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)

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

## Учебно-методическое пособие

Часть 2

**Зерноград**
**2024**

Об издании – *1*
Содержание

**УДК 621.3 (075.8)**

**Теоретические основы электротехники** [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие. Часть 2. / Сост. О.Б. Забродина, А.М. Исупова, О.В. Кобзистый – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024. – 82 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Учебно-методическое пособие включает методические указания к выполнению лабораторных работ и решению индивидуальных задач по дисциплине «Теоретические основы электротехники», часть 2 и предназначено для студентов очного и заочного отделений, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» профиль «Электрооборудование и электротехнологии»

Утверждено методической комиссией по направлениям подготовки 35.03.06 и 35.04.06 Агроинженерия направленности «Электрооборудование и электротехнологии»

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

ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ..... 4
ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ..... 4
ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ. ..... 5
СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО СДАЧА ..... 6
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 «**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ОДНОРОДНОЙ НАГРУЗКОЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЕЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ**» ..... 7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9 «**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С НЕОДНОРОДНОЙ НАГРУЗКОЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЕЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ**» 13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 «**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ ПРИ ОДНОРОДНОЙ НАГРУЗКЕ**» ..... 20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 «**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ ПРИ НЕОДНОРОДНОЙ НАГРУЗКЕ**» ..... 30
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12 «**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ R И C**» ..... 37
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13 «**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**» ..... 48
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ..... 57
**ПРИЛОЖЕНИЯ** ..... 58
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 8 ..... 59
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 9 ..... 62
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 10 ..... 66
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 11 ..... 70
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 12 ..... 74
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 13 ..... 80

## ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Лабораторные работы являются одним из видов практического обучения. Их цель - закрепить теоретические знания, проверить на опыте некоторые положения теории и законы электротехники, приобрести практические навыки в сборке электрических цепей, в проведении эксперимента, научить пользоваться простейшими электроизмерительными приборами и аппаратами.

Вдумчивое отношение к лабораторной работе позволит студенту сделать правильные выводы, проанализировать результаты опытов, научиться разрешать некоторые несложные задачи исследовательского характера.

Чтобы успешно выполнить лабораторные работы, студенту необходимо качественно подготовиться к ним. При подготовке к лабораторной работе студент должен выполнить следующее:

- подготовить теоретический материал по конспекту и учебнику (см. список литературы);
- ознакомиться с описанием лабораторной работы. В специальной рабочей тетради записать номер и название работы, вычертить таблицы для записи показаний приборов и результатов расчета, схемы исследуемых электрических цепей, а также подготовить миллиметровую бумагу для графических построений;
- уяснив цель работы, четко представить себе поставленную задачу и способы ее достижения, продумать ожидаемые результаты опытов;
- сделать предварительные расчеты, если это необходимо согласно заданию, или только записать необходимые формулы;
- ответить устно или письменно на контрольные вопросы.

## ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Прежде чем приступить к сборке электрической цепи, следует выбрать необходимые приборы и аппараты. В описании каждой лабораторной работы приводится порядок проведения опыта и перечень необходимой аппаратуры. При выборе измерительных приборов следует учитывать их тип, предел измерений, род тока, класс точности.

Выбрав предел измерений прибора, необходимо определить цену деления и только тогда приступить к измерениям.

# ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ.

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) для помещений без повышенной опасности поражения током, к которым относится лаборатория теоретических основ электротехники, безопасным считается напряжение до 42 В.

Сопротивление тела человека определяется главным образом сопротивлением кожного покрова и может составлять 200...500 кОм. Увлажнение или повреждение кожи снижает сопротивление до 600..800 Ом (большое влияние на снижение сопротивления оказывает также общее состояние организма и нервной системы). Таким образом, при указанном напряжении через человека, находящегося в нормальном состоянии, протекает ток 0,1..0,3 мА. Известно, что ток в 50 мА может привести к травме, а в 100 мА - к смертельному исходу.

Следует иметь в виду, что при токе даже менее чем 50 мА мышцы кистей рук непроизвольно сокращаются, и токоведущая часть может оказаться зажатой в кулаке. В этом случае иногда не удается разжать руку и прервать ток через тело.

Приведем основные правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ в лаборатории теоретических основ электротехники:

1. Перед началом сборки электрической цепи следует убедиться в том, что автоматический выключатель на лабораторном столе находится в выключенном состоянии.
2. Не допускается использование приборов и аппаратов с неисправными клеммами, проводов с поврежденной изоляцией, неисправных реостатов, тумблеров и др.
3. Собранная электрическая цепь должна быть проверена преподавателем или лаборантом и может включаться только с его разрешения.
4. Перед включением электрической цепи необходимо убедиться, что никто не прикасается к оголенным токоведущим частям.
5. Все необходимые изменения в электрических цепях нужно производить только при выключенном напряжении. Всякие изменения в электрической цепи должны быть проверены преподавателем.
6. Учащимся не разрешается производить какие-либо переключения на главном распределительном щите лаборатории.
7. Если во время работы возникает аварийная ситуация, в результате чего появляется дым, специфический запах или нагреваются проводники, то следует немедленно выключить напряжение и сообщить преподавателю о случившемся.

8. Если кто-либо попадет под напряжение и не сможет сам оторваться от токоведущих частей цепи, то не пытайтесь его оттащить - вы сами будете поражены током. **Немедленно отключите напряжение**! Сообщите о случившемся преподавателю.

9. Учащиеся допускаются к работам в лаборатории теоретических основ электротехники после ознакомления с настоящими правилами, что должно быть зафиксировано в журнале по технике безопасности.

## СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА И ЕГО СДАЧА

Отчет по лабораторной работе является документом о проделанной работе, поэтому он должен иметь все необходимые сведения для проверки результатов опытов и расчета. Составление отчета является индивидуальной работой каждого члена бригады. Отчет должен содержать название и номер лабораторной работы, цель ее, перечень приборов и оборудования, оформленный в виде табл. 1в, схемы электрических цепей, программу работы, расчетные формулы и сами расчеты, таблицы результатов измерений и расчетов, графики полученных зависимостей и выводы.

Таблица 1в - Паспортные данные приборов и оборудования

| № п/п | Наименование | Система | Тип | Класс точности | Пределы измерений | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |

Отчеты выполняются с учетом действующих стандартов на оформление текстовых документов (ЕСКД).

Схемы, таблицы, графики и другие построения выполняются карандашом с помощью чертежных инструментов.

После выполнения лабораторной работы и подготовки отчета, проводится его сдача. Учащиеся должны знать теорию по данной теме, уметь собирать цепь и рассказать ход лабораторной работы, пояснить, как проводились расчеты, уметь проанализировать полученные результаты и объяснить причины расхождения расчетных и опытных данных.

Сдача отчетов по лабораторным работам проводится систематически в определенное преподавателем время (как правило, в часы следующей лабораторной работы или в часы индивидуальной работы).

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8
# «ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ОДНОРОДНОЙ НАГРУЗКОЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЕЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование симметричного и несимметричных режимов трехфазной однородной нагрузки при соединении ее треугольником.

## 8.1. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- амперметры электромагнитной системы с пределом измерений 1А – 3 шт.;
- амперметры электромагнитной системы с пределом измерений 2А – 3 шт.;
- катушки индуктивности с одинаковыми параметрами – 3 шт.;
- вольтметр электромагнитной системы – 1 шт.;
- ваттметр однофазный многопредельный – 1 шт.

## 8.2. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится два академических часа.

## 8.3. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Под трехфазной системой понимается совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС (напряжения) одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$, создаваемые общим источником электрической энергии.

Если энергия подается потребителю по трехпроводной линии, то сопротивления нагрузки могут быть соединены двумя способами: по способу трехлучевой звезды или по способу треугольника.

Допустим, имеется три однофазных приемника электроэнергии. Обозначим один из выводов каждого приемника буквами A, B и C. Второй вывод обозначим буквами X, Y и Z соответственно. Для соединения треугольником необходимо второй вывод первого приемника (X) соединить с первым выводом второго (B), второй вывод второго (Y) – с первым выводом третьего (C), второй вывод третьего (Z) – с первым выводом первого (A). К узлам полученного треугольника подводят линейные провода от трехфазной сети (рис.8.1).

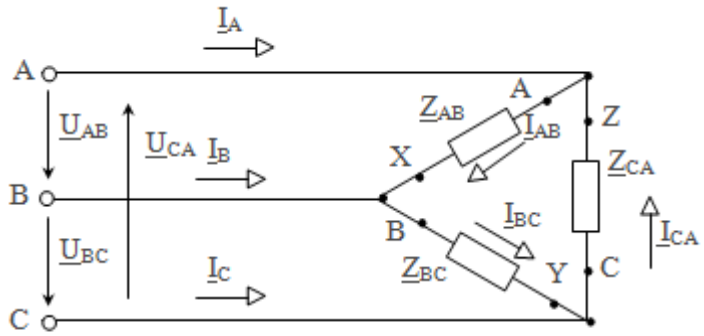



Рис.8.1

Если комплексы полных сопротивлений отдельных приемников равны между собой

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z},$$

то такую нагрузку называют симметричной.

Так как $\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$, то условия симметрии можно записать так:

$$\underline{Z} = Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} \text{ и } \varphi_{ав} = \varphi_{вс} = \varphi_{са} = \varphi.$$

Если сопротивления по модулю различны, но $\varphi_{ав} = \varphi_{вс} = \varphi_{са}$, то нагрузка называется однородной.

Напряжения между проводами А, В и С линии называются линейными (или междуфазными). Если линейные напряжения $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_л$ и сдвинуты относительно друг друга на угол 120°, то трехфазная система напряжений является симметричной. Тогда можно принять

$$\underline{U}_{AB} = U_{AB} \cdot e^{j0^o}; \underline{U}_{BC} = U_{BC} \cdot e^{-j120^o}; \underline{U}_{CA} = U_{CA} \cdot e^{j120^o}. \quad (8.1)$$

Такой порядок чередования фаз называют прямым. Если же напряжение $\underline{U}_{BC}$ опережает $\underline{U}_{AB}$, а $\underline{U}_{CA}$ – отстает от $\underline{U}_{AB}$ на 120°, то порядок чередования называют обратным. Как правило, применяется прямой порядок чередования фаз. Порядок чередования фаз важно знать при подключении динамической нагрузки (электродвигатели) и в некоторых других случаях.

Под действием линейных напряжений по проводам, соединяющим источник энергии с нагрузкой, протекают линейные токи $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$. В фазах нагрузки будут фазные токи $\underline{I}_{AB}$, $\underline{I}_{BC}$ и $\underline{I}_{CA}$.

Согласно первому закону Кирхгофа имеем:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA};$$
$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}; \qquad (8.2)$$
$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}.$$

Построим векторную диаграмму токов и напряжений (рис.8.2) для симметричной цепи при активно-индуктивной нагрузке (φ > 0).

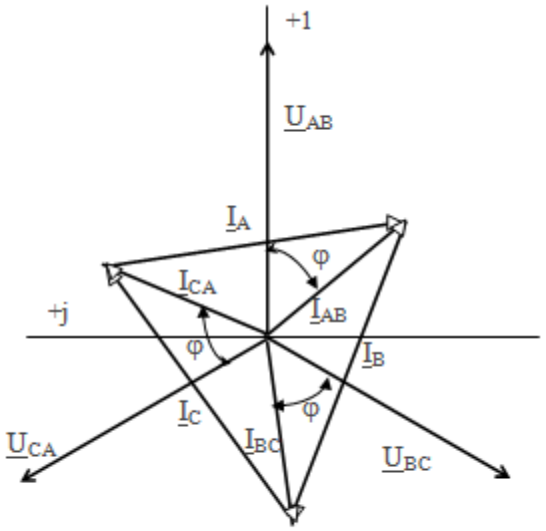


Рис.8.2

Обозначим
$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_{ф}.$$

Из векторной диаграммы следует, что

$$I_A = I_B = I_C = \sqrt{3}\, I_{ф}. \qquad (8.3)$$

Диаграмму (рис.8.2) удобно использовать при анализе несимметричных режимов. Крайним случаем несимметрии является обрыв фазы нагрузки. Допустим, произошел обрыв фазы АВ. Тогда $I_{AB} = 0$. Из уравнений (8.2) следует, что

$$\underline{I}_A = -\underline{I}_{CA}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{BC};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}.$$

Построим векторную диаграмму (рис. 8.3).

Аналогично, при обрыве двух фаз, например $I_{AB} = 0$ и $I_{BC} = 0$, из уравнения (8.2) получим:

$$\underline{I}_A = -\underline{I}_{CA};$$
$$\underline{I}_B = \underline{0};$$
$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA}.$$

При обрыве линейного провода цепь можно рассматривать как однофазную.

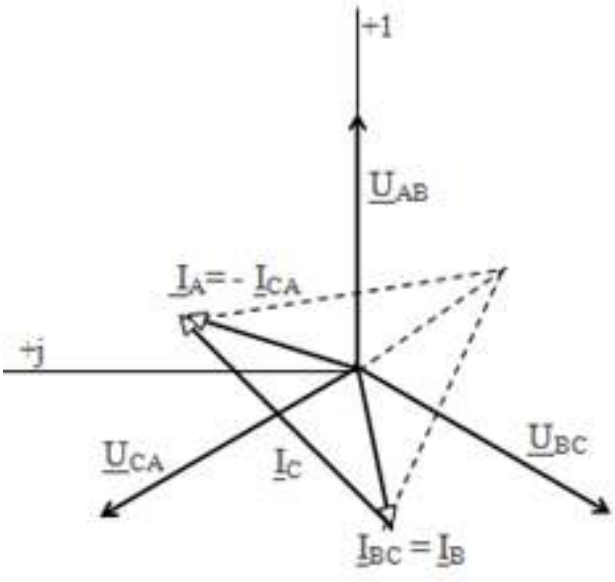


Рис. 8.3

## 8.4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы следует соблюдать общие правила по технике безопасности. Не допускается создание несимметричного режима путем уменьшения фазного сопротивления во избежание короткого замыкания.

## 8.5. ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием и записать их паспортные данные в таблицу установленной формы (табл. 1в).

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис.8.4. После проверки электрической цепи преподавателем подключить ее к источнику питания при замкнутом положении выключателей *S1, S2* и *S3* и по показаниям приборов убедиться в том, что цепь симметрична.

3. Измерить $U_{AB}$, $I_{AB}$, $P_{AB}$ и вычислить параметры катушки:

$$Z_{AB} = \frac{U_{AB}}{I_{AB}};\ R_{AB} = \frac{P_{AB}}{I_{AB}^2};\ X_{AB} = \sqrt{Z_{AB}^2 - R_{AB}^2};\ \varphi_{AB} = arctg\,\frac{X_{AB}}{R_{AB}}.$$

4. Измерить токи, напряжения и мощности для режимов, указанных в таблице 8.1.

