(ωt)	-156	-130	-130	-156	-187	-190	-146
sin(ωt)	-0,60723	-0,7921	-0,92304	-0,99114	-0,99176	-0,92487	-0,79501
cos(ωt)	-0,79452	-0,61039	-0,38471	-0,13283	0,128091	0,380291	0,606601
e(ωt)sin(ωt)	94,72843	102,9729	119,9951	154,6177	185,4596	175,7247	116,071
e(ωt)cos(ωt)	123,9457	79,35099	50,01174	20,72126	-23,9531	-72,2553	-88,5637
3ωt в гр.	652,5	697,5	742,5	787,5	832,5	877,5	922,5
3ωt в рад.	11,3825	12,1675	12,9525	13,7375	14,5225	15,3075	16,0925
sin(3ωt)	-0,92607	-0,38838	0,376606	0,921191	0,926673	0,389845	-0,37513
cos(3ωt)	0,377343	0,9215	0,926374	0,389112	-0,37587	-0,92088	-0,92697
e(ωt)sin(3ωt)	144,4675	50,48912	-48,9587	-143,706	-173,288	-74,0705	54,76894
e(ωt)cos(3ωt)	-58,8655	-119,795	-120,429	-60,7014	70,28728	174,9673	135,338

p	22	23	24
ωt в гр.	322,5	337,5	352,5
ωt в рад.	5,625833	5,8875	6,149167
e(ωt)	-54	54	146
sin(ωt)	-0,61102	-0,38544	-0,13362
cos(ωt)	0,791613	0,922733	0,991033
e(ωt)sin(ωt)	32,99523	-20,8138	-19,5082
e(ωt)cos(ωt)	-42,7471	49,82756	144,6908
3ωt в гр.	967,5	1012,5	1057,5
3ωt в рад.	16,8775	17,6625	18,4475
sin(3ωt)	-0,92057	-0,92727	-0,39131
cos(3ωt)	-0,39058	0,374391	0,920258
e(ωt)sin(3ωt)	49,71077	-50,0726	-57,1314
e(ωt)cos(3ωt)	21,09122	20,21714	134,3577

Определим составляющие основной и третьей гармоник:

Синусная составляющая 1-ой гармоники:

$$A_1^{\ I} = \frac{2}{n}\sum_{p=1}^{n} f_p(\omega t)\cdot \sin_p \omega t = \frac{2}{24}\cdot 2069.457 = 172.4548 \text{ В}$$

Косинусная составляющая 1-ой гармоники:

$$A_1^{\ II} = \frac{2}{n}\sum_{p=1}^{n} f_p(\omega t)\cdot \cos_p \omega t = \frac{2}{24}\cdot 1195.875 = 99.6562 \text{ В}$$

Амплитуда напряжения для основной гармоники:

$$A_1 = \sqrt{\left(A_1^{\ I}\right)^2 + \left(A_1^{\ II}\right)^2} = \sqrt{172.4548^2 + 99.6562^2} = 199.18 \text{ В}$$

Начальная фаза основной гармоники: $\varphi_1 = arctg\,\frac{A_1^{\ II}}{A_1^{\ I}} = arctg\,\frac{99.6562}{172.4548} = 30.02^0$

Синусная составляющая 3-ей гармоники:

$$A_3^{\ I} = \frac{2}{n}\sum_{p=1}^{n} f_p(\omega t)\cdot \sin_p 3\omega t = \frac{2}{24}\cdot (5.9849) = 0.4987$$

Косинусная составляющая 3-ей гармоники:

$$A_3^{\ II} = \frac{2}{24}\sum_{p=1}^{n} f_p(\omega t)\cdot \cos 3\omega t = \frac{2}{24}\cdot 899.51256 = 74.9593$$

Амплитуда напряжения для третьей гармоники:

$$A_3 = \sqrt{\left(A_3^{\ I}\right)^2 + \left(A_3^{\ II}\right)^2} = \sqrt{0{,}4987^2 + 74{,}9593^2} = 74{,}96 \text{ В.}$$

Начальная фаза третьей гармоники: $\varphi_3 = arctg\,\frac{A_3^{\ II}}{A_3^{\ I}} = arctg\,\frac{74.9593}{0.4987} = 89.62^0$

Определим мгновенные значения напряжений по фазам:

Фаза А: $e_{A_1} = 199.18 * \sin(\omega t + 30.03^0)$**,**В

$$e_{A_3} = 74.96\cdot \sin(3\omega t + 89.62^0) \quad \text{В}$$

Фаза В: $e_B = 199.18\cdot \sin(\omega t - 89.98^0)$ В

Фаза С: $e_c = 199.18\cdot \sin(\omega t - 150.02^0)$ В

Составляющие ЭДС e_c и e_b для третьей гармоники являются составляющими нулевой последовательности и поэтому не изменяются.

$$e_{c_3} = 74.96 \cdot \sin(\omega t + 89.62^0) \quad \text{В}$$

$$e_{B_3} = 74.96 \cdot \sin(\omega t + 89.62^0) \quad \text{В}$$

Итоговые значения напряжения по фазам:

Фаза А: $e_A = 199.18 \cdot \sin(\omega t + 30.02^0) + 74.96 \cdot \sin(3\omega t + 89.62^0)$ В

Фаза В: $e_B = 199.18 \cdot \sin(\omega t - 89{,}98^0) + 74.96 \cdot \sin(3\omega t + 89.62^0)$ В

Фаза С: $e_B = 199.18 \cdot \sin(\omega t + 150{,}02^0) + 74.96 \cdot \sin 3(\omega t + 89.62\ )$ В

Определим мгновенное и действующее значение напряжения между заданными точками N^I,С.

Ток 1-ой гармоники для фазы С: $I_C^{(1)} = \dfrac{E_C^{(1)}}{Z^{(1)}}$;

Для определения тока необходимо знать ЭДС и полное сопротивление всей цепи:

$$E_C^{(1)} = \frac{199.1784}{\sqrt{2}} \cdot e^{j150.0223} = 140.84 \cdot e^{j150.02^0} \quad \text{В}$$

$$Z^{(1)} = \frac{jX_L \cdot jX_C}{jX_L + jX_C} + R$$

$$X_L = \omega \cdot L = 314 \cdot 7.5 \cdot 10^{-3} = 2.355 \quad \text{Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{314 \cdot 37.5 \cdot 10^{-6}} = 84.93 \quad \text{Ом}$$

Определим полное сопротивление цепи:

$$Z^{(1)} = \frac{jX_L^{(1)} \cdot \left(-jX_C^{(1)}\right)}{jX_L^{(1)} + \left(-jX_C^{(1)}\right)} + R = \frac{j2.355 \cdot (-j84.9269)}{j2.355 + (-j84.9269)} + 4.2 = 4.784 \cdot e^{j28.61^0} \quad Ом;$$

Определим ток **фазы С:**

$$I_C^{(1)} = \frac{E_C^{(1)}}{Z^{(1)}} = \frac{140{,}84 \cdot e^{j150.02_0}}{4.784 \cdot e^{j28.61^0}} = 29.44 \cdot e^{j121.41^0}, A$$

Определим сопротивление цепи между заданными точками: **N',С**

$$Z^{(1)}{}_{N'c} = Z^{(1)} - R = 4.2 + j2.4118 - 4.2 == j2.4118 = 2.4118 \cdot e^{j90^0} \quad Ом;$$

Определим напряжение $U_{N'c}$ между заданными точками:

$$U_{N'c} = I_C^{(1)} \cdot Z_{N'c} = 29.44 \cdot e^{j121.41^0} \cdot 2.4118 \cdot e^{j90^0} = 71.00 \cdot e^{j211.41^0} \quad B;$$

Ведем дальнейший расчет для 3-ей гармоники:

Ток 3-ей гармоники для фазы С: $I_C^{(3)} = \frac{E_C^{(3)}}{Z^{(3)}}$;

Для определения тока необходимо знать ЭДС :полное сопротивление всей цепи:

ЭДС : $E_C^{(3)} = \frac{74{,}96021}{\sqrt{2}} \cdot e^{j89{,}61^0} = 53{,}00 \cdot e^{j89{,}61^0}$ В