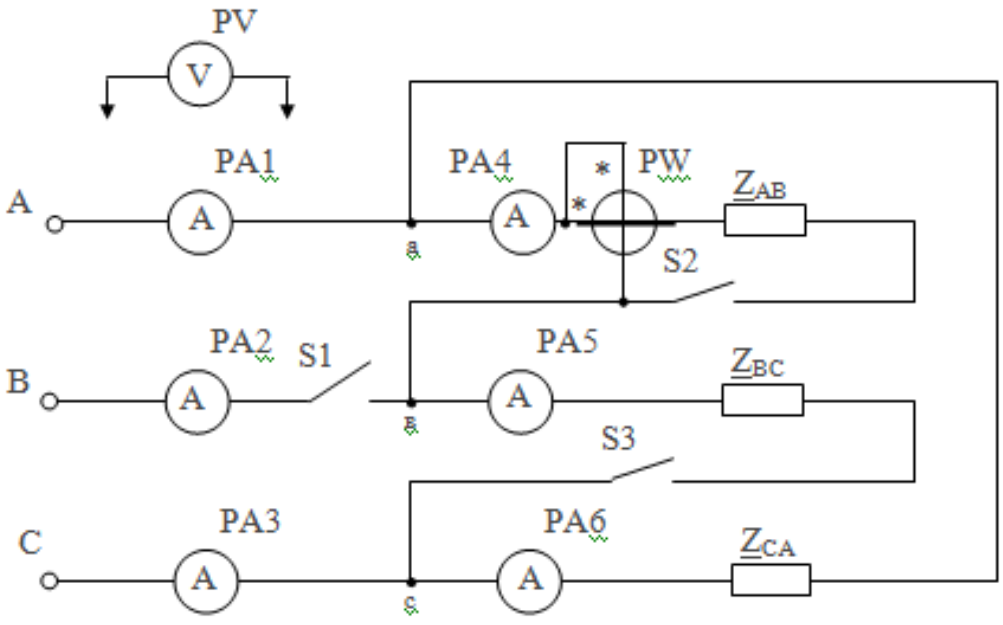



Рис.8.4

Таблица 8.1

| Режим работы | Результаты измерений | | | | | | | | | Результаты вычислений | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $U_{AB}$ | $U_{BC}$ | $U_{CA}$ | $I_A$ | $I_B$ | $I_C$ | $I_{AB}$ | $I_{BC}$ | $I_{CA}$ | $P$ | $Q$ | $S$ | $cos\varphi$ |
| | В | В | В | А | А | А | А | А | А | Вт | ВАр | ВА | - |
| 1.Симметричный | | | | | | | | | | | | | |
| 2.Обрыв фазы «ав» | | | | | | | | | | | | | |
| 3.Обрыв фазы «вс» | | | | | | | | | | | | | |
| 4. Обрыв фаз «ав» и «вс» | | | | | | | | | | | | | |
| 5. Обрыв линейного провода «в» | | | | | | | | | | | | | |

5. Построить векторные диаграммы для всех режимов.

6. Вычислить активную $P$, реактивную $Q$ и полную $S$ мощности трехфазной цепи, а также коэффициент мощности для всех режимов

$$P = \sum I^2 \cdot R;\ Q = \sum I^2 \cdot X;\ S = \sqrt{P^2 + Q^2};\ \cos\varphi = \frac{P}{S}.$$

7. Измерить показание ваттметра в симметричном режиме. По показанию ваттметра рассчитать активную мощность всей цепи и сравнить с вычисленным в п.6 значением активной мощности $P$.

8. Выполнить индивидуальное задание № 8 (см. Приложение). Номер варианта принимается по заданию преподавателя.

## 8.7. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать: электрическую схему исследуемой цепи; таблицы приборов и опытных данных; построенные в масштабе топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов; выводы. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №8.

## 8.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как определить линейные токи, если фазные токи нагрузки, соединенной треугольником, известны?

2. Какие имеются соотношения между фазными и линейными токами в симметричной цепи при соединении треугольником?

3. Какой порядок чередования фаз называется прямым (обратным)?

4. Изменятся ли результаты вычислений по п. 3, если измерения произвести при отключенном положении тумблера *S1*?

5. Во сколько раз уменьшится потребляемая из сети мощность, если отключить тумблер *S2* или (*S2* и *S3*)?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

# «ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С НЕОДНОРОДНОЙ НАГРУЗКОЙ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЕЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

## 9.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование трехфазной цепи с неоднородной нагрузкой, соединенной по способу треугольника, получение навыка построения и анализа векторных диаграмм.

## 9.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- катушки индуктивности – 3 шт.;
- вольтметр – 1 шт.;
- амперметры с пределом измерения до 1 А – 3 шт.;
- амперметры с пределом измерения до 2 А – 3 шт.;
- ваттметры однофазные многопредельные – 2 шт.;
- батарея конденсаторов – 1шт.

## 9.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится два академических часа.

## 9.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Если к трехфазной цепи подключить три потребителя $\underline{Z}_{ав}=Z_{ав}e^{j\varphi ав}$; $\underline{Z}_{вс}=Z_{вс}e^{j\varphi вс}$; $\underline{Z}_{са}=Z_{са}e^{j\varphi са}$ у которых $\varphi_{ав} \neq \varphi_{вс} \neq \varphi_{са}$, то такая нагрузка называется неоднородной. Неоднородная нагрузка получается в тех случаях, когда параллельно или последовательно одной из фаз однородной нагрузки подключается потребитель с другим коэффициентом мощности.

Рассмотрим электрическую цепь рис.9.1. Пусть $\underline{Z}=Ze^{j\varphi}$, $\varphi > 0$, $C = var$. Пусть система линейных напряжений $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$ симметрична.

При $C = 0$ система симметрична.

При $C > 0$ $\underline{I} = \underline{I}'_{AB} + \underline{I}_к$, где $\underline{I}_к$ – ток конденсатора.

$$\underline{I}_к = \frac{\underline{U}_{AB}}{-jX_C}; \qquad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

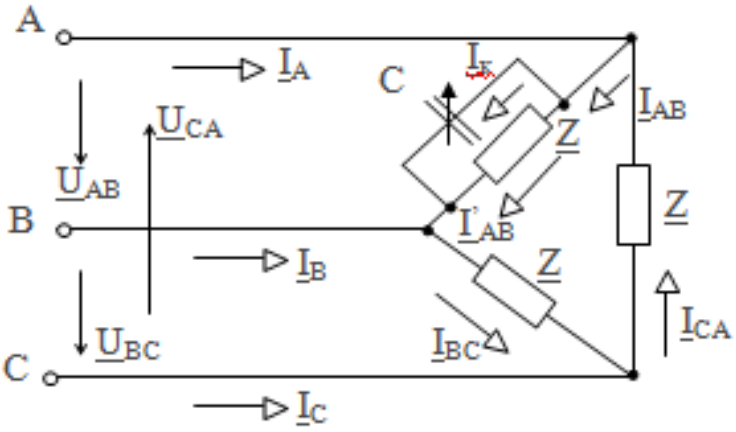



Рис.9.1

Таким образом, нагрузка цепи стала неоднородной. Построим векторную диаграмму токов и напряжений при $X_C = Z$ (рис.9.2) при прямом (а) и обратном (б) порядке чередования фаз, используя уравнения: $\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}$ ; $\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}$ ; $\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}$.

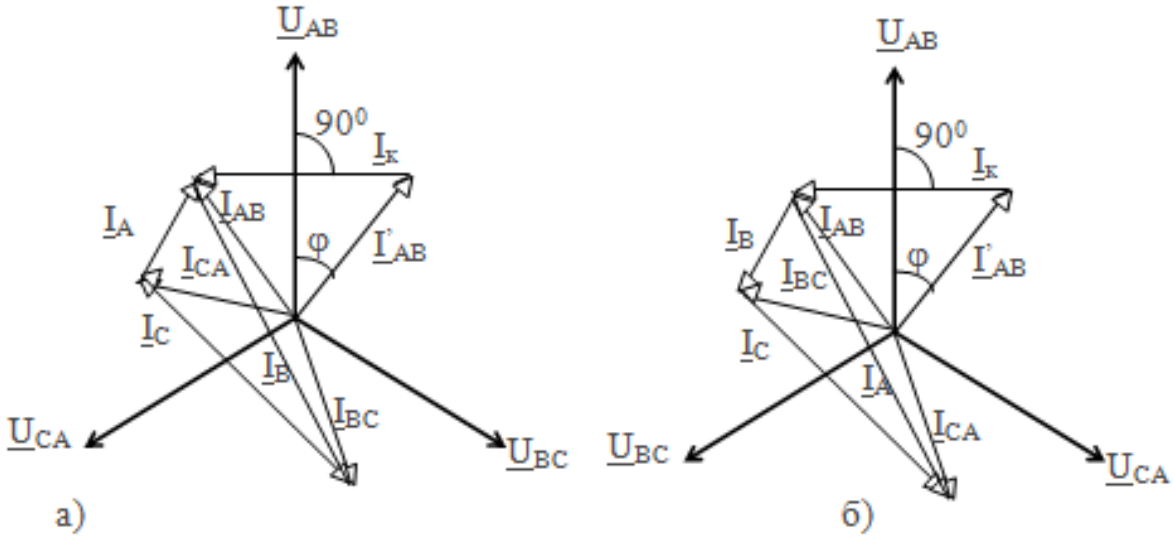



Рис.9.2

Из векторной диаграммы рис. 9.2а следует, что при увеличении емкостного тока $\underline{I}_к$ линейный ток $\underline{I}_A$ сначала уменьшается, а затем снова возрастает. При некотором сочетании параметров катушки и емкости С может оказаться, что $\underline{I}_A = 0$, то есть линейные токи при неоднородной

нагрузке могут резко отличаться по значению, даже если фазные токи почти одинаковы.

При обратном чередовании фаз уменьшается другой линейный ток *($\underline{I}_B$)*. Следовательно, такую схему можно использовать для определения порядка чередования фаз.

Активная мощность, поступающая из сети, может отличаться по фазам, но в любом случае она равна сумме мощностей, потребляемых в активных сопротивлениях фаз

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}.$$

Выразим эту мощность через комплексы соответствующих напряжений и токов

$$P = Re\tilde{S} = Re\underline{U}_{AB} \cdot \overset{*}{\underline{I}}_{AB} + Re\underline{U}_{BC} \cdot \overset{*}{\underline{I}}_{BC} + Re\underline{U}_{CA} \cdot \overset{*}{\underline{I}}_{CA} =$$

$$= Re\underline{U}_{AB} \cdot \overset{*}{\underline{I}}_{AB} + Re\underline{U}_{BC} \cdot \overset{*}{\underline{I}}_{BC} - Re\left(\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC}\right)\overset{*}{\underline{I}}_{CA} =$$

$$= Re\underline{U}_{AB}\left(\overset{*}{\underline{I}}_{AB} - \overset{*}{\underline{I}}_{CA}\right) + Re\underline{U}_{CB}\left(\overset{*}{\underline{I}}_{CA} - \overset{*}{\underline{I}}_{BC}\right) = Re\underline{U}_{AB} \cdot \overset{*}{\underline{I}}_{A} + Re\underline{U}_{CB} \cdot \overset{*}{\underline{I}}_{C} =$$

$$= P_{W1} + P_{W2}.$$

Отсюда следует, что активная мощность трехфазной системы при любой нагрузке (симметричной или несимметричной, однородной или неоднородной) может быть измерена двумя однофазными ваттметрами, если их включить в соответствии с полученной формулой (рис.9.3)

$$P = P_{W1} + P_{W2.}$$

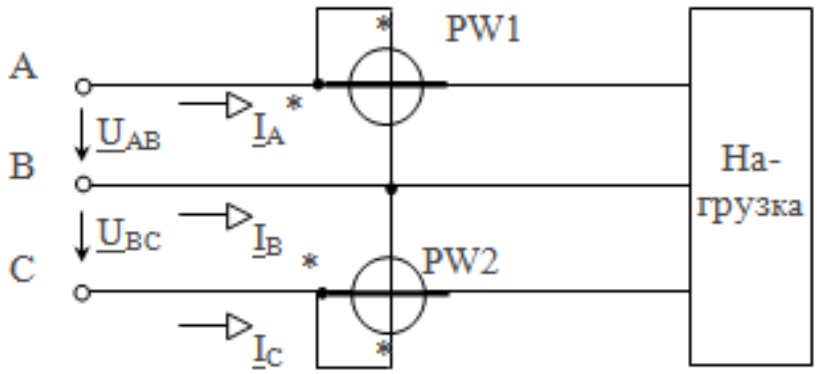



Рис.9.3

Для симметричной цепи активную мощность можно вычислить по известной формуле

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

По показаниям тех же двух ваттметров можно также определить реактивную мощность, но только для симметричной цепи, что следует из векторной диаграммы рис.9.4.

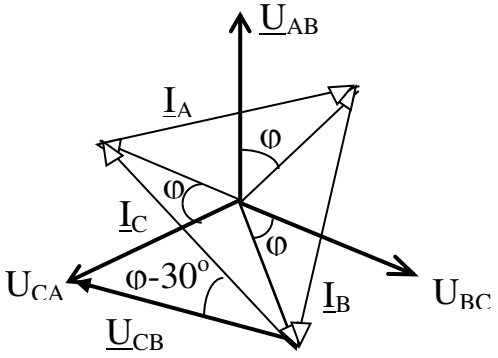



Рис. 9.4

Действительно,

$$P_{W2} - P_{W1} = U_{CB} I_C \cdot \cos\left(\varphi - 30^o\right) - U_{AB} I_A \cdot \cos\left(\varphi + 30^o\right) =$$

$$= U_л I_л \cdot [\cos(\varphi - 30^o) - \cos(\varphi + 30^o)] = U_л I_л \cdot 2 \sin 30^o \cdot \sin\varphi = \frac{Q}{\sqrt{3}},$$

поэтому $Q = \sqrt{3}\left(P_{W2} - P_{W1}\right)$.

Если нагрузка неоднородная, то цепь становится несимметричной, тогда

$$Q = Q_{AB} + Q_{BC} + Q_{CA},$$

где $Q_{AB} = U_{AB} \cdot I_{AB} \cdot \sin\varphi_{AB}$; $\quad Q_{BC} = U_{BC} \cdot I_{BC} \cdot \sin\varphi_{BC}$;

$$Q_{CA} = U_{CA} \cdot I_{CA} \cdot \sin\varphi_{CA}.$$

Полная мощность трехфазной системы

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}\ .$$

Реактивную и полную мощности вычисляют в тех случаях, когда необходимо определить эквивалентное значение коэффициента мощности

$$\cos\varphi_э = \frac{P}{S}.$$

## 9.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы следует соблюдать общие правила по технике безопасности в лаборатории ТОЭ. После отключения цепи следует разрядить батарею конденсаторов.

## 9.6. ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, записать их паспортные данные в таблицу 1в.

2. Собрать электрическую цепь по схеме рис.9.5.