Полное сопротивление всей цепи:

$$Z^{(3)} = \frac{jX_L^{(3)} \cdot jX_C^{(3)}}{jX_L^{(3)} + jX_C^{(3)}} + R$$

$$X_L^{(3)} = 3 \cdot \omega \cdot L = 3 \cdot 314 \cdot 7.5 * 10^{-3} = 7{,}065 \text{ Ом};$$

$$X_C^{(3)} = \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot 314 \cdot 37.5 \cdot 10^{-6}} = 28{,}3086 \quad \text{Ом}$$

Определим полное сопротивление цепи:

$$Z^{(3)} = \frac{jX_L^{(3)} \cdot \left(-jX_C^{(3)}\right)}{jX_L^{(3)} + \left(-jX_C^{(3)}\right)} + R = \frac{j7{,}065 \cdot (-j28{,}3086)}{j7{,}065 + (-j28{,}3086)} + 4.2 = 7.0432 \cdot e^{j59.32^0} \quad Ом;$$

Определим ток **фазы С:**

$$I_C^{(3)} = \frac{E_C^{(3)}}{Z^{(3)}} = \frac{53.00 \cdot e^{j89.61^0}}{7.0432 \cdot e^{j59.32^0}} = 7.53 \cdot e^{j30.29^0} \quad A$$

Определим сопротивление цепи между заданными точками: **N',C**

$$Z^{(3)}_{N'c} = Z^{(3)} - R = 4.2 + j5.6539 - 4.2 = j5.6539 = 5.6539 \cdot e^{j90^0} \quad Ом;$$

Определим напряжение $U_{N'c}$ между заданными точками:

$$U_{N'c} = I_C^{(3)} \cdot Z_{N'c} = 7.53 \cdot e^{j30.29^0} \cdot 5.6539 \cdot e^{j90^0} = 42.55 \cdot e^{j120.29^0} \quad B;$$

$$U_{N'c} = \sqrt{\left(U_{N'c}^{(1)}\right)^2 + \left(U_{N'c}^{(3)}\right)^2} = \sqrt{(71.0032)^2 + (42.5496)^2} = \sqrt{6851.9229} = 82.78 \quad B$$

Итоговое значение напряжения между заданными точками:

$$u_{N'c} = 71.00 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 211.41^0) + 42.55 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3\omega t + 120.29^0) \quad \text{В}$$

Определение мощностей:

Активная мощность определяется суммой активных мощностей основной и третьей гармоник:

$$P = P^{(1)} + P^{(3)}$$

Активная мощность цепи для основной гармоники

$$P^{(1)} = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot 29.44^2 \cdot 4.2 = 10920.52 \quad Bm$$

Активная мощность цепи для третьей гармоники

$$P^{(3)} = 3 \cdot I^{(3)2} \cdot R = 3 \cdot 7{,}5257^2 \cdot 4.2 = 713{,}62 \quad Bm$$

Полная мощность цепи:

$$S = 3 \cdot I \cdot E = 3 \cdot \sqrt{I^{(1)2} + I^{(3)2}} \cdot \sqrt{E^{(1)2} + E^{(3)2}} = 3 \cdot \sqrt{29.44^2 + 7.53^2} \times \times \sqrt{199.1784^2 + 74.9602^2} =$$
$$= 19400.35 \quad B \cdot A$$

Определим кажущийся коэффициент мощности

$$\chi = \frac{P}{S} = \frac{10900.53}{19400{,}35} = 0.562$$

Принимаем фазу С за основную и будем вести расчет токов прямой, обратной и нулевой последовательности для этой фазы:

Составим три независимых схемы для прямой, обратной и нулевой последовательностей напряжений и токов:

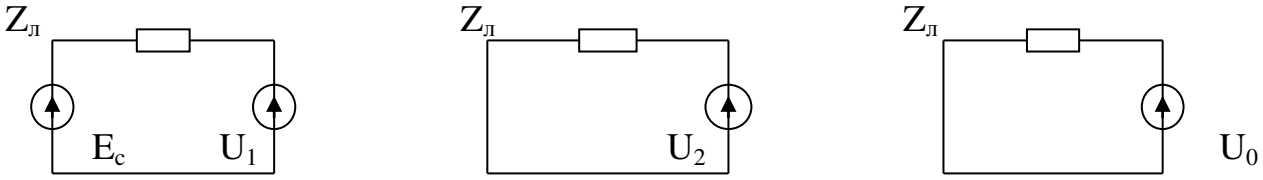


Схема 1 Схема 2 Схема 3

E_c - ЭДС фазы С,

U_1, U_2, U_0 – напряжения прямой, обратной и нулевой последовательности соответственно.

Описываем данные схемы по 2-му закону Кирхгоффа:

$$\begin{cases} I_{C_1} \cdot Z_Л + U_1 = E_1 \\ I_{C_2} \cdot Z_Л + U_2 = 0 \\ I_{C_0} \cdot Z_Л + U_0 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Токи фаз $\mathbf{I_A, I_B, I_C}$**:**

$$I_C = 29.44 \cdot e^{j121.41^0} \quad A$$

$$I_B = 29.44 \cdot e^{j121.41^0} \cdot e^{j120^0} = 29.44 \cdot e^{j241.41^0} = 29.44 \cdot e^{-j118.59^0} \quad A$$

$$I_A = 29.44 \cdot e^{j121.41^0} \cdot e^{-j120^0} = 29.44 \cdot e^{j1.41^0} \quad A$$

Определим токи прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$I_{A_0} = \frac{1}{3} \cdot \left(I_A + I_B + I_C\right) = \frac{1}{3} \cdot \left(29.44 \cdot e^{j121.41^0} + 29.44 \cdot e^{-j118.59^0} + 29.44 \cdot e^{j1.41} \right) = 0$$

$$I_{A1} = \frac{1}{3} \cdot \left(I_A + a^2 I_B + a I_C\right) = \frac{1}{3} \cdot (29.44 \cdot e^{121.41^0} + 29.44 \cdot e^{-j118.59^0} \cdot e^{-j120^0} + 29.44 \cdot e^{1.41^0} \cdot e^{j120^0}) = 29{,}44 \cdot e^{121.41^0} \quad A$$

$$I_{A2} = \frac{1}{3} \cdot \left(I_A + a I_B + a^2 I_C\right) = \frac{1}{3} \cdot (29.44 \cdot e^{121.41^0} + 29.44 \cdot e^{-j118.59^0} \cdot e^{j120^0} + 29.44 \cdot e^{1.41^0} \cdot e^{-j120^0}) = 0$$

…

4 ЗАДАНИЯ К РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ «НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ»

В симметричной трехфазной цепи заданы: R, L, C и ординаты кривой $e_A(\omega t)$ или $e_{AB}(\omega t)$.

Требуется:

5. Разложить кривую $e_A(\omega t)$ или $e_{AB}(\omega t)$ в тригонометрический ряд, построить в одних осях эту кривую и составляющие ее гармоники и записать выражения для $e_B(\omega t)$ и $e_C(\omega t)$ или $e_{BC}(\omega t)$ и $e_{CA}(\omega t)$.

6. Определить мгновенное значение напряжения между точками, указанными в нижней строке таблицы, и его действующее значение.

7. Определить активную P и полную S мощности трехфазной системы.

8. Определить линейные токи первой гармоники при обрыве линейного провода фазы А и разложить их на симметричные составляющие.

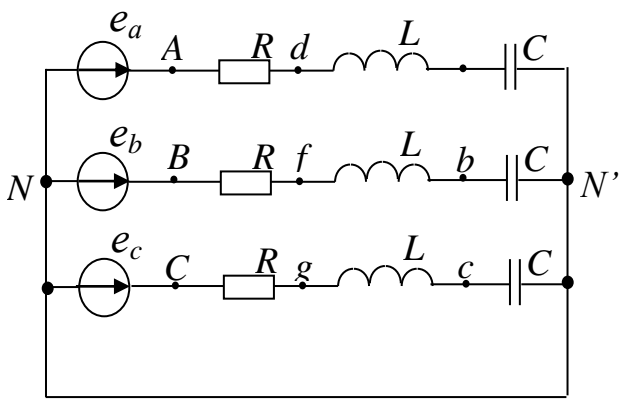


Рис. 1

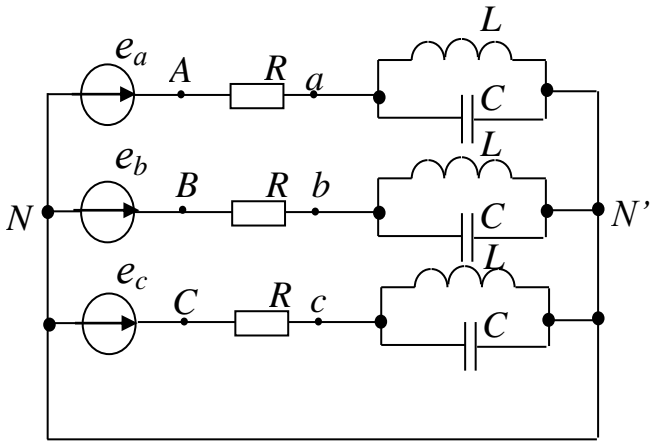


Рис. 2

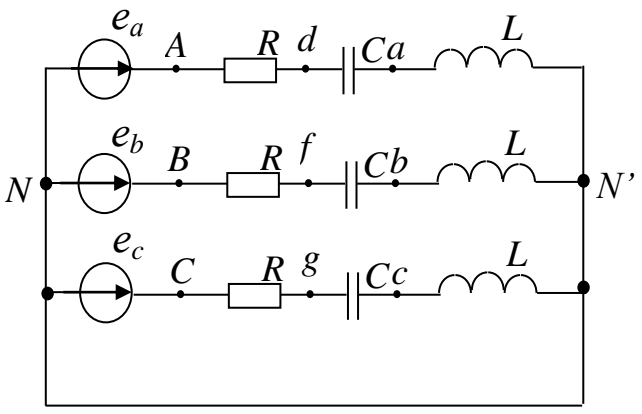


Рис. 3

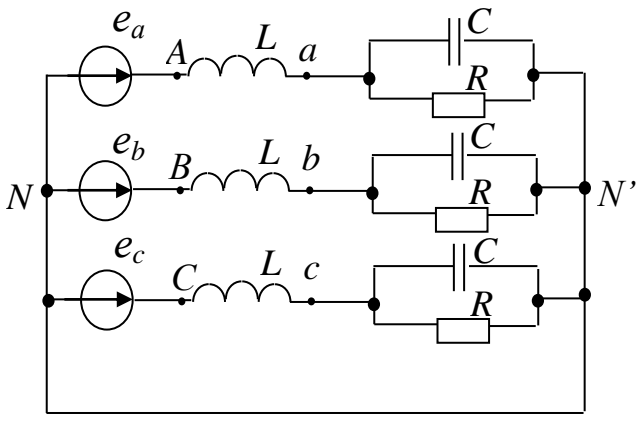


Рис. 4

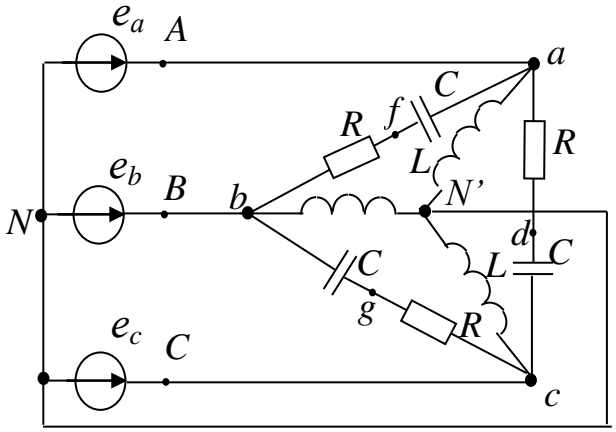


Рис. 5

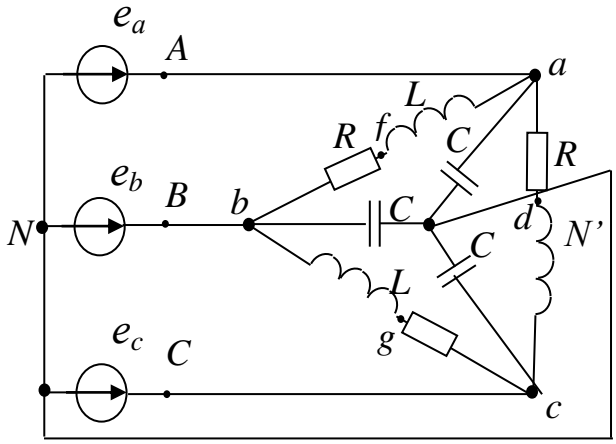


Рис. 6

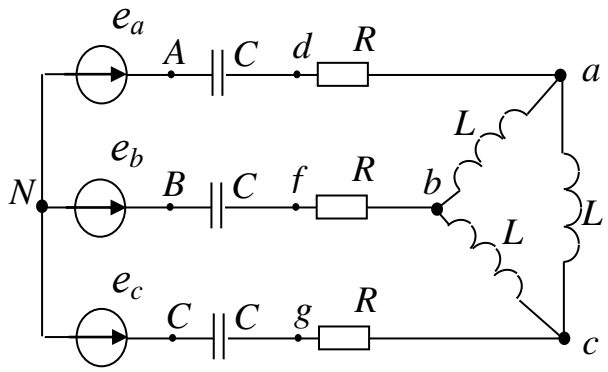


Рис. 7

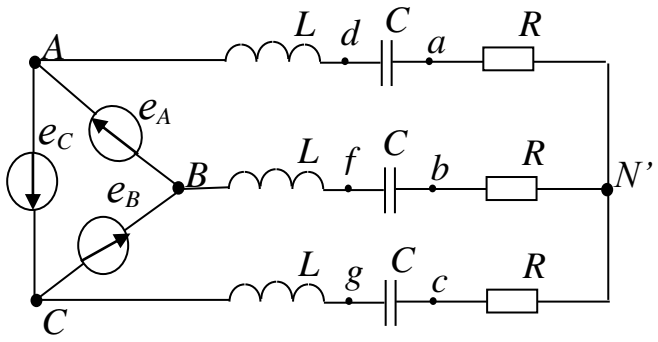


Рис. 8

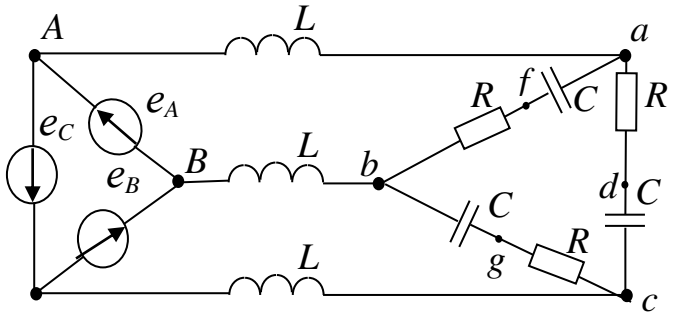


Рис. 9

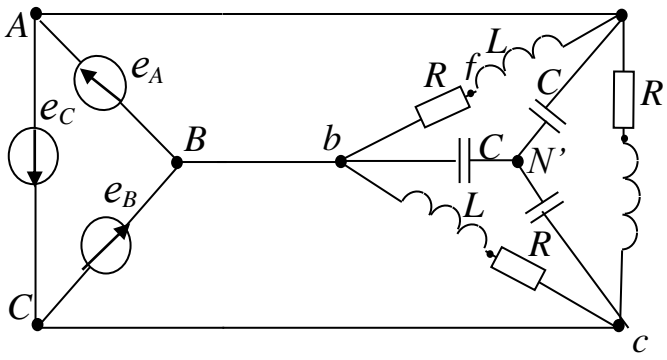


Рис. 10

Ниже в таблицах приведены значения несинусоидальной периодической ЭДС источника энергии, номер схемы и параметры трехфазной электрической цепи.