3. Установить значение емкости конденсаторов *C=0*, включить цепь под напряжение и записать показания приборов в таблицу 9.1.

4. Увеличить емкость *C* до значения, при котором ток в линейном проводе A станет минимальным. Записать показания приборов в таблицу 9.1.

5. Повторить опыт п.4. при несимметрии питающих напряжений (обрыв линейного провода B). Записать показания приборов в таблицу 9.1.

6. Изменить порядок чередования фаз, поменяв местами фазы B и C, и повторить опыты п.п.3 и 4. Записать показания приборов в таблицу 9.1.

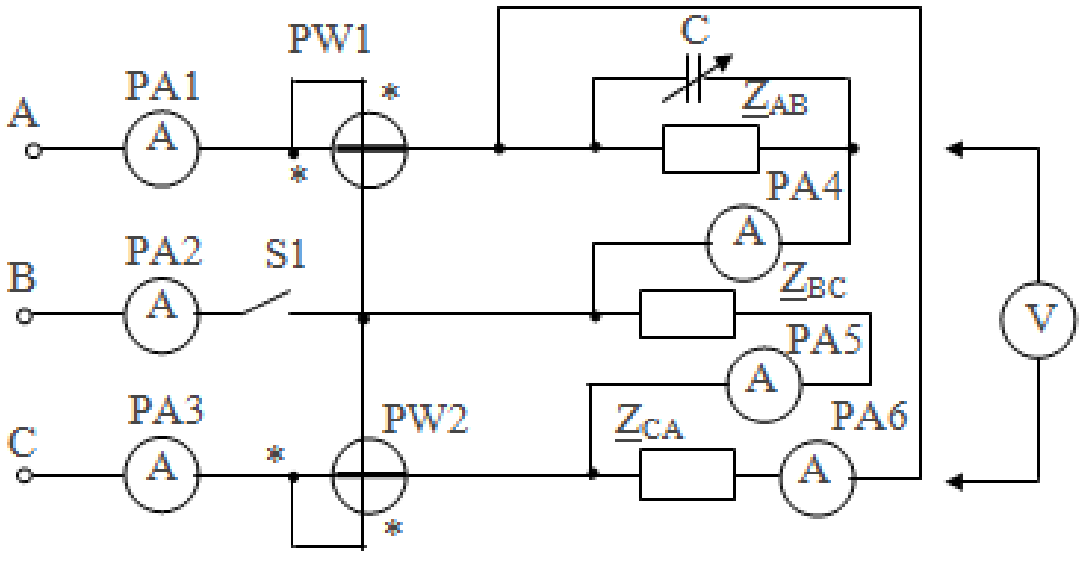



Рис.9.5.

Таблица 9.1

| Режим работы | Результаты измерений | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $U_{AB}$ | $U_{BC}$ | $U_{CA}$ | $I_A$ | $I_B$ | $I_C$ | $I_{AB}$ | $I_{BC}$ | $I_{CA}$ | $P1$ | $P2$ | $\Sigma P$ |
| | В | В | В | А | А | А | А | А | А | Вт | Вт | Вт |
| 1.Симметричный режим | | | | | | | | | | | | |
| 2.Ток фазы А минимальный | | | | | | | | | | | | |
| 3.Обрыв линейного провода «в» | | | | | | | | | | | | |
| 4. Изменение порядка чередования фаз | | | | | | | | | | | | |

7. Построить векторные диаграммы для всех режимов.

8. Рассчитать активную $P$, реактивную $Q$ и полную $S$ мощности трехфазной цепи, а также коэффициент мощности для всех режимов и занести результаты вычислений в таблицу 9.2.

$$P = \sum I^2 \cdot R;\ Q = \sum I^2 \cdot X;\ S = \sqrt{P^2 + Q^2};\ \cos\varphi = \frac{P}{S}.$$

Таблица 9.2

| Режим работы | Результаты вычислений | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\Sigma P$ | $P$ | $Q$ | $S$ | $cos\varphi$ |
| | Вт | Вт | вар | ВА | - |
| 1.Симметричный режим | | | | | |
| 2.Ток фазы А минимальный | | | | | |
| 3.Обрыв линейного провода «в» | | | | | |
| 4. Изменение порядка чередования фаз | | | | | |

9. Сравнить рассчитанные значения активной мощности $P$ с измеренным значением $\Sigma P$.

10. Выполнить индивидуальное задание № 9. Номер варианта принимается по заданию преподавателя.

## 9.7. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать электрическую схему исследуемой цепи, таблицы приборов и опытных данных, построенные в масштабе векторные диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов, и выводы. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №9.

## 9.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Можно ли по показаниям амперметров, включенных на фазные токи, определить линейные токи, если нагрузка неоднородная?
2. Зависят ли линейные токи от порядка чередования фаз при неоднородной нагрузке? Показать на примере.
3. Будут ли одинаковыми показания ваттметров PW1 и PW2 на рис. 9.5 при одинаковых линейных токах? Почему?
4. Как определить полную мощность, если известны показания ваттметров PW1 и PW2 на рис. 9.5 и цепь симметрична?
5. Чему равно напряжение на емкости при разомкнутом ключе S1 (рис. 9.5)?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10
# «ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ ПРИ ОДНОРОДНОЙ НАГРУЗКЕ»

## 10.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться опытным путем с особенностью соединения однородной нагрузки звездой в симметричном и несимметричном режимах при трехпроводной и четырехпроводной системах питания.

## 10.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:
- вольтметры электромагнитной системы с пределом измерений 100 В – 5 шт.;
- амперметры электромагнитной системы с пределом измерений 2А – 4 шт.;
- активные сопротивления на 100 Ом – 3 шт.;
- выключатели однополюсные – 4 шт.

## 10.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится два академических часа.

## 10.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Как и любая электрическая цепь, трехфазная цепь состоит из источника питания, нагрузки и соединительных проводов.

В электротехнических расчетах источниками питания являются трехфазные генераторы переменного тока или силовые трехфазные трансформаторы. На схеме замещения они представлены источником трехфазной электродвижущей силы (ЭДС) или, с учетом внутреннего сопротивления, трехфазной системой напряжения. В большинстве случаев, предполагается, что система напряжений симметрична, то есть амплитуды (действующие значения) синусоидальных напряжений равны и во времени сдвинуты друг относительно друга на одинаковый угол в 120 электрических градусов.

Наиболее распространенной трехфазной нагрузкой (потребителем) является электродвигатель. На схеме замещения он представлен тремя активно-индуктивными сопротивлениями. В общем случае, электродвигатель можно отнести к однородной нагрузке, так как он имеет в каждой

фазе одинаковые по характеру сопротивления. Комплексы сопротивлений соответственно равны

$$\underline{Z}_a = Z_a \cdot e^{j\varphi_a}, \quad \underline{Z}_b = Z_b \cdot e^{j\varphi_b}, \quad \underline{Z}_c = Z_c \cdot e^{j\varphi_c}$$

и, в силу однородности, их аргументы

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi.$$

Здесь буквами a, b и c условно обозначены фазы цепи.

Кроме электродвигателя существуют также другие трехфазные потребители, обладающие как одинаковыми, так и различными по характеру сопротивлениями.

Сопротивления трехфазной нагрузки и обмотки источника питания имеют несколько способов соединений. Одним из них является – “звезда”. При таком способе соединения концы сопротивлений нагрузки и, отдельно, концы обмоток генераторов или трансформаторов соединяются вместе, образуя общую точку, называемую нейтральной точкой. Начала обмоток источников и нагрузки соединяются друг с другом посредством соединительных (линейных) проводов. В качестве примера на рис.10.1 приведена расчетная схема участка электрической трехфазной цепи, состоящего из генератора переменного тока и потребителя, соединенных по схеме “звезда” - “звезда”.

По количеству проводов, соединяющих источник питания и потребитель, различают трехфазные трехпроводные цепи и трехфазные четырехпроводные цепи. В последних, кроме трех фазных проводов дополнительно используется нулевой провод, соединяющий нейтральные точки “звезды” источника питания и “звезды” потребителя. На рис.10.1 нулевой провод показан пунктиром.

В отличие от однофазных цепей, в трехфазных цепях существуют понятия линейных, фазных токов и напряжений, напряжения смещения нейтрали и тока в нулевом проводе.

Фазным называется ток, протекающий в фазах нагрузки. Линейным называется ток, протекающий в проводах, которые соединяют источник питания и потребитель. Очевидно, что при соединении потребителя по схеме “звезда”, фазные и линейные токи будут равны ($\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$). Положительное направление этих токов условно принимают от источника питания к нагрузке.

В каждой фазе источника питания генерируются фазные ЭДС и напряжения ($\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, и $\underline{U}_C$). Положительными направлениями фазных напряжений источника питания считают направления от начала к концу

обмотки генератора или трансформатора. При протекании тока через сопротивления нагрузки, в последних возникают падения напряжения, называемые фазными напряжениями нагрузки ($\underline{U}_a$, $\underline{U}_b$, и $\underline{U}_c$). Положительные направления этих напряжений совпадают с положительными направлениями токов в фазах нагрузки.

Схема замещения электрической цепи при соединении источника питания и потребителя “звездой”

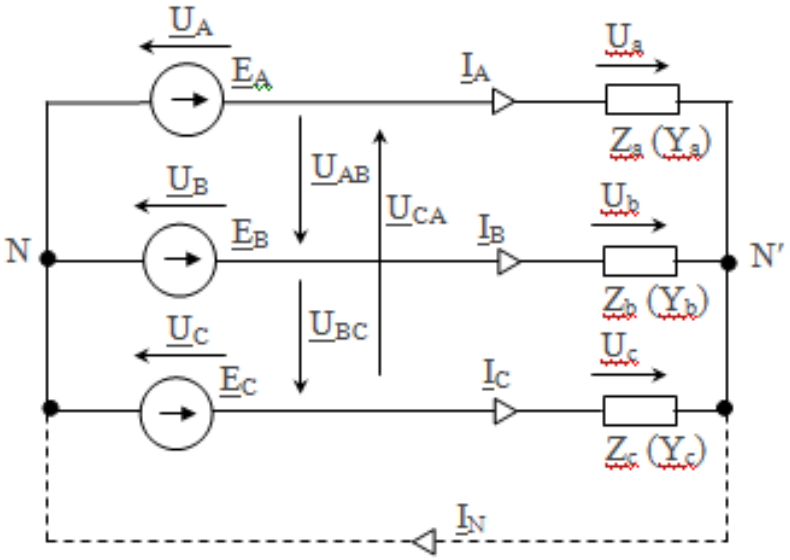



Рис.10.1

Линейными называют напряжения между соединительными проводами трехфазной цепи ($\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, и $\underline{U}_{CA}$). Положительные направления линейных напряжений показаны на рис.10.1. При соединении источника питания или потребителя по схеме “звезда” фазные напряжения не будут равны линейным. Связаны фазные и линейные напряжения уравнениями, полученными по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \\ \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \\ \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \end{cases}$$

При симметричной системе фазных напряжений их комплексы записываются в следующем виде

$$\underline{U}_A = U_\phi;$$

$$\underline{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j120^o};$$

$$\underline{U}_C = U_\phi \cdot e^{j120^o}.$$

Причем, начальная фаза $\underline{U}_A$ не всегда равна нулю.

Подставив эти выражения в приведенную выше систему уравнений, получим более простую связь между действующими значениями фазных и линейных напряжений для симметричной цепи.

$$U_л = \sqrt{3} \cdot U_\phi.$$

При питании однородной нагрузки, соединенной по схеме “звезда”, симметричной системой напряжений наблюдается ряд особенностей.

При равенстве модулей сопротивлений однородной нагрузки токи в фазах устанавливаются симметричными, то есть действующие значения токов равны и вектора их сдвинуты друг относительно друга на одинаковый угол в 120 электрических градусов

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_a} = \frac{U_\phi}{Z \cdot e^{j\varphi}} = I_\phi \cdot e^{-j\varphi};$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_b} = \frac{U_\phi \cdot e^{-j120}}{Z \cdot e^{j\varphi}} = I_\phi \cdot e^{-j\varphi} \cdot e^{-j120} = \underline{I}_A \cdot e^{-j120};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c} = \frac{U_\phi \cdot e^{j120}}{Z \cdot e^{j\varphi}} = I_\phi \cdot e^{-j\varphi} \cdot e^{j120} = \underline{I}_A \cdot e^{j120}.$$

Фазные напряжения на нагрузке также симметричны и, если пренебречь сопротивлениями соединительных проводов, совпадают с фазными напряжениями источника питания

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A = U_\phi;$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j120^o};$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C = U_\phi \cdot e^{j120^o}.$$

Пример векторной диаграммы такого режима представлен на рис.10.2.

Топографическая диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов

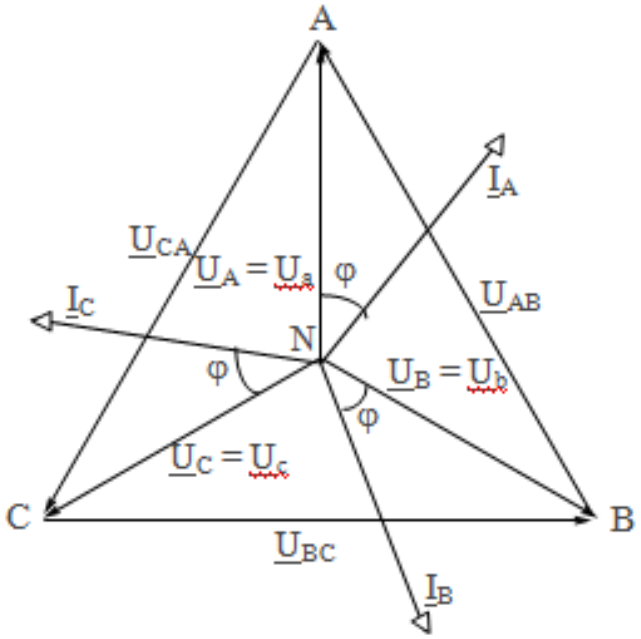



Рис.10.2

Если модули сопротивлений однородной нагрузки не равны друг другу, то система токов будет уже несимметрична. Симметрия фазных напряжений на нагрузке зависит от того, какая цепь используется: трехфазная трехпроводная или трехфазная четырехпроводная.

В случае применения трехфазной трехпроводной цепи потенциал нейтральной точки “звезды” потребителя становится отличным от потенциала нейтральной точки “звезды” источника питания. В результате этого между ними появляется напряжение, называемое напряжением смещения нейтрали

$$\underline{U}_{NN'} = \underline{\varphi}_{N'} - \underline{\varphi}_N .$$

За положительное направление напряжения смещения нейтрали принимают направление от нейтральной точки “звезды” потребителя к нейтральной точке “звезды” источника питания. Рассчитывается напряжение смещения нейтрали по методу двух узлов

$$\underline{U}_{NN'} = \frac{\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

здесь $\underline{Y}_a$, $\underline{Y}_b$ и $\underline{Y}_c$ - комплексные проводимости фаз нагрузки.