ωt, град	Вариант									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
0	0	106	-8,8	106	0	-106	-50	0	56,6	120
15	61,2	86,5	-67,2	100	-61,2	-86,5	-61,2	45,2	69,2	101,7
30	100	61,2	-132	61,2	-100	-61,2	-86,5	60	101,7	69,2
45	106	50	-151,2	0	-106	-50	-106	56,6	120	56,6
60	86,5	61,2	-120,7	-61,2	-36,5	-61,2	-100	69,2	101,7	60
75	61,2	86,5	-121	-100	-61,2	-86,5	-61,2	101,7	69,2	45,2
90	50	106	-144,7	-106	-50	-106	0	120	56,6	0
105	61,2	100	-159	-86,5	-61,2	-100	61,2	101,7	60	-45,2
120	86,5	61,2	-121	-61,2	-86,5	-61,2	100	69,2	45,2	-60
135	106	0	-53,8	-50	-106	0	106	56,6	0	-56,6
150	100	-61,2	-12,8	-61,2	-100	61,2	86,55	60	-45,2	-69,3
165	61,2	-100	-7,8	-86,5	-61,2	100	61,2	45,2	-60	-101,7
180	0	-106	8,8	-106	0	106	50	0	-56,6	-120
195	-61,2	-86,5	67,2	-100	61,2	86,5	61,2	-45,7	-69,2	-101,7
210	-100	-61,2	132	-61,2	100	61,2	86,5	-60	-101,7	-69,2
225	-106	-50	15,2	0	106	50	106	-56,6	-120	-56,6
240	-86,5	-61,2	129,7	61,2	86,5	61,2	100	-68,2	-101,7	-60
255	-61,2	-86,5	121	100	61,2	86,5	61,2	-101,7	-69,2	-45,2
270	-50	-106	144,7	106	50	106	0	-120	-56,5	0
285	-61,2	-100	159	86,5	61,2	100	-61,2	-101,7	-60	45,2
300	-86,5	-61,2	121	61,2	86,5	61,2	-100	-69,2	-45,2	60
315	-106	0	53,8	50	106	0	-106	-56,6	0	-110,3
330	-100	61,2	12,8	61,2	100	-61,2	-86,5	-60	45,2	69,2
345	-61,2	100	7,8	86,5	61,2	-100	-61,2	-45,2	60	101,7
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	5	4,2	24	10	10	12	33	7	24	12
L, мГн	5	7,5	5	12,5	12,5	5	7,5	5	5	5
C, мкФ	25	37,5	25	62,5	100	25	37,5	25	25	25
Точки	a, b	a, b	B, b	a, b	a, b	a, b	a, b	a, b	a, b	a, b

ωt, град	Вариант									
	11	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
0	38,8	165,3	-60	110,3-	-38,8	-165,3	-94,7	38,8	108,8	174,7
15	110,3	144,7	-131,2	88,3	-110,3	-144,7	-94,7	104	118,7	137,8
30	156	114,7	-207,1	35,3	-156	-114,7	-106	121	157,8	80
45	165,3	94,7	-221,3	-38,8	-165,3	-94,7	-110,3	108,8	174,7	53,8
60	144,7	94,7	-180	-110,3	-144,7	-94,7	-88,8	118,7	137,8	53,8
75	114,7	106	-154,4	-156	-114,7	-106	-35,3	157,8	80	29
90	94,7	110,3	-173	--165,3	-94,7	-110,3	38,8	174,7	53,8	-38,8
105	94,7	88,8	-180,1	-144	-94,7	-88,8	110,3	1378	538	-104
120	106	35,3	-120	-114,7	-106	-35,3	156	80	29	-121
135	110,3	-38,8	-23,4	-94,7	-110,3	38,8	165,3	53,8	-33,8	-108,8
150	38,8	-110,3	34,7	-94,7	-88,8	110,3	144,7	53,8	-104	-118,7
165	35,3	-156	41,4	-106	-35,3	156	114,7	29	-121	-157,8
180	-38,8	-165,3	60	-110,3	38,8	165,3	94,7	-38,8	-108,8	-174,7
195	-110,3	-144,7	131,2	-88,8	110,3	144,7	94,7	-104	-118,7	-137,8
210	-156	-114,7	207,7	-35,3	156	114,7	106	121	-157,8	-80
225	-165,3	-94,7	221,3	38,8	165,3	94,7	110,3	-108,8	-174,7	-53,8
240	-144,7	-94,7	180	110,3	144,7	94,7	88,8	-118,7	-137,8	-53,8
255	--114,7	-106	154,4	156	114,7	106	35,3	-157,8	-80	-29
270	-94,7	-110,3	173	165,3	94,7	110,3	-38,8	-174,7	-53,8	38,8
285	-94,7	-88,8	180,1	144,7	94,7	88,8	-110,3	-137,8	-53,8	104
300	-106	-35,3	120	114,7	106	35,3	-156	-80	-29	121
315	38,8	23,4	94,7	110,3	-38,8	-165,3	-53,8	38,8	-87,1	108,8
330	-88,8	110,3	-34,7	94,7	88,8	-110,3	-144,7	-53,8	104	118,7
345	-35,3	156	-41,4	106	35,3	-156	-114,7	-29	121	157,8
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	4,2	5	24	12	12	33	45	7	24	12
L, мГн	5	22,5	5	12,5	12,5	5	7,5	5	5	5
C, мкФ	25	3737,5	25	62,5	100	25	37,5	25	25	25
Точки	b, c	b, c	C, c	b, c	b, c	b, c	b, c	b, c	b, c	b, c

ωt, град	Вариант									
	21	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**
0	100	228,3	-65,5	87	-100	-229,3	-123	100	164,7	213
15	176,8	200	-103,8	50	-176,8	-200	-106,2	180	165,3	151,8
30	223	157,7	-110,6	-16,4	-223	-157,7	-100	193	203,4	65,3
45	228,3	123	-90	-100	-228,3	-123	-87	164,7	213	23,4
60	200	106,2	-77,2	-176,8	-200	-106,2	-50	165,3	151,8	20
75	157,7	100	-86,5	-223	-157,7	-100	16,4	203,4	65,3	-13,2
90	123	87	-90	-228,3	-123	-87	100	213	23,4	-100
105	106,2	50	-60	-200	106,2	-50	176,8	151,8	20	-180
120	100	-16,4	-11,8	-157,7	-100	16,4	223	65,3	-13,2	-193
135	87,1	-100	17,3	-123	-87	100	228,3	23,4	-100	-164,7
150	50	-176,8	20,7	-106,2	-50	176,8	200	20	-180	-165,3
165	-16,4	-223	30	-100	16,4	223	157,7	-13,2	-193	-203,4
180	-100	-228,3	65,5	-87	100	228,3	123	-100	-164,7	-213
195	-176,8	-200	103,8	-50	176,8	200	106,2	-180	-165,3	-151,8
210	-223	-157,7	110,6	16,4	223	157,7	100	-193	-203,4	-65,3
225	-228,3	-123	90	100	228,3	123	87	-164,7	-213	-23,4
240	-200	-106,2	77,2	176,8	200	106,2	50	-165,3	-151,8	-20
255	-157,7	-100	86,5	223	157,7	100	-16,4	-203,4	-65,3	13,2
270	-123-87	-87	90	228,3	123	87	-100	-213	-23,4	100
285	-106,2	-50	60	200	106,2	50	-176,8	-154,8	-20	180
300	-100	16,4	11,8	157,7	100	-16,4	-223	-65,3	13,2	193
315	-87,1	100	-17,3	123	87	-100	-228,3	-23,4	100	164,7
330	-50	176,8	-20,7	106,2	50	-176,8	-200	-20	180	165,3
345	16,4	223	-30	100	-16,4	-223	-157,7	13,2	193	203,4
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	5	10	24	33	33	45	5	7	24	12
L, мГн	15	7,5	7,5	18,5	12,5	5	7,5	7,5	7,5	7,5
C, мкФ	25	37,5	37,5	62,5	100	25	37,5	37,5	37,5	37,5
Точки	c, a	c, a	d, f	c, a	c, a	c, a	c, a	c, a	c, a	c, a