Фазные напряжения на нагрузке, равные по второму закону Кирхгофа геометрической разности между фазными напряжениями ис-

точника питания и напряжением смещения нейтрали, устанавливаются несимметричными

$$\begin{cases} \underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{NN'}; \\ \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{NN'}; \\ \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{NN'}. \end{cases}$$

Вследствие этого, система токов в трехпроводной цепи также будет несимметричной

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c}.$$

Пример векторной диаграммы такого режима при активной нагрузке приведен на рис.10.3.

Топографическая диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов

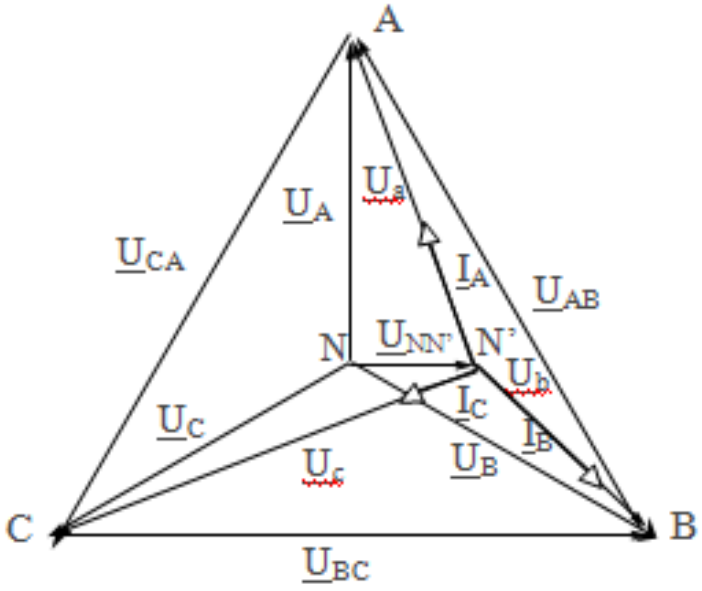



Рис.10.3

При использовании трехфазной четырехпроводной цепи появляется возможность уменьшить разность потенциалов между нейтральной точкой “звезды” потребителя и нейтральной точкой “звезды” источника питания, тем самым снизить несимметрию фазных напряжений на нагрузке. При подключении к нейтральной точке “звезды” потребителя нулевого провода напряжение смещения нейтрали уже рассчитывается как

$$\underline{U}_{NN'} = \frac{\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N},$$

здесь $\underline{Y}_N$ - комплексная проводимость нулевого провода.

Из данной формулы видно, что при уменьшении сопротивления нулевого провода (увеличении его проводимости) напряжение смещения нейтрали также уменьшается. В идеальном случае, при нулевом значении сопротивления нулевого провода, напряжение смещения нейтрали также равно нулю. При этом потенциал нейтральной точки “звезды” потребителя равен потенциалу нейтральной точки “звезды” источника питания и фазные напряжения на нагрузке равны симметричным фазным напряжениям источника питания.

Однако токи в этом случае остаются несимметричными, так как, из-за отличия модулей сопротивлений в фазах нагрузки, их действующие значения также различны. При подключении нулевого провода в нем будет протекать ток равный геометрической сумме токов в фазах нагрузки. Его положительное направление совпадает с положительным направлением напряжения смещения нейтрали. Пример векторной диаграммы такого случая приведен на рис.10.4. На ней пунктиром показано геометрическое суммирование токов в фазах нагрузки.

Топографическая диаграмма напряжений, совмещенная с векторной диаграммой токов

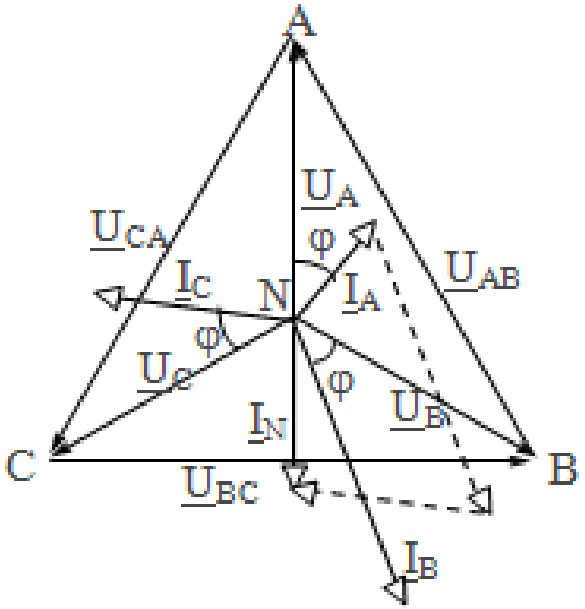



Рис.10.4

## 10.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется соблюдать общие правила по технике безопасности при работе в лаборатории ТОЭ.

## 10.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теорию вопроса, обратить внимание на особенности трехфазных цепей при трехпроводной и четырехпроводной системе питания.

2. Ознакомиться с приборами и оборудованием исследуемой цепи и записать паспортные данные в таблицу 1в.

3. Собрать цепь по схеме рис.10.6. Провести исследование трехфазной цепи при соединении однородной нагрузки звездой (рис. 10.6):

а) в трехпроводном режиме, выключатель S4 выключен;

б) в четырехпроводном режиме, выключатель S4 включен.

В качестве однородных потребителей использовать активные сопротивления, указанные преподавателем.

4. После проверки собранной цепи преподавателем или лаборантом включить ее под напряжение измерить напряжения и токи для случаев, указанных в таблице 10.1.

Таблица 10.1

| № | Способ соеди- | Характер нагрузки | Режим работы | Напряжения (В) | | | | | | | Токи (А) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Линейные | | | Фазные | | | | | | | |
| | | | | $U_{AB}$ | $U_{BC}$ | $U_{CA}$ | $U_a$ | $U_в$ | $U_c$ | $U_{N'N}$ | $I_A$ | $I_B$ | $I_C$ | $I_N$ |
| 1 | | Однородная | Равно-мерный 3-х ф. | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | Обрыв 1 фазы | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | Обрыв 2 фаз | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | Равно-мерный 3-х ф. | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | Обрыв 1 фазы | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | Обрыв 2 фаз | | | | | | | | | | | |

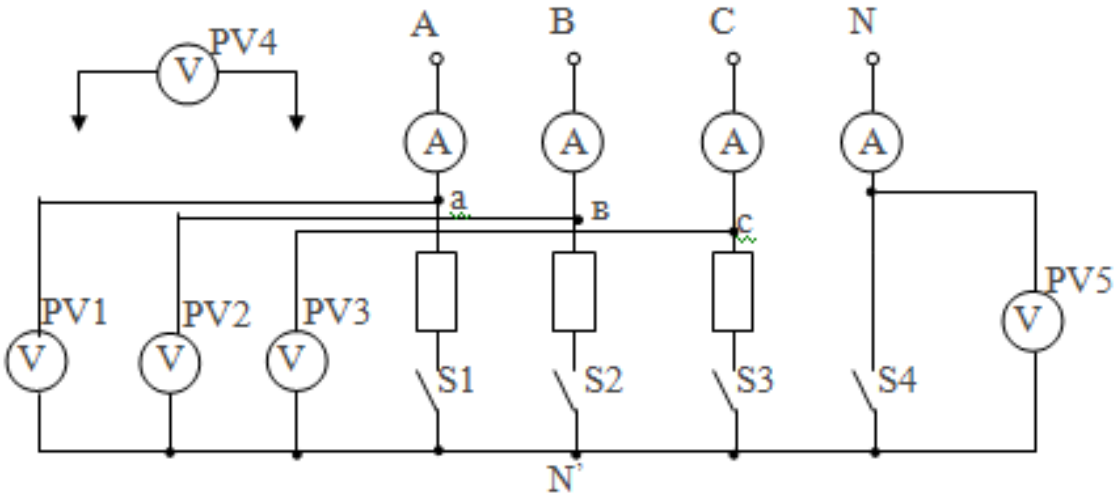



Рис. 10.6

5. По данным измерений для всех случаев построить векторные диаграммы.

6. Пользуясь результатами наблюдений, найти отношение среднеарифметических значений линейных напряжений к фазным для случая симметричной нагрузки фаз и сравнить его с теоретическим значением этой величины.

7. По построенной векторной диаграмме токов для случая наличия нейтрального провода найти графическим способом ток в нем и сравнить его с экспериментально полученным током $I_N$.

8. Выполнить индивидуальное задание № 10. Номер варианта принимается по заданию преподавателя.

## 10.8.УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать электрическую схему исследуемой цепи, таблицы приборов и опытных данных, построенные в масштабе топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов, и выводы. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №10.

## 10.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое соединение называется соединением звездой и какие его особенности?

2. Как строится векторная диаграмма для токов и напряжений при соединении звездой?

3. В каком случае отсутствует ток в нейтральном проводе и почему?

4. Какая роль нейтрального провода при четырехпроводной системе питания трехфазных потребителей?

5. Какие особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при неравномерной нагрузке фаз с нейтральным проводом и без него?

6. Почему в нейтральном проводе не ставят предохранитель?

7. Какая трехпроводная система называется симметричной (однородной, неоднородной)?

8. Каковы соотношения между линейным и фазным напряжением?

9. Когда возникает напряжение смещения нейтрали?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11
# «ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ ПРИ НЕОДНОРОДНОЙ НАГРУЗКЕ»

## 11.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование электрической трехфазной цепи при соединении звездой активных и реактивных приемников электрической энергии, получение навыков построения по опытным данным топографических и векторных диаграмм напряжений и токов трехфазной цепи при неоднородной нагрузке фаз.

## 11.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- вольтметры электромагнитной системы с пределом измерений 100 В- 5 шт.;
- амперметры электромагнитной системы с пределом измерений 2А – 4 шт.;
- катушка индуктивности – 1 шт.;
- конденсатор – 1 шт.;
- активное сопротивление – 1 шт.;
- выключатель однополюсный – 2 шт.

## 11.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится два академических часа.

## 11.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

От генератора трехфазного тока отходят четыре провода, из которых три линейных *A, B, C* и один нейтральный (рис.11.1).

Напряжения $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$, действующие между соответствующими линейными проводами, равные между собой и взаимно сдвинутые по фазе на угол $2\pi/3$, называются линейными, а напряжения $\underline{U}_{A}$, $\underline{U}_{B}$, $\underline{U}_{C}$, действующие между соответствующими линейными и нейтральным проводами, носят название фазных. В общем случае линейные напряжения $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$ и $\underline{U}_{CA}$ связаны с фазными $\underline{U}_{A}$, $\underline{U}_{B}$, $\underline{U}_{C}$ следующими векторными уравнениями, составленными на основании второго закона Кирхгофа

$$\begin{cases} \underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B ; \\ \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C ; \\ \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A . \end{cases}$$

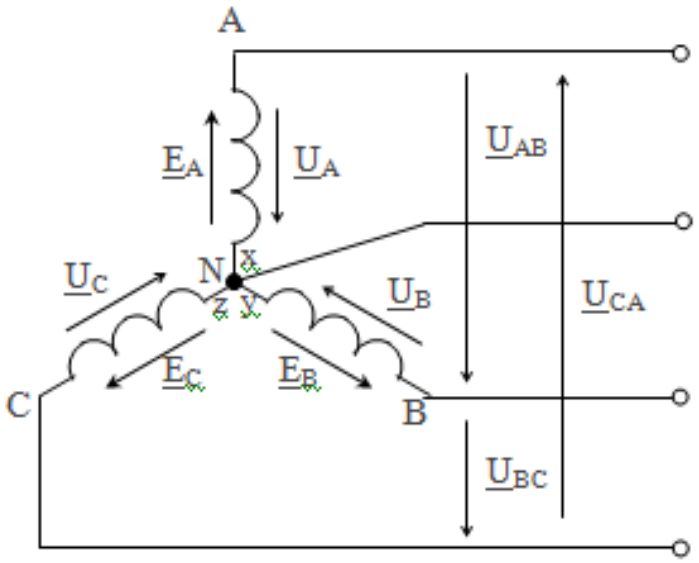



Рис.11.1

Приведенным выше уравнениям соответствует векторная диаграмма, представленная на рис.11.2.

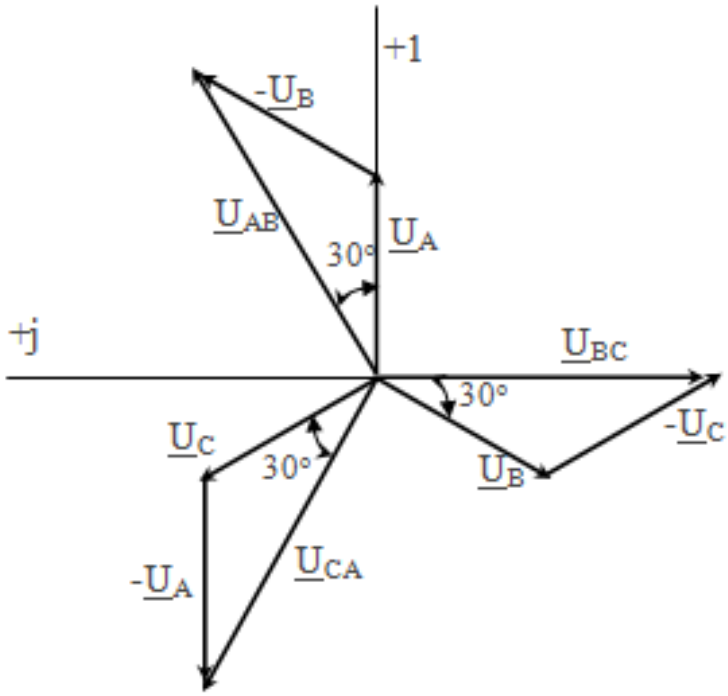



Рис.11.2

Как видно из диаграммы, звезда линейных напряжений смещена относительно звезды фазных напряжений на угол $30^o$ в сторону опережения.

При симметричных линейных и фазных напряжениях между их величинами существует зависимость

$$U_л = \sqrt{3}U_ф .$$

Симметричный режим: $\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0$ и $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$.

Так как по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0,$$

то, следовательно, при симметричной нагрузке необходимость в нейтральном проводе отпадает.

При симметричной нагрузке комплексные сопротивления фаз равны между собой

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C .$$

Нагрузка, у которой сопротивления фаз не равны или носят различный характер, является нагрузкой несимметричной или неравномерной. Неоднородная нагрузка, у которой по фазам сопротивления отличаются по фазе, даже при равенстве модулей, всегда несимметрична.

В случае неравномерной нагрузки фаз, когда

$$\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C,$$

нарушается равенство фазных токов $\underline{I}_A$ , $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$ и в нейтральном проводе появляется ток $\underline{I}_N$

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

На рис.11.3 представлена векторная диаграмма для случая неравномерной нагрузки и графическим способом определен ток в нейтральном проводе по известным фазным токам $\underline{I}_A$ , $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$.

При неравномерной нагрузке фаз и наличии нейтрального провода все электроприемники находятся под одинаковым фазным напряжением

$$U_A = U_B = U_C = U_ф$$

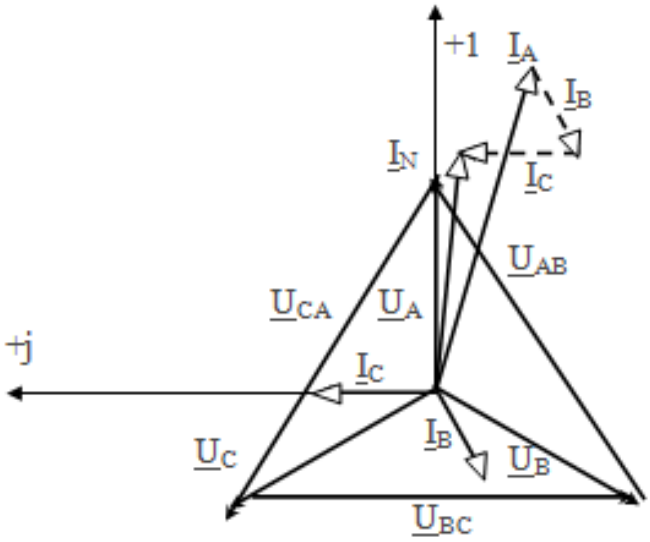



Рис.11.3

В случае обрыва нейтрального провода нормальный режим работы установки нарушается.

Фазные токи при прежней неравномерной нагрузке изменяются и устанавливаются такими, чтобы их сумма была равна нулю.

В результате этого происходит искажение симметрии фазных напряжений: фаза с меньшим сопротивлением оказывается под сниженным, а фаза с большим сопротивлением под повышенным напряжением по сравнению с нормальным значением фазного напряжения. Возникает так называемый перекос фаз, между нейтральной точкой генератора и нейтральной точкой потребителя возникает напряжение, которое называется напряжением смещения нейтрали (рис.11.4).

Так как подобные ненормальности при эксплуатации недопустимы, то на целостность нейтрального провода обращают особое внимание. Выключатели, предохранители и прочие устройства, способные вызвать отключение его от нейтральной точки, не должны включаться в нейтральный провод.

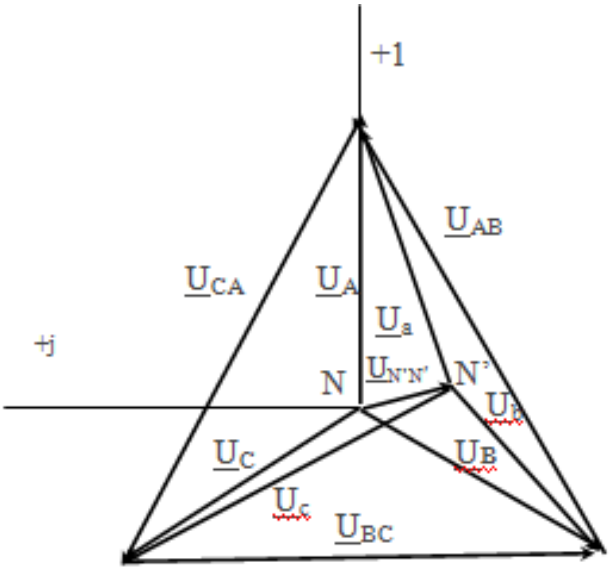



Рис.11.4

При обрыве линейного провода потребители этой фазы остаются без

энергии, а потребители двух других фаз продолжают питаться от трехфазной системы. Если при этом есть нейтральный провод, то на них обрыв “чужого” линейного провода практически не сказывается, а при отсутствии его происходит перераспределение напряжений на зажимах обоих электроприемников пропорционально величинам их сопротивлений.

Построение топографической диаграммы по опытным данным производится в следующей последовательности: сначала в масштабе $m_U$ строят треугольник линейных напряжений $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$ и $\underline{U}_{CA}$ , методом засечек, из вершин этого треугольника А В С радиусами, равными фазным напряжениям $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$ и $\underline{U}_C$ описывают дуги, пересечение которых определяет нейтральную точку N′, а затем под углами $\varphi_a$ , $\varphi_в$ и $\varphi_c$ к фазным напряжениям проводят в масштабе $m_I$ токи $\underline{I}_A$ , $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$.

## 11.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется выполнять общие правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ по ТОЭ.

## 11.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.Изучить теорию вопроса, обратить внимание на особенности трехфазных цепей при четырехпроводной системе питания неоднородной нагрузки.

2.В рабочей тетради подготовить таблицы для записи технических данных измерительных приборов и опытных данных. Начертить электрическую схему опытов.

3.Ознакомиться с приборами и оборудованием исследуемой цепи и записать паспортные данные в табл. 1в.

4. Собрать цепь по схеме рис.11.В качестве нагрузки использовать активное сопротивление, катушку индуктивности и конденсатор. Параметры нагрузки задаются преподавателем.

5. После проверки собранной цепи преподавателем, подключить ее к питающей сети и провести исследование трехфазной цепи при соединении неоднородной нагрузки звездой:

а) в трехпроводном режиме выключатель SA2 выключен;

б) в четырехпроводном режиме выключатель SA2 включен.

Измеренные токи и напряжения записать в табл. 11.1.

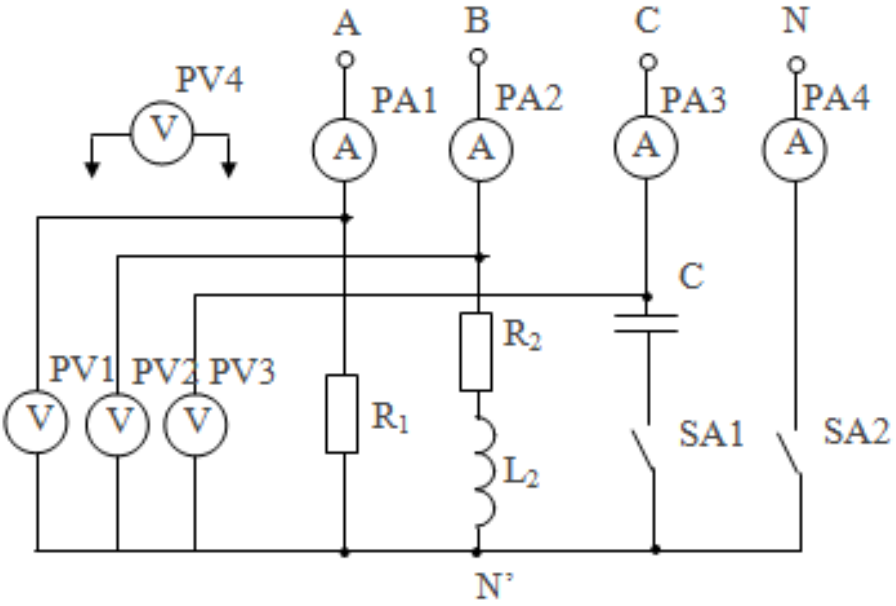



Рис.11.5

Таблица 11.1

| № п/п | Способ соединения | Характер нагрузки | Режим работы | Напряжение (В) | | | | | | | Токи (А) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | линейные | | | фазные | | | | | | | |
| | | | | $U_{AB}$ | $U_{BC}$ | $U_{CA}$ | $U_A$ | $U_B$ | $U_C$ | $U_{NN'}$ | $I_A$ | $I_B$ | $I_C$ | $I_N$ |
| 1 | | неоднородная | нагрузка 3х фаз | | | | | | | | | | | |
| 2 | Y | | обрыв фазы с емкостью | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | нагрузка 3х фаз | | | | | | | | | | | |
| 4 | Y | | обрыв фазы с емкостью | | | | | | | | | | | |

6. По данным измерений для всех случаев построить векторные диаграммы. Все диаграммы строятся в масштабе.

7. По построенной топографической диаграмме при наличии нейтрального провода найти графическим способом ток $I_N$ и сравнить его с экспериментально полученным $I_N$.

8. Выполнить индивидуальное задание № 11. Номер варианта принимается по заданию преподавателя.

## 11.8. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать: электрическую схему исследуемой цепи, таблицы приборов и опытных данных, построенные в масштабе топографические диаграммы напряжений, совмещенные с векторными диаграммами токов, и выводы.

К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №11.

## 11.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется соединением звездой и какие его особенности?

2. Как строится векторная диаграмма для токов и напряжений при соединении звездой?

3. В каком случае отсутствует ток в нейтральном проводе и почему?

4. Какая роль нейтрального провода при четырехпроводной системе питания?

5. Почему в нейтральный провод не ставят предохранитель?

6. Какие особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при неравномерной нагрузке фаз с нейтральным проводом и без него?

7. Режим обрыва фаз и его особенности при соединении потребителей звездой с нейтральным проводом и без него?

8. Режим короткого замыкания одной из фаз и его особенности при соединении потребителей звездой с нейтральным проводом и без него?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

# «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ R И C»

## 12.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное изучение переходных режимов в цепи с $R$ и $C$, получение навыков расчета и экспериментального определения постоянных времени зарядки и разрядки конденсатора, а также принужденной составляющей напряжения на емкости.

## 12.2 ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используют следующие приборы и оборудование:

- исследуемый блок с сопротивлениями $R_1$ и $R_2$, конденсатором $C$ и поляризованным реле РП-5 – 1шт.;
- источник постоянного напряжения с ЭДС 10..15 В;
- осциллограф электронный – 1шт.;
- вольтметр электромагнитной системы с пределом измерений 30 В –1шт.;
- вольтметр магнитоэлектрической системы с пределом измерений 30 В – 1шт.;
- лабораторный автотрансформатор – 1шт.

## 12.3 ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится 2 академических часа.

## 12.4 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В общем случае, переходным называется процесс, возникающий в цепи при переходе от одного установившегося режима к другому. Он происходит при подключении или отключении пассивных и активных ветвей, изменении параметров, то есть в любом случае, когда последующий режим работы чем-либо отличается от предыдущего.

Сам процесс включения или отключения выключателей, изменение параметров цепи и так далее называется **коммутацией**. Считается, что процесс коммутации происходит практически мгновенно.

В ранее рассмотренных разделах курса считалось, что при любых изменениях в цепи ток и напряжение меняются мгновенно. В действи-

тельности это имеет место только в цепях с активной нагрузкой. В активном сопротивлении электрическая энергия необратимо превращается в тепло, которое рассеивается в окружающую среду.

Индуктивность и емкость представляют собой аккумуляторы (накопители) энергии. В индуктивности и емкости электрическая энергия превращается соответственно в энергию магнитного и электрического полей. Процессы накопления до конечного значения или отдачи энергии не могут происходить мгновенно, так как в противном случае мощность источника энергии должна быть бесконечно большой, что следует из уравнений

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}; \quad \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta W}{\Delta t} \to \infty .$$

Следовательно, энергии в индуктивности и емкости могут изменяться только постепенно, плавно, несмотря на то, что сама коммутация происходит практически мгновенно.

Поэтому для цепей, содержащих индуктивность и емкость, сформулированы два закона коммутации, которые лежат в основе расчета переходных процессов.

**Первый закон коммутации**

В любой цепи с индуктивностью ток и магнитный поток в момент времени непосредственно после коммутации сохраняют те же значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, то есть ток в индуктивности не может изменяться скачком: $i_L(0_-) = i_L(0_+)$.

**Второй закон коммутации**

В любой ветви напряжение и заряд на емкости в момент времени непосредственно после коммутации сохраняют те же значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, то есть напряжение и заряд на емкости скачком изменяться не могут: $U_c(0_-) = U_c(0_+)$.

Токи и напряжения, которые не подчиняются законам коммутации, могут изменяться скачком.

Расчет переходного процесса в любой линейной электрической цепи сводится к решению линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами.

Рассмотрим включение индуктивности и емкости на постоянное напряжение (рис.21 а и б). Для электрической цепи, выполненной по рис.12.1 а, согласно второму закону Кирхгофа, при $t > 0$ имеем:

$$iR + L\frac{di}{dt} = E;$$

Схема включения индуктивности а) и емкости б) на постоянное напряжение

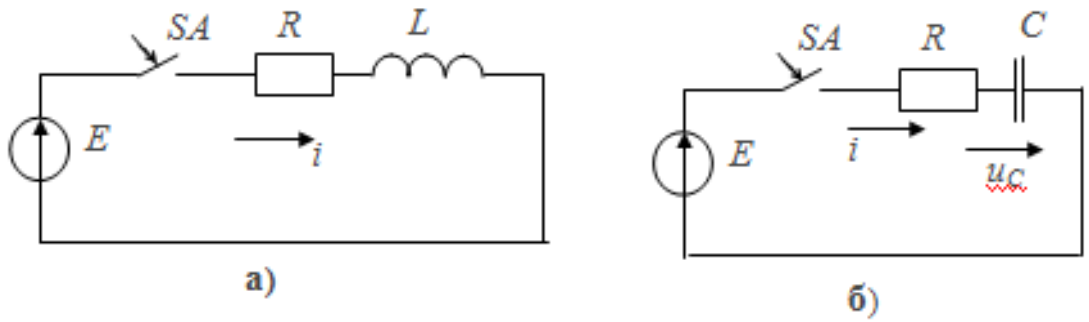



Рис.12.1

для электрической цепи, выполненной по рис. 12.1б:

$$iR + \frac{1}{C}\int idt = E\,; \qquad i = C\frac{du_c}{dt},$$

откуда

$$RC\frac{du_c}{dt} + u_c = E\,. \tag{12.1}$$

Известно, что решение таких уравнений состоит из суммы частного решения неоднородного дифференциального уравнения и общего решения однородного дифференциального уравнения.

Частное решение неоднородного дифференциального уравнения определяет принужденный или установившийся режим.

Суть принужденного режима в том, что электрические величины рассматриваются в после коммутационной цепи в установившемся режиме, то есть когда переходный процесс фактически закончился.

Если ЭДС постоянная, то для цепи по рис.12.1а $i_{пр} = \frac{E}{R}$,

для цепи по рис.12.1б - $i_{пр} = 0$; $U_{Cпр} = E$.

Однородное дифференциальное уравнение получается из исходного, если в нем приравнять правую часть нулю. В нашем случае для второй электрической цепи (рис.12.1б) имеем

$$RC\frac{du_{Cсв}}{dt} + u_{Cсв} = 0\,.$$

Решением такого уравнения является показательная функция вида $Ae^{pt}$. Общее решение однородного уравнения определяет свободный режим, когда ток протекает за счет энергии электромагнитного поля, запасенной в реактивных элементах цепи. Этот ток не зависит от действую-

щей в цепи ЭДС или от подведенного напряжения и поэтому называется свободным (цепь свободна от источников ЭДС).