ωt, град	Вариант									
	31	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**	**37**	**38**	**39**	**40**
0	70,7	128,3	-122,2	28,3	-70,7	-128,3	-30,7	90	82,7	75,9
15	114,8	96,5	-110,7	14	-114,8	-96,5	-21,7	96,5	101,7	32,7
30	136,5	58,2	-717,2	-21,7	-136,5	-58,2	-25,9	82,4	106,5	11,8
45	128,3	30,7	-129,7	-70,7	-128,3	-30,7	-28,7	82,7	75,9	10
60	96,5	21,7	-101	-114,8	-96,5	-21,7	-14	101,7	32,7	-6,6
75	58,2	25,9	-106	-136,5	-58,2	-25,9	21,7	106,5	11,8	-50
90	30,7	28,3	-104	-128,3	-30,7	-28,3	70,7	75,9	10	-90
105	21,7	14	-53,8	-96,5	-21,7	-14	114,8	32,7	-6,6	-96,5
120	25,9	-21,7	21,2	-58,2	-25,9	21,7	136,5	11,8	-50	-82,4
135	28,3	-70,7	64,8	-30,7	-28,3	70,7	128,3	10	-90	-82,7
150	14,1	-114,8	67,2	-21,7	-14	114,8	96,5	-6,6	-96,5	-101,7
165	-21,7	-136,5	75	-25,9	21,7	136,5	58,2	-50	-82,4	-106,5
180	-707	-128,3	122,2	-28,3	70,7	128,3	30,7	-90	-82,7	-75,9
195	-114,8	-96,5	170,7	-14	114,8	96,5	21,7	-96,5	-101,7	-32,7
210	-136,5	-58,2	171,2	21,7	136,5	58,2	25,9	-82,4	-106,5	-11,8
225	-128,3	-30,7	129,7	70,7	128,3	30,7	28,3	-82,7	-75,9	-10
240	-96,5	-21,7	101	114,8	96,5	21,7	14	-101,7	-32,7	6,6
255	-58,2	25,9	106	136,5	58,2	25,9	-21,7	-106,5	-11,8	50
270	-30,7	-28,3	104	128,3	30,7	28,3	-70,7	-75,9	-10	90
285	-21,7	-14	53,8	96,5	21,7	14	-114,8	-32,7	6,6	96,5
300	-25,9	21,7	-21,2	58,2	25,9	-21,7	-136,5	-11,8	50	82,4
315	-28,3	70,7	-64,8	30,7	28,3	-70,7	-128,3	-10	90	82,7
330	-14,1	114,8	-67,2	21,7	14	-114,8	-96,5	6,6	96,5	101,7
345	21,7	136,5	-76	25,9	-21,7	-136,5	-58,2	50	82,4	106,5
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	10	12	24	45	5	4,2	7	24	12	12
L, мГн	5	7,5	7,5	12,5	12,5	5	7,5	7,5	7,5	7,5
C, мкФ	25	37,5	37,5	62,5	100	25	37,5	37,5	37,5	37,5
Точки	d, f	d, f	f, g	a, N’	a, N’	a, N’	a, N’	a, d	a, d	a, b

ωt, град	Вариант									
	41	**42**	**43**	**44**	**45**	**46**	**47**	**48**	**49**	**50**
0	130	173	-182,6	-10,5	-130	-173	-35	159	118,7	82,8
15	173	130	-234,7	-35	-173	-130	-10,5	159,7	137,8	12,8
30	190	77,7	-221,3	-77,7	-190	-17,7	0	128,8	136	-21,2
45	173	35	-153	-130	-173	-35	10,5	118,7	82,8	-23,8
60	130	10,5	-102,9	-173	-130	-10,5	35	137,8	12,8	-46
75	77,7	0	-100	-190	-77,7	0	77,7	136	-21,2	-106
90	35	-10,5	-90,4	-173	35	10,5	130	822,8	-23,8	-159
105	10,5	-35	-20	-130	-10,5	35	173	12,8	-46	-159,7
120	0	-77,7	80,1	-77,7	0	77,7	190	-21,3	-106	-128,8
135	-10,5	-130	134,7	-35	10,5	130	173	-23,8	-153	-118,7
150	-35	-173	131,2	-10,5	35	173	130	-46	-139,7	-137,9
165	-77,7	-190	133	0	77,7	190	77,7	-106	-129,8	-136
180	-130	-173	182,6	10,5	130	173	35	-153	-118,7	-82,8
195	-173	-130	234,7	35	173	130	10,5	-159,7	-137,8	-12,8
210	-190	-77,7	221,3	77,7	190	77,7	0	-128,8	-136	21,2
225	-173	-35	153	130	173	35	-10,5	-118,7	-82,8	23,8
240	-130	-10,5	102,3	173	130	10,5	-35	-137,8	-12,8	46
255	-77,7	0	100	190	77,7	0	-77,7	-136	21,2	106
270	-35	10,5	90,4	173	35	-10,5	-130	-82,8	23,8	159
285	-10,5	35	20	130	10,5	-35	-173	-12,8	46	159,7
300	0	77,7	-80,1	77,7	0	-77,7	-190	21,2	106	128,8
315	10,5	130	-134,7	35	-10,5	-130	-173	23,8	159	118,7
330	35	173	-131,2	10,5	-35	-173	-130	46	159,7	137,8
345	77,7	190	-133	0	-77,7	-190	-77,7	106	128,8	136
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	33	24	5	5	4,2	5	5	7	24	12
L, мГн	5	7,5	10	12,5	20	5	22,5	10	10	10
C, мкФ	25	37,5	50	62,5	100	25	37,5	50	50	50
Точки	f, g	f, g	g, d	b, N’	b, N’	b, N’	b, N’	b, f	a, f	b, N’

ωt, град	Вариант									
	51	**52**	**53**	**54**	**55**	**56**	**57**	**58**	**59**	**60**
0	193	201,3	120	-71,7	-193	-201,3	-11,8	231,6	138,3	62
15	228,3	111,5	101,7	-101,5	-228,3	-141,5	28,3	220	151,9	-34,7
30	233	71,7	69,2	-144,7	-233	-71,7	51,8	164,7	140	-80
45	201,3	11,8	56,6	-193	-201,3	-11,8	71,7	138,3	62	-80
60	141,5	-28,3	60	-228,3	-141,5	28,3	101,5	151,8	-34,7	-102,9
75	71,7	-51,8	45,2	-233	-71,7	51,8	144,7	140	-80	-173
90	118	-11,7	0	-201,3	-11,8	71,7	193	62	-80	-231,6
105	-28,3	-101,5	-45,2	-141,5	28,3	101,5	228,3	-34,7	-102,9	-220
120	-51,8	-144,7	-60	-71,7	51,8	144,7	233	-80	-173	-164,7
135	-71,7	-193	-56,6	-11,8	71,7	193	201,3	-80	-231,6	-138,3
150	-101,5	-228,3	-69,3	28,3	101,5	228,3	141,5	-102,9	-220	-151,8
165	-144,7	-233	-101,7	51,8	144,7	233	71,7	-173	-164,7	-140
180	-193	-201,3	-120	71,7	193	201,3	11,8	-231,6	-138,3	-62
195	-228,3	-141,5	-101,7	101,5	228,3	141,5	-28,3	-220	-151,9	34,7
210	-233	-71,7	-69,2	144,7	233	71,7	-51,8	-164,7	-140	80
225	-201,3	-11,8	-56,6	193	201,3	11,8	-71,7	-138,3	-62	80
240	-141,5	28,3	-60	228,3	141,5	-28,3	-101,5	-151,8	34,7	102,9
255	-71,7	51,8	-45,2	233	71,7	-51,8	-144,7	-140	80	173
270	-11,8	71,7	0	201,3	11,8	-71,7	-193	-62,3	80	231,6
285	28,3	101,5	45,2	141,5	-28,3	-101,5	-228,3	34,7	102,9	220
300	51,8	144,7	60	71,7	-51,8	-144,7	-233	80	173	164,7
315	71,7	193	56,6	11,8	-71,7	-193	-201,3	80	231,6	138,3
330	101,5	228,3	69,2	-28,3	-101,5	-228,3	-141,5	102,9	220	151,8
345	144,7	233	101,7	-51,8	-144,7	-233	-71,7	173	164,7	140
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	33	45	12	5	4,2	5	10	7	24	12
L, мГн	5	7,5	5	12,5	20	15	7,5	10	10	140
C, мкФ	25	37,5	25	62,5	100	25	37,5	50	50	50
Точки	g, d	g, d	a, b	c, N’	c, N’	c, N’	c, N’	c, g	b, f	c, N’