При $t \to \infty$ свободный ток $i_{св}$ стремится к нулю, так как процесс в цепи с конечными сопротивлениями должен затухать при отсутствии в цепи источника ЭДС.

Итак, переходный процесс можно рассматривать состоящим из двух накладывающихся друг на друга процессов: принужденного, который как бы наступает сразу, и свободного, который затухает с течением времени по мере перехода процесса в установившийся режим.

$$u_C(t) = u_{Cпр} + u_{Cсв}$$

или

$$u_C(t) = u_{Cпр} + Ae^{pt}, \qquad (12.2)$$

где $p$ – корень характеристического уравнения;
$A$ – постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение получается из исходного однородного дифференциального уравнения при $\frac{d}{dt} \doteq p$; $RC \cdot p \cdot u_{Cсв} + u_{Cсв} = 0$ или $RC \cdot p + 1 = 0$, откуда

$$p = -\frac{1}{RC}.$$

Считают, что момент времени $t = 0$ соответствует моменту коммутации.

Постоянные интегрирования определяют из начальных условий, то есть из уравнений в момент времени $t = 0$. Так для уравнения (12.2)

$$u_C(0) = u_{Cпр} + A.$$

$u_{C(0)}$ определяют как независимое начальное условие, то есть из уравнений цепи до коммутации. Для схемы по рис. 12.1б

$$u_{C(0)} = u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0,$$

если конденсатор не был заряжен.

Тогда $A - u_{Cпр} = -E$.

Окончательно получаем: $u_C(t) = E - Ee^{pt} = (1 - e^{pt})E$.

Время переходного процесса характеризуется величиной, которая называется постоянной времени цепи $\tau$:

$$\tau = \frac{1}{/p/}.$$

Постоянная времени – это время, за которое переходная величина уменьшается в ***e*** раз.

В данной лабораторной работе рассматриваются процессы периодической зарядки конденсатора $C$ через сопротивление $R_1$ и его разрядки на сопротивление $R_2$ (рис.12.2.).

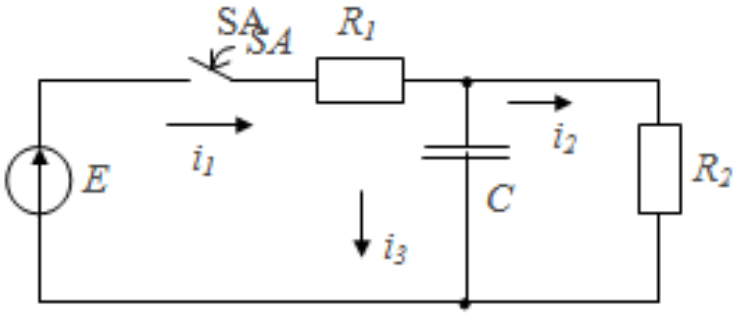



Рис. 12.2

Рассмотрим процесс зарядки конденсатора $C$. Он описывается системой уравнений

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0; \qquad (12.3)$$

$$i_1 R_1 + \frac{1}{C}\int i_3 dt = E; \qquad (12.4)$$

$$\frac{1}{C}\int i_3 dt = i_2 R_2. \qquad (12.5)$$

Решив систему уравнений относительно напряжения на емкости $i_3 = C\frac{du_C}{dt}$ и $i_2 = \frac{u_C}{R_2}$, из (12.5) и (12.3) определяем ток i1: $i_1 = i_2 + i_3 = \frac{u_C}{R_c} + \frac{Cdu_C}{dt}$ и подставляем его значение в (12.4). Окончательно получим:

$$CR_1\frac{du_C}{dt} + \frac{R_1}{R_2}u_C + u_C = E. \qquad (12.6)$$

При t = ∞

$$\frac{du_c}{dt} = 0 \qquad \text{и} \qquad u_C = u_{Cпр} = E\frac{R_2}{R_1 + R_2}. \tag{12.7}$$

Уравнение (12.6) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка, следовательно, имеет один отрицательный вещественный корень, который определяется из характеристического уравнения

$$CR_1 p + \frac{R_1}{R_2} + 1 = 0,$$

тогда

$$p = -\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot C}. \tag{12.8}$$

Постоянная времени зарядки равна:

$$\tau_3 = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot C}{R_1 + R_2}. \tag{12.9}$$

Как указывалось выше, переходная величина представляет собой сумму принужденной и свободной составляющей: $u_{C(t)} = u_{Cпр} + Ae^{Pt}$. $U_{Cпр}$ определена из (12.7), постоянная интегрирования А определяется из начальных условий: при $t = 0$

$$u_{C(0)} = u_{Cпр} + A,$$

где $U_{c.(0)}$ - независимое начальной условие, в данном случае $u_{C(0-)} = u_{C.(0+)} = 0$, тогда $u_{C.пр} + A = 0$ и $A = - u_{Cпр}$.

Окончательно получим уравнение

$$u_C(t) = u_{Cпр} - u_{Cпр}e^{pt} = u_{Cпр}(1 - e^{pt}) = u_{Cпр}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}}) \tag{12.10}$$

Ток в резисторе $R_2$ $\qquad i_2 = \frac{u_C}{R_2}.$

При размыкании контакта *SA* зарядка конденсатора прекращается и одновременно начинается его разрядка на резистор $R_2$. Направление тока в конденсаторе изменяется. Поэтому

$$i_3 = -C\frac{du_c}{dt}; \qquad i_2 = \frac{u_c}{R_2}; \qquad -\frac{1}{c}\int i_3 dt + i_2 R_2 = 0$$

или $u_c + R_2 C\frac{du_c}{dt} = 0$, откуда аналогично предыдущему

$$u_C = u_0 e^{-\frac{t}{\tau_p}}, \qquad (12.11)$$

где $\tau_p$ - постоянная времени при разрядке конденсатора;

$u_0$ - напряжение на конденсаторе в момент начала разрядки.

$$\tau_p = R_2 C. \qquad (12.12)$$

На рисунке 12.3. показана схема электрической цепи, позволяющая периодически производить зарядку и разрядку конденсатора *C*. Для этой цели служит поляризованное реле К1, обмотка которого подключена к сети переменного тока промышленной частоты ( $f$ = 50 Гц). В начале каждого периода контакт реле замыкается и происходит зарядка конденсатора от источника постоянной ЭДС *E*. В конце положительного полупериода контакт реле К1 размыкается и начинается разрядка конденсатора. Так как период $T = \frac{1}{f} = 0{,}02c$, то зарядка и разрядка конденсатора повторяются с той же периодичностью.

Схема экспериментальной установки

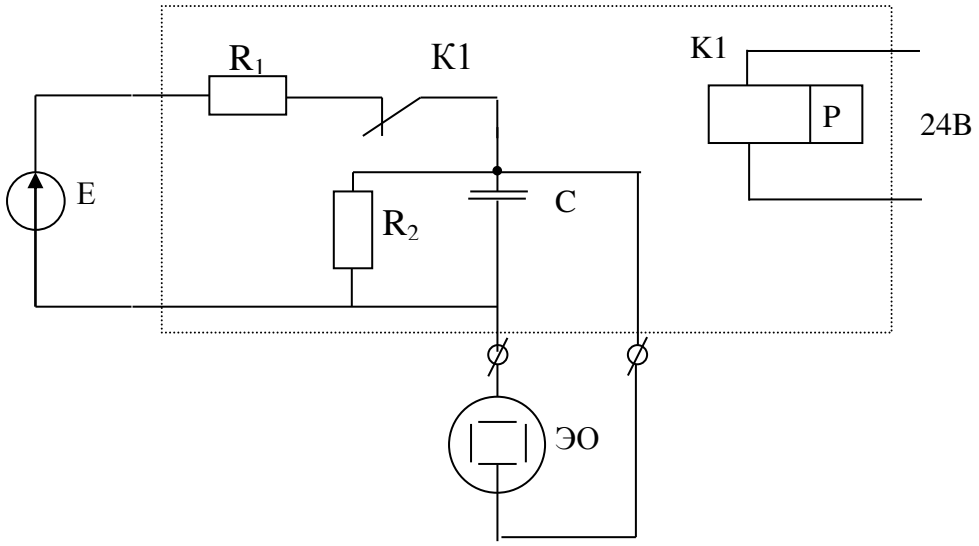



Рис.12.3

Напряжение $u_C$ можно подать на вертикальные пластины электронного осциллографа (ЭО) и на его экране получить временную диаграмму зарядки и разрядки конденсатора (рис.12.4).

Возьмем на кривой зарядки (восходящая кривая на рис.12.4) две точки K и L с координатами К ($t_1, U_1$) и L($t_2 U_2$), причем $t_2 = 2t_1$.

На основании уравнения (16.7), имеем

$$U_1 = U_{пр}(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_3}}) \text{ и} \qquad (12.13)$$

$$U_2 = U_{np}(1 - e^{-\frac{2t_1}{\tau_3}}).$$

(12.14)

Временная диаграмма зарядки и разрядки конденсатора

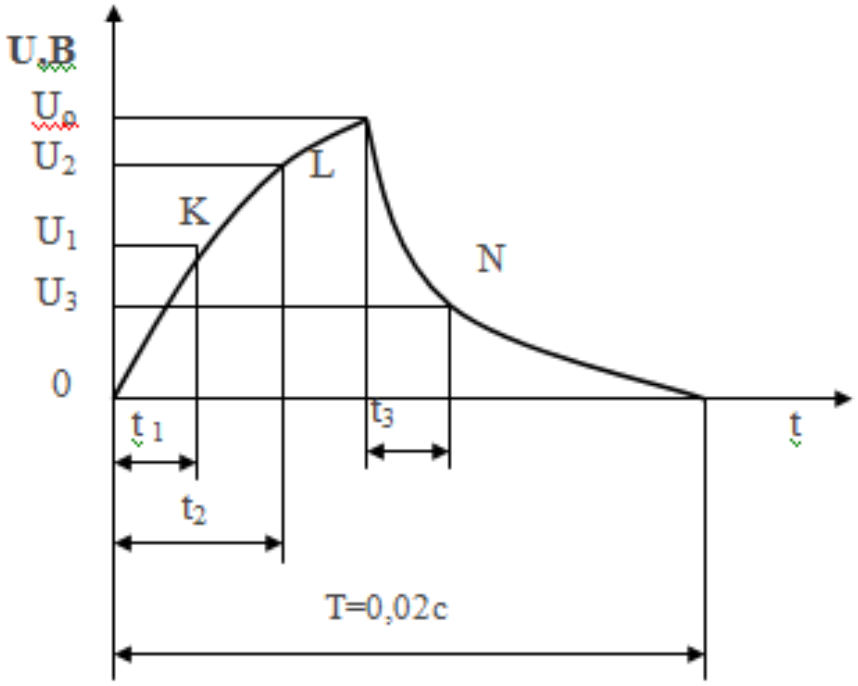



Рис. 12.4

Разделив $U_2$ на $U_1$, получим

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1 - e^{-\frac{2t_1}{\tau_3}}}{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_3}}} = \frac{\left(1 + e^{-\frac{t_1}{\tau_3}}\right)\left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_3}}\right)}{1 - e^{-\frac{t_1}{\tau_3}}} = 1 + e^{-\frac{t_1}{\tau_3}},$$

откуда

$$e^{-\frac{t_1}{\tau_3}} = \frac{U_2}{U_1} - 1; \qquad e^{\frac{t_1}{\tau_3}} = \frac{1}{\frac{U_2}{U_1} - 1}; \qquad \frac{t_1}{\tau_3} = \ln\frac{1}{\frac{U_2}{U_1} - 1};$$

$$\tau_3 = \frac{t_1}{\ln \dfrac{1}{\dfrac{U_2}{U_1} - 1}} = \frac{t_1}{\ln \dfrac{U_1}{U_2 - U_1}}. \qquad (12.15)$$

Принужденное значение напряжения $U_c$ равно:

$$U_{np} = \frac{U_1}{1 - e^{\frac{-t_1}{\tau_3}}}.$$

Если известны $R_1$ и $R_2$ , то можно вычислить ЭДС $E$. Так как в установившемся режиме

$$U_{Cnp} = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_2, \quad \text{то} \quad E = U_{Cnp} \frac{R_1 + R_2}{R_2}.$$

Для точки N ($t_3$, $U_3$) на кривой разрядки имеем

$$U_3 = U_o e^{-\frac{t_3}{\tau_p}}, \quad \text{откуда} \quad \tau_p = \frac{t_3}{\ln \dfrac{U_o}{U_3}}. \qquad (12.16)$$

Таким образом, по экспериментальной кривой можно определить постоянные времени $\tau_3$ и $\tau_p$ , а также $U_{np}$ и $E$.

## 12.5 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется выполнять общие правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ по ТОЭ.

## 12.6 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, записать их паспортные данные в таблицу 1в. Записать значения сопротивлений $R_1$ и $R_2$ и емкости конденсатора С.

2. Измерить ЭДС источника питания.

3. Вычислить постоянные времени $\tau_3$ и $\tau_p$ по параметрам электрической цепи (формулы 12.9 и 12.12).

4. Собрать электрическую цепь (рис.12.3). После проверки цепи преподавателем включить источник питания и получить на экране осциллографа устойчивое изображение разрядки и зарядки конденсатора. Убедиться в том, что за время разрядки конденсатор почти полностью разряжается, $t_p > 3\tau_p$.

5. Снять на кальку кривую зарядки и разрядки, выбрать на кривой точки K,L ,N и записать их координаты в таблицу 12.1

Таблица 12.1

| Результаты измерений | | | | | | | | Результаты вычислений | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $E$ | $t_1$ | $U_1$ | $t_2$ | $U_2$ | $t_3$ | $U_3$ | $U_o$ | $\tau_3$ | $\tau_p$ | $U_{пр}$ | $E$ |
| В | мс | В | мс | В | мс | В | В | мс | мс | В | В |
| | | | | | | | | | | | |

6. Выполнить индивидуальное задание № 12. Номер варианта принимается по заданию преподавателя.

## 12.7 ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. По данным таблицы 16.1 вычислить $\tau_3$ и $\tau_p$, $U_{пр}$ и $E$.
2. Построить кривые зарядки и разрядки конденсатора по формулам (12.10) и (12.11).
3. Сравнить результаты, полученные теоретически (по формулам 16.9 и 16.12), с экспериментальными (по формулам 12.15 и 12.16).
4. Сделать выводы по результатам работы.

## 12.8 УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать название работы; ее цель; таблицы приборов и оборудования; основные расчетные формулы; таблицу измерений и вычислений; временные диаграммы (снятую с осциллографа и построенную по формулам); анализ результатов и выводы. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №16.

## 12.9 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте законы коммутации.
2. Что такое постоянная времени зарядки конденсатора? Чем она отличается от времени зарядки его?
3. Почему при определении $\tau_3$ по координатам точек рекомендуется применять $t_2 = 2t_1$?

4. Можно ли по кривой зарядки и разрядки определить $\tau_3$ и $\tau_p$, если масштаб напряжения не известен ?

5. Почему период зарядки и разрядки в лабораторной установке равен 0,02с?

6. Что произойдет, если в цепи (рис.16.2) вместо конденсатора включить катушку индуктивности? Как в этом случае выглядит временная диаграмма?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13
# «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ»

## 13.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение экспериментального метода определения первичных и вторичных параметров двухпроводной длинной линии.

## 13.2 ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используют следующие приборы и оборудование:

- модель исследуемой длинной линии;
- источник высокочастотного синусоидального напряжения ГЗ (f = = 1000 Гц, U = 50 В);
- вольтметр выпрямительной системы с пределом измерений 50 В;
- миллиамперметр выпрямительной системы с пределом измерения 100 мА;
- реостат с сопротивлением 100 Ом или магазин сопротивлений;
- осциллограф электронный;
- пробный конденсатор емкостью $C$ = 0,05 мкФ.

## 13.3 ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится два академических часа.

## 13.4 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Электрические линии можно рассматривать в двух вариантах: как линии с сосредоточенными параметрами и как линии с распределенными параметрами.

В чем отличие их друг от друга? Любая линия всегда часть передаваемой энергии потребляет на себя, следовательно, она обладает активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью (определенными параметрами).

В линии с сосредоточенными параметрами можно считать, что ее параметры сосредоточены на отдельном коротком участке и соединены последовательно, т.е. для линии с сосредоточенными параметрами характерно, что в любой момент времени ток в любом сечении неразветвленной линии имеет одно и то же значение.

Линия, в которой параметры распределены по всей ее длине, называется линией с распределенными параметрами или **длинной линией**.

В неразветвленных цепях с распределенными параметрами токи в разных сечениях неодинаковы по ряду причин: во-первых, вследствие проводимости изоляции отдельных участков, приводящей в результате к возникновению токов утечки, во-вторых, вследствие наличия емкости между отдельными участками, обусловливающей токи смещения.

Так как токи утечки пропорциональны напряжению, а токи смещения пропорциональны частоте и напряжению, то с ростом напряжения и частоты их влияние становится более заметным. Токи утечки и смещения в большей степени зависят от длины линии. Поэтому к линиям с распределенными параметрами относятся линии и сети, соединяющие генераторы с потребителями.

В каких случаях линию следует рассматривать как линию с сосредоточенными параметрами, а в каком как линию с распределенными параметрами?

Критерием необходимости рассматривать линию как линию с распределенными параметрами является соотношение между интервалом времени распространения электромагнитных волн вдоль всей линии и интервалом времени, в течение которого токи и напряжения изменяются на заметную величину от полного их изменения в рассматриваемом процессе. Когда эти интервалы времени сравнимы, то линию следует рассматривать как линию с распределенными параметрами.

Известно, что электрическая энергия передается от места генерирования к месту потребления в виде волн тока и напряжения. Скорость распространения волны вдоль проводов в воздушных линиях считаем равной скорости света $c$=3·10$^5$ км/с.

Расстояние, на которое распространяется электромагнитная волна в течение периода $T$, называется длиной волны:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}.$$

При частоте f=50Гц длина волны

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^5}{50} = 6 \cdot 10^3 \, км.$$

Неодинаковость тока будет только в линиях, длина которых $l$ составляет значительную долю длины волны λ. Такие линии и называются длинными или линиями с распределенными параметрами. Так как длина волны обратно пропорциональна частоте, то одна и та же линия при од-

ной частоте будет длинной, а при другой, меньшей, частоте может быть и «недлинной».

Например, при частоте $f$ = 50 Гц вдоль линии протяженностью $l$ = 300м укладывается только одна двадцатитысячная часть длины волны:

$$\frac{l}{\lambda} = \frac{0,3}{6000} = \frac{1}{20000}.$$

Следовательно, ток, проходящий через сечение линии в любой момент времени, один и тот же. Такая линия должна рассматриваться как линия с сосредоточенными параметрами.

При частоте $f$ = 1 мГц на той же линии $l$ = 300м:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^5}{10^6} = 0,3\ км\ ,\ \text{то есть}\quad \frac{l}{\lambda} = 1.$$

В этом случае линию следует рассматривать как длинную линию или линию с распределенными параметрами.

Любая электрическая линия, например двухпроводная линия электропередачи или связи, характеризуется четырьмя первичными параметрами, отнесенными к единице ее длины: активным сопротивлением $r_0$ , индуктивностью проводов $L_0$ , активной проводимостью изоляции между проводами $q_0$ и емкостью между проводами $C_0$.

Активное сопротивление и индуктивность – продольные параметры. Активная проводимость и емкость – поперечные параметры. Если первичные параметры распределены по всей линии равномерно, то линию называют однородной.

При исследовании длинных линий, обладающих распределенными параметрами, их обычно заменяют равнозначными схемами. Длинная линия рассматривается состоящей из бесконечно большого числа элементарных ячеек-элементов линии бесконечно малой длины $dx$ с параметрами: $r_0dx$, $q_0dx$, $L_0dx$, $C_0dx$ (рис.13.1).

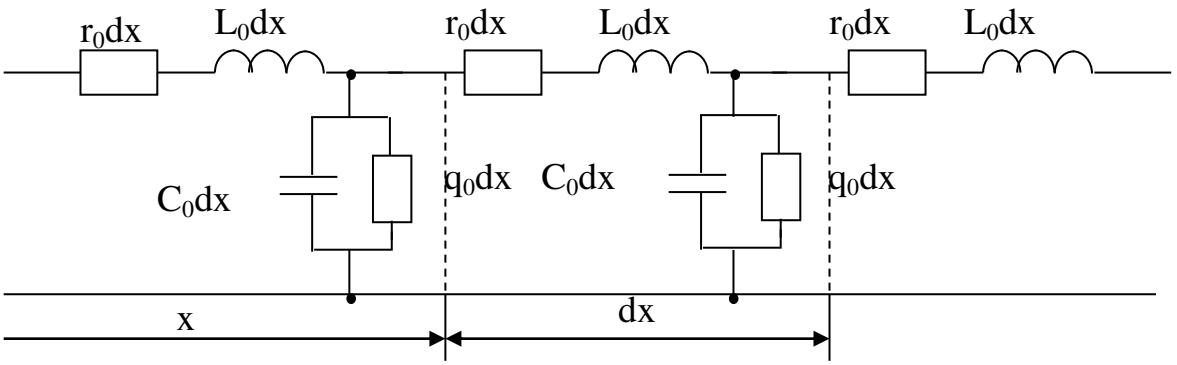



Рис.13.1

Кроме первичных параметров длинная линия характеризуется вторичными параметрами: волновым сопротивлением $\underline{Z}_B$, коэффициентом распространения

$$\underline{\gamma} = \alpha + jB ,$$

длиной волны $\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$ и скоростью распространения волны $V_ф = \frac{\omega}{\beta}$.

Вторичные параметры могут быть выражены через первичные:

$$\underline{Z}_в = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{q_1 + j\omega C_0}} = Z_0 e^{j\varphi_1} ; \qquad (13.1)$$

$$\gamma = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(q_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta , \qquad (13.2)$$

где $\alpha$ - коэффициент затухания;

$\beta$ - коэффициент фазы.

Вторичные параметры длинной линии $\underline{Z}_B$ и $\gamma$ могут быть определены опытным путем.

По опытам холостого хода *($I_{20}$ = 0)* и короткого замыкания *($U_{2к}$ =0)* определяются соответствующие этим режимам входные сопротивления:

$$\underline{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} e^{j\varphi_{10}} = Z_{10} e^{j\varphi_{10}} ; \qquad (13.3)$$

$$\underline{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} e^{j\varphi_{1k}} = Z_{1k} e^{j\varphi_{1k}} . \qquad (13.4)$$

Аргументы $\varphi_{10}$ и $\varphi_{1к}$ определяются с помощью осциллографа по фигуре Лиссажу. Длинную линию можно рассматривать как пассивный симметричный четырехполюсник, который в А-форме описывается уравнениями

$$\underline{U}_1 = A\underline{U}_2 + B\underline{I}_2$$
$$\underline{I}_1 = C\underline{U}_2 + D\underline{I}_2 .$$

Основные уравнения однородной линии эквивалентны уравнениям четырехполюсника

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 ch\gamma l + \underline{Z}_в \underline{I}_2 sh\gamma l ; \qquad (13.5)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_2}{Z_в} sh\gamma l + \underline{I}_2 ch\gamma l \ . \qquad (13.6)$$

В данном случае $A = D = ch\gamma l$, $C = \frac{sh\gamma l}{\underline{Z}_в}$, а $B = \underline{Z}_в sh\gamma l$.

**В режиме холостого хода**

$\underline{U}_{10} = \underline{U}_2 ch\gamma l$ ; $\underline{I}_{10} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_в} sh\gamma l$ , отсюда следует

$$\underline{Z}_{10} = \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{I}_{10}} = \frac{ch\gamma l \cdot Z_в}{sh\gamma l} = \underline{Z}_в \cdot cth\gamma l \ . \qquad (13.7)$$

**В режиме короткого замыкания**

$$\underline{U}_{1k} = \underline{I}_2 \underline{Z}_в sh\gamma l \ ; \ \underline{I}_{1k} = \underline{I}_2 ch\gamma l \ ,$$

откуда следует

$$\underline{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{\underline{I}_{1k}} = \frac{\underline{Z}_в sh\gamma l}{ch\gamma l} = \underline{Z}_в th\gamma l \ . \qquad (13.8)$$

Перемножив левые и правые части уравнений (13.7) и (13.8), получим

$$\underline{Z}_{10} \cdot \underline{Z}_{1k} = \underline{Z}_в^2 , \quad \text{так как} \quad cth\gamma l \cdot th\gamma l = 1$$

получим уравнение для определения волнового сопротивления:

$$\underline{Z}_в = \sqrt{\underline{Z}_{10} \cdot \underline{Z}_{1k}} = \sqrt{Z_{10} \cdot Z_{1k}} \cdot e^{j\frac{\varphi_{1k} + \varphi_{10}}{2}} = Z_в e^{j\varphi_в} \ . \qquad (13.9)$$

Из (13.8) уравнения следует, что

$$th\gamma l = \frac{\underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_в} \ .$$

Если в известном из математики соотношении

$$th\gamma l = \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}$$

числитель и знаменатель правой части умножить на $e^{\gamma l}$, то

$$th\gamma l = \frac{e^{2\gamma l} - 1}{e^{2\gamma l} + 1} \ . \qquad (13.10)$$

Преобразуем уравнение (13.10):

$$th\gamma l \cdot e^{2\gamma l} + th\gamma l = e^{2\gamma l} - 1 \quad \text{или} \quad th\gamma l \cdot e^{2\gamma l} - e^{2\gamma l} = -1 - th\gamma l .$$

Для определения коэффициента распространения волны выразим $e^{2\gamma l}$:

$$e^{2\gamma l} = \frac{-1 - th\gamma l}{th\gamma l - 1} = \frac{1 + th\gamma l}{1 - th\gamma l};$$

$$e^{2\gamma l} = e^{2\alpha l} \cdot e^{j2\beta l} = Ae^{j\nu} \quad \text{так как} \quad \gamma = \alpha + j\beta .$$

Отсюда следует, что

$e^{2\alpha l} = A$ - модуль комплексного числа

$2\beta l = \nu$ - аргумент.

Если допустить, что $v_ф = c$, где с – скорость света в вакууме, то можно определить β:

$$\beta = \frac{\omega}{V_ф} = \frac{\omega}{c},$$

т.к. $2\beta l = \nu$, то длина линии

$$l = \frac{\nu}{2\beta} = \frac{\nu \cdot c}{2\omega}.$$

Определяем коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{\ln A}{2l} = \frac{\omega \ln A}{\nu c}.$$

Итак, коэффициент распространения волны γ равен:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \frac{\omega \ln A}{\nu c} + j\frac{\omega}{c} . \qquad (13.11)$$

Из (13.1) и (13.2) следует:

$$\underline{Z}_в \cdot \gamma = \underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0 \ ; \qquad (13.12)$$

$$\frac{\gamma}{\underline{Z}_в} = \underline{Y}_0 = q_0 + j\omega C_0 . \qquad (13.13)$$

Из уравнений (13.12) и (13.13) определяются первичные параметры длинной линии $r_0$, $L_0$, $q_0$, $C_0$.

## *ОПРЕДЕЛЕНИЕ АРГУМЕНТОВ $\varphi_{10}$ И $\varphi_{1к}$ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА*

Для определения аргументов $\varphi_{10}$ и $\varphi_{1K}$ собирается цепь по схеме (рис.13.2), в которой напряжение, снимаемое с небольшого активного сопротивления, пропорциональное току $I_1$, подается на вход «Х», а входное напряжение $U_1$ – на вход «У» осциллографа.

Для того чтобы на экране осциллографа получить одинаковую по величине развертку поданного сигнала по осям «Х» и «У», отключаем сигнал с входа «У» и, изменяя добавочное сопротивление, устанавливаем на экране горизонтальную развертку поданного сигнала на вход «Х». Затем подаем сигнал на вход «У» и, отключив сигнал с входа «Х», изменяя усиление, устанавливаем развертку по вертикальной оси.

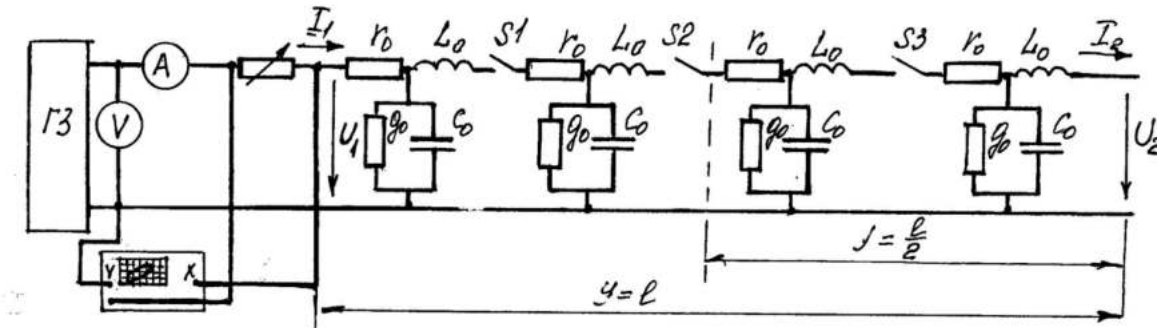



Рис.13.2

Вертикальная и горизонтальная развертки должны быть одинаковы.

При одновременном подключении сигналов на входе «Х» и «У» на экране будет изображен эллипс, вписанный в квадрат. Регулировкой ручек «смещение по вертикали» и «смещение по горизонтали» эллипс устанавливается в центре экрана (рис.13.3).