ωt, град	Вариант									
	61	**62**	**63**	**64**	**65**	**66**	**67**	**68**	**69**	**70**
0	100	99	174,7	-42,4	-100	-99	40	110	75,9	-17,3
15	124,8	50	137,8	-46,5	-124,8	-50	54,2	82,4	70	-40
30	126,5	-2,4	80	-68,2	-126,5	2,4	50	69,2	31	-40
45	99	-40	53,8	-100	-99	40	42,6	75,9	-17,3	-51,4
60	50	-54,2	53,8	-124,8	-50	54,2	46,5	70	-40	-86,5
75	-2,4	-50	29	-126,4	2,4	50	68,2	31	-40	-115,8
90	-40	-42,4	-38,8	-99	40	42,4	100	-17,3	-51,4	-110
105	-54,2	-46,5	-104	-50	54,2	46,5	124,8	-40	-86,5	-82,4
120	-50	-69,2	-121	2,4	50	68,2	126,5	-40	-115,8	-69,2
135	-42,4	-100	-108,8	40	42,4	100	99	-51,4	-110	-75,9
150	-46,5	-124,8	-118,7	54,2	46,5	124,8	50	-86,5	-82,4	-70
165	-68,2	-126,5	-157,8	50	68,2	126,5	-2,4	-115,8	-69,2	-31
180	-100	-99	-174,7	42,4	100	99	-40	-110	-75,9	17,3
195	-124,8	-50	-137,8	46,5	124,8	50	-54,2	-82,4	-70	40
210	-126,5	2,4	-80	68,2	126,5	-2,4	-50	-69,2	-31	40
225	-99	40	-53,8	100	99	-40	-42,4	-75,9	17,3	51,4
240	-50	54,2	-53,8	124,8	50	-54,2	-46,5	-70	40	86,5
255	2,4	50	-29	126,5	-2,4	-50	-68,2	-31	40	115,8
270	40	42,4	38,8	99	-40	-42,4	-100	17,3	51,4	110
285	54,2	46,5	104	50	-54,2	-46,5	-124,8	40	86,5	82,4
300	50	68,2	121	-2,4	-50	-68,2	-126,5(	40	115,8	69,2
315	42,4	38,8	99	-40	-42,4	-100	17,3	51,4	110	113,8
330	46,5	124,8	118,7	-54,2	-46,5	-124,8	-50	86,5	82,4	70
345	68,2	126,5	157,8	-50	-68,2	-126,5	2,4	115,8	69,2	31
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	45	5	12	4,2	5	10	12	7	24	12
L, мГн	5	7,5	5	12,5	20	5	7,5	12,5	12,5	12,5
C, мкФ	25	37,5	25	62,5	100	25	37,5	62,5	62,5	62,5
Точки	N, d	N, d	b, c	a, d	a, d	A, a	A, a	A, d	b, g	a, d

ωt, град	Вариант									
	71	**72**	**73**	**74**	**75**	**76**	**77**	**78**	**79**	**80**
0	144,7	128	213	-76,9	-144,7	-128	113,8	159,7	82,8	-64,8
15	183,1	38,8	151,8	-69,7	-183	-38,8	128	108,8	68,8	-36,2
30	181	-53	65,3	-96,9	-181	53	106	80	7,8	-91
45	128,1	-113,8	23,4	-144,7	-128	113,8	76,9	82,8	-64,8	-101
60	38,8	-128	20	-183	-38,8	128	69,7	68,8	-96,2	-144,7
75	-53,1	-106	-13,2	-181	53	106	96,9	7,8	-91	-179
90	-113,8	-76,9	-100	-128	113,8	76,9	144,7	-64,8	-101	-159,7
105	-128,1	-69,7	-180	-38,8	128	69,7	183	-96,2	-144,7	-108,8
120	-106	-96,9	-193	53	106	96,9	181	-91	-179	-80
135	-76,9	-144,7	-164,7	113,8	76,9	144,7	128	-101	-159,6	-82,8
150	-69,7	-183	-165,3	128	69,7	183	38,8	-144,7	-108,8	-68,8
165	-96,9	-181	-203,4	106	96,9	181	-53	-179	-80	-7,8
180	-144,7	-128	-213	76,9	144,7	128	-113,8	-159,7	-82,8	64,8
195	-183,1	-38,8	-151,8	69,7	183	38,8	-128	-108,8	-68,8	-96,2
210	-181	53	-65,3	96,9	181	-53	-106	-80	-7,8	91
225	-128,1	113,8	-23,4	144,7	128	-113,8	-76,9	-82,8	64,8	101
240	-38,8	128	-20	183	38,8	-128	-69,7	-68,8	96,2	144,7
255	53,1	106	13,2	181	-53	-106	-96,9	-7,8	91	179
270	113,8	76,9	100	128	-113,8	-76,9	-144,7	64,8	101	159,7
285	128,1	69,7	180	38,8	-128	-69,7	-183	96,2	144,7	108,8
300	106	96,9	193	-53	-106	-96,9	-181	91	179	80
315	76,9	144,7	164,7	-113,8	-76,9	-144,7	-128	101	159,7	82,8
330	69,7	183	165,3	-128	-69,7	-183	-38,8	144,7	108,8	68,8
345	96,9	181	203,4	-106	-96,9	-181	53	179	80	7,8
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	5	4,2	12	5	10	12	33	7	24	12
L, мГн	5	7,5	7,5	37,5	20	5	7,5	12,5	12,5	12,5
C, мкФ	25	37,5	37,5	62,5	100	25	37,5	62,5	62,5	62,5
Точки	N, f	N, f	c, a	a, f	a,f	B, b	B, b	B, f	c, g	a, f

ωt, град	Вариант									
	81	**82**	**83**	**84**	**85**	**86**	**87**	**88**	**89**	**90**
0	173	104,8	75,9	-139,9	-173	-104,8	-175	193	62	-134,7
15	194,6	0	32,7	-125	-194,6	0	194,6	113,2	40	-169,8
30	175	-104,8	11,8	-139,9	-175	104,8	173	65,3	-41,4	-153
45	104,8	-175	10	-173	-104,8	175	139,9	62	-134,7	-154,4
60	0	-194,6	-6,6	-194,6	0	194,6	125	40	-169,8	-200
75	-104,8	-173	-50	-175	104,8	173	139,9	-41,4	-153	-231,6
90	-175	-139,9	-90	-104,8	175	139,9	173	-1347	-154	-193
105	-194,6	-125	-96,5	0	194,6	125	194,6	-169,8	-200	-113,2
120	-173	-133,9	-82,4	104,8	173	139,9	175	-153	-231,6	-65,3
135	-139,9	-173	-82,7	175	139,9	173	104,8	-154,4	-193	-62
150	-125	-194,6	101,7	194,6	125	194,6	0	-200	-113,2	-40
165	-139,9	-175	-106,5	173	139,9	175	-104,8	-231,6	-65,3	41,4
180	-173	-104,8	-75,9	139,9	173	104,8	-175	-193	-62	134,7
195	-194,6	0	-32,7	125	194,6	0	-194,6	-113,25	-40	169,8
210	-175	104,8	-11,8	139,9	175	-104,8	-173	-65,3	41,4	153
225	-104,8	175	-10	173	104,8	-175	-139,9	-62	134,7	154,4
240	0	194,6	6,6	194,6	0	--194,6	-125	-40	169,8	200
255	104,8	173	50	175	-104,8	-173	-139,9	41,4	153	231,6
270	175	139,9	90	104,8	-175	-139,9	-173	134,7	154,4	193
285	194,6	125	96,5	0	-194,6	-125	-194,6	169,8	200	113,2
300	173	139,9	82,4	-104,8	-173	-139,9	-175	153	231,6	65,3
315	139,9	173	82,7	-175	-139,9	-173	-104,8	154,4	193	62
330	125	194,6	101,7	-194,6	-125	-194,6	0	200	113,2	40
345	139,9	175	106,5	-173	-139,9	-175	104,8	231,6	65,3	-41,4
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	4,2	5	12	10	12	33	45	7	24	12
L, мГн	5	22,5	7,5	12,5	20	5	7,5	20	20	20
C, мкФ	25	37,5	37,5	62,5	100	25	37,5	100	100	100
Точки	N,g	N, g	a, b	b, f	b, f	C, c	C, c	C, g	c, d	b, f

ωt, град	Вариант									
	91	**92**	**93**	**94**	**95**	**96**	**97**	**98**	**99**	**100**
0	99	0	82,8	-60	-99	0	99	56,6	20	-84,8
15	90	54,2	12,8	68,2	-90	54,2	86,5	32,7	-20,7	76,5
30	54,2	-90	-21,2	-86,5	-54,2	90	68,2	31	-67,3	-77,2
45	0	-99	-23,8	-99	0	99	60	20	-84,8	-100
60	-54,2	-86,5	-46	-90	54,2	86,5	68,2	-20,7	-76,5	-115,8
75	-90	-68,2	-106	-54,2	90	68,2	86,5	-67,3	-77,2	-96,5
90	-99	-60	-159	0	99	60	99	-84,8	-100	-56,6
105	-86,5	-69,2	-159,7	54,2	86,5	68,2	90	-76,5	-115,8	-32,7
120	-68,2	-86,5	-128,8	90	68,2	86,5	54,2	-77,2	-96,5	-31
135	-60	-99	-118,7	99	60	99	0	-100	-56,6	-20
150	-68,2	-90	-137,8	86,5	68,5	90	-54,2	-115,8	-32,7	20,7
165	-86,5	-54,2	-136	68,2	86,5	54,2	-90	-96,5	-31	67,3
180	-99	0	-82,8	60	99	0	-99	-56,6	-20	84,8
195	-90	54,2	-12,8	68,2	90	-54,2	-86,5	-32,7	20,7	76,5
210	-54,2	90	21,2	86,5	54,2	-90	-68,2	-31	67,3	77,2
225	0	99	23,8	99	0	-99	-60	-20	84,8	100
240	54,2	86,5	46	90	-54,2	-86,5	-68,2	20,7	76,5	115,8
255	90	68,2	106	54,2	-90	-68,2	-86,5	67,3	77,2	96,5
270	99	60	159	0	-99	-60	-99	84,8	100	56,6
285	86,5	68,2	159,7	-54,2	-86,5	-68,5	-90	76,5	115,8	32,7
300	68,2	86,5	128,8	-90	-68,5	-86,5	-54,2	77,2	96,5	31
315	60	99	118,7	-99	-60	-99	0	100	56,6	20
330	68,2	90	137,8	-86,5	-68,2	-90	54,2	115,8	82,7	-20,7
345	86,5	54,2	136	-68,2	-86,5	-54,6	90	96,5	31	-67,3
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	5	10	12	12	33	45	5	7	24	12
L, мГн	15	7,5	10	12,5	20	5	7,5	20	20	20
C, мкФ	25	37,5	50	62,5	100	25	37,5	100	100	100
Точки	N’, d	N’, d	b, N’	b, d	b, d	A, N’	A, N’	a, N’	A, a	b, g

ωt, град	Вариант									
	101	**102**	**103**	**104**	**105**	**106**	**107**	**108**	**109**	**110**
0	150	-91,9	62	-91,6	-150	91,9	130	53,8	-8,8	-151,2
15	91,9	-150	-34,7	-130	-91,9	150	91,6	12,8	-67,2	-129,7
30	0	-159	-80	-159	0	159	75	7,8	-132	-121
45	-91,9	-130	-80	-150	91,9	130	91,6	-8,8	-151,2	-144,7
60	-150	-91,6	-102,9	-91,9	150	91,6	130	-67,2	--129,7	-159
75	-159	-75	-173	0	159	75	159	-132	-121	-121
90	-130	-91,6	-231,6	91,9	130	91,6	150	-151,2	-144,7	-53,8
105	-91,6	-130	-220	150	91,6	130	91,9	-129,7	-159	-12,8
120	-75	-159	-164,7	159	75	159	0	-121	-121	-7,8
135	91,6	-150	-138,3	130	91,6	150	-91,9	-144,7	-53,8	8,8
150	-130	-91,9	-151,8	91,6	130	91,9	-150	-159	12,8	67,2
165	-159	0	-140	75	159	0	-159	-121	-7,8	132
180	-150	91,9	-62	91,6	150	-91,9	-130	-53,8	8,8	151,2
195	-91,9	150	34,7	130	91,9	-150	-91,6	-12,8	67,2	129,7
210	0	159	80	159	0	-159	-75	-7,8	132	121
225	91,9	130	80	150	-91,9	-130	-91,6	8,8	151,2	144,7
240	150	91,6	102,9	91,9	-150	-91,6	-130	67,2	129,7	159
255	159	75	173	0	-159	-75	-159	132	121	121
270	130	91,6	231,6	-91,9	-130	-91,6	-150	151,2	144,7	53,8
285	91,6	130	220	-150	-91,6	-130	-91,9	129,7	159	12,8
300	75	159	164,7	-159	-75	-159	0	121	121	7,8
315	91,6	150	138,3	-130	-91,6	-150	91,9	144,7	53,8	-8,8
330	130	91,9	151,8	-91,6	-130	-91,9	150	159	12,8	-67,2
345	159	0	140	-75	-159	0	159	121	7,8	-132
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	10	12	12	33	45	5	5	7	24	12
L, мГн	5	7,5	10	12,5	20	7,5	10	5	5	5
C, мкФ	25	37,5	50	62,5	100	37,5	50	25	25	25
Точки	N’, f	N’, f	c, N’	c, g	c, g	B, N’	B, N’	b, N’	B, b	c, g

ωt, град	Вариант									
	111	**112**	**113**	**114**	**115**	**116**	**117**	**118**	**119**	**120**
0	104,8	-175	-17,3	-173	-104,8	175	139,9	23,4	-60	-221,3
15	0	-194,6	-40	-194,6	0	194,6	125	-34,7	-131,2	-180
30	-104,8	-173	-40	-175	104,8	173	139,9	-41,4	-207,7	-154,4
45	-175	-139,9	-51,4	-104,8	175	139,9	173	-60	-221,3	-173
60	-194,6	-125	-86,5	0	194,6	125	194,6	-131,2	-180	-180,1
75	-173	-139,9	-115,8	104,8	173	139,9	175	-207,7	-154,4	-120
90	-139,9	-173	-110	175	139,9	173	104,8	-221,3	-173	-23,4
105	-125	-194,6	-82,4	194,6	125	194,6	0	-180	-180,1	34,7
120	-139,9	-175	-69,2	173	139,9	175	-104,8	-154,4	-120	41,4
135	-173	-104,8	-75,9	139,9	173	104,8	-175	-173	-23,4	60
150	-194,6	0	-70	125	194,6	0	-194,6	-180,1	34,7	131,2
165	-175	104,8	-31	139,9	175	-104,8	-173	-120	41,4	207,7
180	-104,8	175	17,3	173	104,8	-175	-139,9	-23,4	60	221,3
195	0	194,6	40	194,6	0	-194,6	-125	34,7	131,2	180
210	104,8	173	40	175	-104,8	-173	-139,9	41,4	,207,7	154,4
225	175	139,9	51,4	104,8	-175	-139,9	-173	60	221,3	173
240	194,6	125	86,5	0	--194,6	-125	-194,6	131,2	180	108,1
255	173	139,9	115,8	-104,8	-173	-139,9	-175	207,7	154,4	120
270	139,9	173	110	-175	-139,9	-173	-104,8	221,3	173	23,4
285	125	194,6	82,4	-194,6	-125	-194,6	0	180	108,1	-34,7
300	139,9	175	69,2	-173	-139,9	-175	104,8	154,4	120	-41,4
315	173	104,8	75,9	-139,9	-173	-104,8	175	173	23,4	-60
330	194,6	0	70	-125	--194,6	0	194,6	180,1	-34,7	-131,2
345	175	-104,8	31	-139,9	-175	104,8	173	120	-41,4	-207,7
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	12	33	12	45	5	4,2	4,2	7	24	12
L, мГн	5	7,5	12,5	12,5	5	7,5	10	5	5	5
C, мкФ	25	37,5	62,5	62,5	25	37,5	50	25	25	25
Точки	N’, g	N’, g	a, d	c, d	c, d	c, N’	c, N’	c, N’	C, c	c, d

ωt, град	Вариант									
	121	**122**	**123**	**124**	**125**	**126**	**127**	**128**	**129**	**130**
0	0	-106	-64,8	-106	0	106	50	-17,3	-65,5	-90
15	-61,2	-86,5	-96,2	-100	61,2	86,5	61,2	-20,7	-103,8	-77,2
30	-100	-61,2	-91	-61,2	100	61,2	86,5	-30	-110,6	-86,5
45	-106	-50	-101	0	106	50	106	-65,5	-90	-90
60	-86,5	-61,2	-144,7	61,2	86,5	61,2	100	-103,8	-77,2	-60
75	-61,2	-86,5	-179	100	61,2	86,5	61,2	-110,6	-86,5	-11,8
90	-50	-106	-159,7	106	50	106	0	-90	-90	17,3
105	-61,2	-100	-108,8	86,5	61,2	100	-61,2	-77,2	-60	20,7
120	-86,5	-61,2	-80	61,2	86,5	61,2	-100	-86,5	-11,8	30
135	-106	0	-82,8	50	106	0	-106	-90	17,3	65,5
150	-100	61,2	-68,8	61,2	100	-61,2	-86,5	-60	20,7	103,8
165	-61,2	100	-7,8	86,5	61,2	-100	-61,2	-11,8	30	110,6
180	0	106	64,8	106	0	-106	-50	17,3	65,5	90
195	61,2	86,5	96,2	100	-61,2	-86,5	-61,2	20,7	103,8	77,2
210	100	61,2	91	61,2	-100	-61,2	-86,5	30	110,6	86,5
225	106	50	101	0	-106	-50	-106	65,5	90	90
240	86,5	61,2	144,7	-61,2	-86,5	-61,2	-100	103,8	77,2	60
255	61,2	86,5	179	-100	-61,2	-86,5	-61,2	110,6	86,5	11,8
270	50	106	159,7	-106	-50	-106	0	90	90	-17,3
285	61,2	100	108,8	-86,5	-61,2	-100	61,2	77,2	60	-20,7
300	86,5	61,2	80	-61,2	-86,5	-61,2	100	86,5	11,8	-30
315	106	0	82,8	-50	-106	0	106	90	-17,3	-65,5
330	100	-61,2	68,8	-61,2	-100	61,2	86,5	60	-20,7	-103,8
345	61,2	-100	7,8	-86,5	-61,2	100	61,2	11,8	-30	-110,6
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	33	45	12	5	4,2	5	5	7	24	12
L, мГн	5	7,5	12,5	12,5	5	22,5	30	7,5	7,5	7,5
C, мкФ	25	37,5	62,5	100	25	37,5	50	37,5	37,5	37,5
Точки	a, N’	a, N’	a, f	d, N’	d, N’	N, a	N, a	A, a	d, f	d, N’

ωt, *град*	Вариант									
	131	**132**	**133**	**134**	**135**	**136**	**137**	**138**	**139**	**140**
0	-38,8	-183	-134,7	-128	38,8	183	69,7	-64,8	-122,2	-129,7
15	-128	-144,7	-169,8	-113,8	128	144,7	76,9	-67,2	-170,7	-101
30	-181	-96,9	-153	-53	181	96,9	106	-76	-171,2	-106
45	-183	-69,7	-154,4	38,8	183	69,7	128	-122,2	-129,7	-104
60	-144,7	-76,9	-200	128	144,7	76,9	113,8	-170,7	-101	-53,8
75	-96,9	-106	-231,6	181	96,9	106	53	-171,2	-106	21,2
90	-69,7	-128	-193	183	69,7	128	-38,8	-129,7	-104	64,8
105	-76,9	-113,8	-113,2	144,7	76,9	113,8	-128	-101	-53,8	67,2
120	-106	-53	-65,3	96,9	106	53	-181	-106	21,2	76
135	-128	38,8	-62	69,7	128	-38,8	-183	-104	64,8	122,2
150	-113,8	128	-40	76,9	113,8	-128	-144,7	-53,8	67,2	170,7
165	-53	181	41,4	106	53	-181	-96,9	21,2	76	171,2
180	38,8	183	134,7	128	-38,8	-183	-69,7	64,8	122,2	129,7
195	128	144,7	169,8	113,8	-128	-144,7	-76,9	67,2	170,7	101
210	181	96,9	153	53	-181	-96,9	-106	76	171,2	106
225	183	69,7	154,4	-38,8	-183	-69,7	-128	122,2	129,7	104
240	144,7	76,9	200	-128	-144,7	-76,9	-113,8	170,7	101	53,8
255	96,9	106	231,6	-181	-96,9	-106	-53	171,2	106	-21,2
270	69,7	128	193	-183	-69,7	-128	38,8	129,7	104	-64,8
285	76,9	113,8	113,2	-144,7	-76,9	113,8	128	101	53,8	-67,2
300	106	53	65,3	-96,9	-106	-53	181	106	-21,2	-76
315	128	-38,8	62	-69,7	-128	38,8	183	104	-64,8	-122,2
330	113,8	-128	40	-76,9	-113,8	128	144,7	53,8	-67,2	-170,7
345	53,1	-181	-41,4	-106	-53	181	96,9	-21,2	-76	-171,2
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	45	5	12	4,2	5	10	10	7	24	12
L, мГн	5	10	20	12,5	15	7,5	10	7,5	7,5	7,5
C, мкФ	25	50	100	100	25	37,5	50	37,5	37,5	37,5
Точки	b, N’	b, N’	b, f	f, N’	f, N’	N, b	N, b	B, b	f, g	f, N’

ωt, *град*	Вариант									
	141	**142**	**143**	**144**	**145**	**146**	**147**	**148**	**149**	**150**
0	-153	-193	-84,8	-126,8	153	193	119,9	-134,7	-182,6	-153
15	-216,5	-146,9	-76,5	-53	216,5	146,9	141,5	-131,2	-234,7	-102,1
30	-226	-118	-77,2	51,8	226	118	153	-133	-221,3	-100
45	-193	-119,9	-100	153	193	119,9	126,8	-182,6	-153	-90,4
60	-146,9	-141,5	-115,8	216,5	146,9	141,5	53	-234,7	-102,9	-20
75	-118	-153	-96,5	226	118	153	-51,8	-221,3	-100	80,1
90	-119,9	-126,7	-56,6	193	119,9	126,8	-153	-153	-90,4	134,7
105	-141,5	-53	-32,7	146,9	141,5	53	-216,5	-102,9	-20	131,2
120	-153	51,8	-31	118	153	-51,8	226	-100	80,1	133
135	-126,8	153	-20	119,9	126,8	-153	-193	-90,4	134,7	182,6
150	-53	216,5	20,7	141,5	53	-216,5	-146,9	-20	131,2	234,7
165	51,8	226	67,3	153	-51,8	-226	-118	80,1	133	221,3
180	153	193	84,8	126,8	-153	-193	-119,9	134,7	182,6	153
195	216,5	146,9	76,5	53	-216,5	-146,9	-141,5	131,2	234,7	102,9
210	226	118	77,2	-51,8	-226	-118	-153	133	221,3	100
225	193	119,9	100	-153	-193	-119,9	-126,8	182,6	153	90,4
240	146,9	141,5	115,8	-216,5	-146,9	-141,5	-53	234,7	102,9	20
255	118	153	96,5	-226	-118	-153	51,8	221,3	100	-80,1
270	119,9	126,8	56,6	-193	-119,9	-126,7	153	153	90,4	-134,7
285	141,5	53	32,7	-146,9	-141,5	-53	216,5	102,9	20	-131,2
300	153	-51,8	31	-118	-153	51,8	226	100	-80,1	-133
315	126,8	-153	20	-119,9	-126,8	153	193	90,4	-134,7	-182,6
330	53	-216,5	-20,7	-141,5	-53	216,5	146,9	20	-131,2	-234,7
345	-51,8	-226	-67,3	-153	51,8	226	118	-80,1	-133	-221,3
Номер схемы	1	3	7	5	6	2	4	8	9	10
R, Ом	5	4,2	12	5	10	12	12	7	24	12
L, мГн	7,5	10	20	37,5	5	7,5	10	10	10	10
C, мкФ	37,5	50	100	100	25	37,5	50	50	50	50
Точки	c, N’	c, N’	b, g	g, N’	g, N’	N, c	N, c	C, c	g, d	g, N

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий А.Ф.Теория линейных электрических цепей [Электронный ресурс] : учебник - 3-е изд. Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 544 с. — ISBN 978-5-8114-0905-1. Лань : электронно-библиотечная система. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/91910

2. Башарин С..А.Теоретические основы электротехники : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / С. А. Башарин, В.В.Федоров. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 384 с. — (Сер. Бакалавриат).