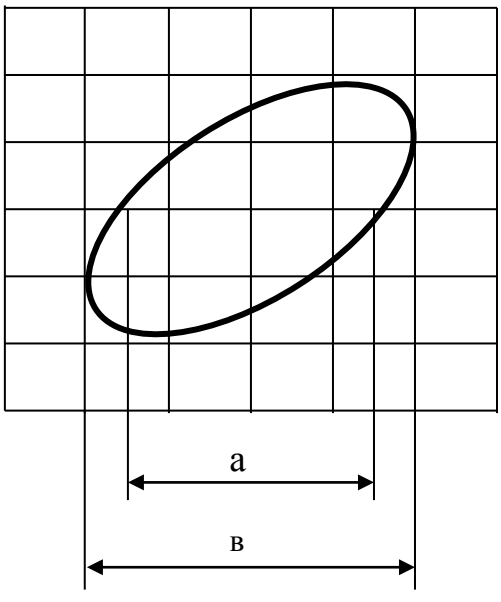



Рис.13.3

$$|\sin\varphi| = \frac{a}{в}; \qquad \varphi = \pm arcSin\frac{a}{в}.$$

Знак угла определяется при включении на вход линии малой емкости (исходя из условия $в_c < в_p$).

При емкостном характере входного сопротивления линии $(\varphi < 0)$ входной ток линии при включении емкости несколько возрастает, а при индуктивном $(\varphi > 0)$ уменьшается. О знаке угла $\varphi$ можно также судить по изменению площади эллипса (увеличению при $\varphi < 0$ и уменьшению при $\varphi > 0$).

## 13.5 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется соблюдать общие правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ по ТОЭ.

## 13.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть данной работы.
2. Ознакомиться с моделью длинной линии, приборами и записать их паспортные данные в таблицу 1в.
3. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 13.2).
4. Определить для $У = l$ $\underline{Z}_{l0}$ и $\underline{Z}_{lk}$ входные сопротивления холостого хода и короткого замыкания.
5. Измерить напряжение и ток, распределенные вдоль линии при двух режимах работы линии:

а) холостом ходе;

в) коротком замыкании.

При проведении измерений иметь в виду, что частота подведенного напряжения f = 1000Гц.

Результаты измерений внести в таблицу 13.1.

Таблица 13.1

| Длина линии (отсчитывается от ее конца) | Холостой ход | | | Короткое замыкание | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $U_0$, *В* | $I_0$, *А* | $\underline{Z}_{10}$, *Ом* | $U_k$, *В* | $I_k$, *А* | $\underline{Z}_{1k}$, *Ом* |
| $У = l$ | | | | | | |
| $У = ¾\ l$ | | | - | | | - |
| $У = ½\ l$ | | | - | | | - |
| $У = ¼\ l$ | | | - | | | - |
| $У = 0$ | | | - | | | - |

6. Выполнить индивидуальное задание № 13. Номер варианта принимается по заданию преподавателя.

## 13.7 ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Пользуясь показаниями приборов, определить комплексные значения входных сопротивлений в режимах холостого хода и короткого за-

мыкания. По полученным значениям сопротивлений $\underline{Z}_{10}$ и $\underline{Z}_{1k}$ при частоте 1000 Гц и считая, что скорость распространения волны напряжения и тока равна скорости света $c = 3 \cdot 10^5$ км/с, определить $\underline{Z}_в$, $\gamma$, $\alpha$, $\beta$, $r_0$, $q_0$, $L_0$, $C_0$.

## 13.8. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать электрическую схему исследуемой цепи, таблицу приборов и опытных данных, результаты расчетов и выводы по работе. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №17.

## 13.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1.В чем отличие линии с сосредоточенными параметрами от линии с распределенными параметрами?

2.При каком условии следует линию рассматривать как длинную линию?

3. Одна и та же линия в одном случае должна рассматриваться как длинная линия, а в другом как линия с сосредоточенными параметрами. От чего это зависит?

4. Как будет изменяться фигура Лиссажу если активная составляющая входного сопротивления стремится к нулю? если $R=X$? если $X \to 0$?

5. В каких единицах измеряются коэффициент затухания и коэффициент фазы?

# 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).

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ С ПРИМЕРАМИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

**ЧАСТЬ 2**

# ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 8

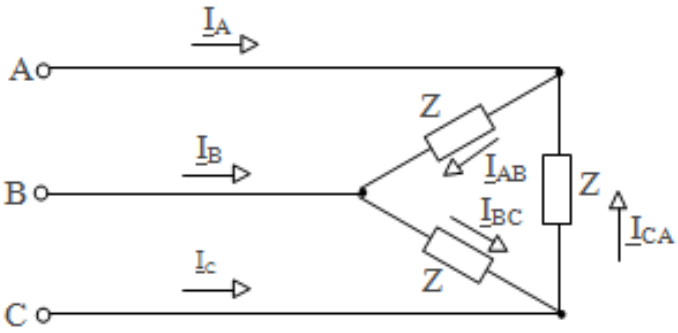



Рис. П8.1

К трехфазной сети с симметричной системой линейных напряжений подключена однородная нагрузка (рис. П8.1)

$$\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$$

Определить линейные и фазные токи, а также активную, реактивную и полную мощности для симметричного и одного несимметричного режимов. Построить векторные диаграммы для этих режимов.

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

| 1 | Величины, режим | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 2 | Uл, В | $\underline{U}ав=380e^{j30°}$ | $\underline{U}са=380e^{j75°}$ | $\underline{U}вс=380e^{-j150°}$ | $\underline{U}са=380e^{j120°}$ | $\underline{U}ав=220e^{-j60°}$ | $\underline{U}вс=380e^{-j165°}$ |
| 3 | Z, Ом | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 10 |
| 4 | φ, град | 0 | 30 | 45 | 60 | -30 | -60 |
| 5 | обрыв провода | A | B | C | AB | BC | CA |

| 1 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | $\underline{U}ав=220e^{-j30°}$ | $\underline{U}вс=220e^{-j180°}$ | $\underline{U}са=220e^{j60°}$ | $\underline{U}ав=220e^{j150°}$ | $\underline{U}са=380e^{-j60°}$ | $\underline{U}вс=220e^{-j165°}$ |
| 3 | 20 | 30 | 40 | 50 | 10 | 20 |
| 4 | 0 | 30 | 45 | 60 | -30 | -60 |
| 5 | A | B | C | AB | BC | CA |

| 1 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | $\underline{U}са=380e^{-j90°}$ | $\underline{U}вс=220e^{j150°}$ | $\underline{U}ав=220e^{-j45°}$ | $\underline{U}са=380e^{j60°}$ | $\underline{U}вс=220e^{j165°}$ | $\underline{U}ав=380e^{-j60°}$ |
| 3 | 30 | 40 | 50 | 10 | 20 | 30 |
| 4 | 0 | 30 | 45 | 60 | -30 | -60 |
| 5 | A | B | C | AB | BC | CA |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 2 | $\underline{U}$ca= $220e^{-j90°}$ | $\underline{U}$ca= $380e^{-j45°}$ | $\underline{U}$ав= $220e^{j60°}$ | $\underline{U}$вс= $380e^{-j165°}$ | $\underline{U}$ав= $220e^{j45°}$ | $\underline{U}$вс= $380e^{j150°}$ | $\underline{U}$ca= $220e^{j90°}$ |
| 3 | 40 | 50 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 4 | 0 | 30 | 45 | 60 | -30 | -45 | -60 |
| 5 | A | B | C | AB | BC | CA | A |

## Пример выполнения индивидуального задания

**Исходные данные:** $\underline{U}ав=220e^{-j30}B$; $Z=20\ Ом$; $\varphi = -45^{o}$.

Определить токи $\underline{I}_A$ , $\underline{I}_B$ , $\underline{I}_C$ , $\underline{I}_{AB}$ , $\underline{I}_{BC}$ , $\underline{I}_{CA}$ , активную $P$, реактивную $Q$ и полную $S$ мощности для симметричного режима и при обрыве линейного провода А.

**РЕШЕНИЕ**

Так как $\underline{U}ав=220e^{-j30}B$, то $\underline{U}вс=\underline{U}ав\cdot e^{-j120}=220e^{-j150}B$,

$$\underline{U}ca=\underline{U}ав\cdot e^{j120}=220e^{j90}B.$$

$$Z= Z\cdot e^{j\varphi}=20\ e^{-j45}=(10\cdot\sqrt{2}-j10\cdot\sqrt{2}\ ).$$

**Симметричный режим**

$$\underline{I}_{AB}=\frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}}=\frac{220e^{-j30}}{20e^{-j45}}=11e^{j15}\text{ А};$$

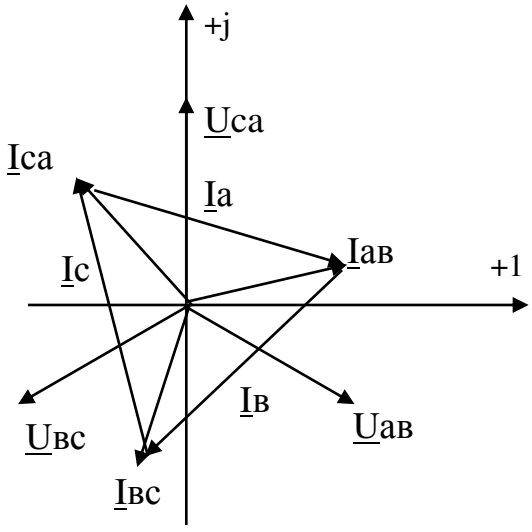



Рис. П8.2

$$\underline{I}_{BC}=\underline{I}_{AB}\cdot e^{-j120}=11e^{-j105}\text{ А};$$

$$\underline{I}_{CA}=\underline{I}_{AB}\cdot e^{j120}=11e^{j135}\text{ А}.$$

Линейные токи можно определить по первому закону Кирхгофа или из векторной диаграммы. Построим векторную диаграмму (рис.П8.2)

Из векторной диаграммы следует, что

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} \cdot \sqrt{3} \cdot e^{-j30} = 11\sqrt{3}e^{-j15} A$$

Тогда $\underline{I}_B = 11\sqrt{3}e^{-j135}$ А; $\underline{I}_C = 11\sqrt{3}e^{j105}$ А.

Мощности: $S = \sqrt{3}\, U_л I_л = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 11\sqrt{3} = 7270\ BA.$

$$P = S \cdot \cos\varphi = 7270 \cdot \cos(-45^o) = 5130\ Bm.$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi = 7270 \cdot \sin(-45^o) = -5130\ BAp.$$

**Несимметричный режим**

При обрыве линейного провода А трехфазная цепь превращается в однофазную.

$$\underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}} = 11e^{-j105} \text{ А},$$

этот ток остался без изменений

$$\underline{I}_{AB} = \underline{I}_{CA} = -\frac{\underline{U}_{BC}}{2\underline{Z}} = 5.5e^{j75} \text{ А},$$

$$\underline{I}_A = 0;$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} =$$
$$= 11e^{-j105} - 5.5e^{j75} =$$
$$= 16.5e^{-j105}\ A$$

$$\underline{I}_C = -\underline{I}_B = 16.5e^{j75} \text{ А}.$$

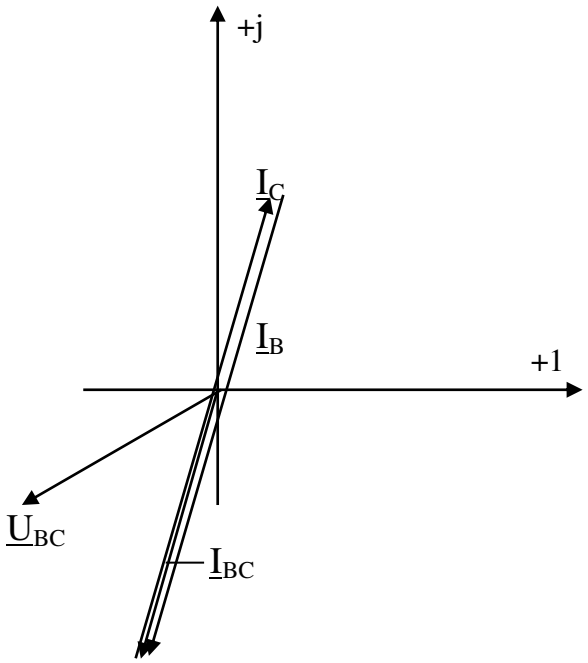



Рис. П8.3

Векторная диаграмма приведена на рис. П.83.3.

Мощности в несимметричном режиме:

$$S = U_{BC} I_B = \cdot 220 \cdot 16{,}5 = 3630\ BA.$$

$$P = S \cdot \cos\varphi = 3630 \cdot \cos(-45^o) = 2570\ Bm.$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi = 3630 \cdot \sin(-45^o) = -2570\ BAp.$$

# ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 9

Потребитель электроэнергии, фазы которого имеют комплексные сопротивления: $\underline{Z}_{ав}$, $\underline{Z}_{вс}$, $\underline{Z}_{са}$ и соединены в трехфазную электрическую цепь «треугольником», питается симметричной системой линейных напряжений .

Определить фазные $I_ф$ и линейные $I_л$ токи потребителя и показания ваттметров PW1 и PW2. Построить векторную диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов.

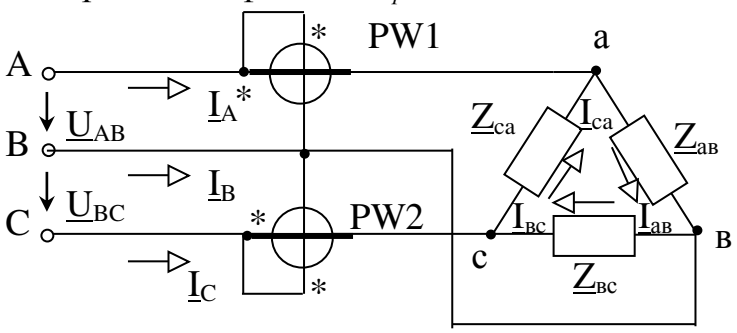



Рис. П9.1

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

| **Величина** | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** |
| $U_л$, В | $\underline{U}_{ав}=380e^{j30°}$ | $\underline{U}_{са}=380e^{j75°}$ | $\underline{U}_{вс}=380e^{-j150°}$ | $\underline{U}_{са}=380e^{j120°}$ | $\underline{U}_{ав}=220e^{-j60°}$ | $\underline{U}_{вс}=380e^{-j165°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 6+j8 | 16-j12 | 20 | 4+j4 | 10+j10 | 18-j24 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 29-j15 | 19 | 6-j8 | 9+j12 | 30 | 28+j21 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 12+j16 | 20+j15 | 15+j20 | 4-j3 | 20-j15 | 20 |

| **Величина** | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **7** | **8** | **9** | **10** | **11** | **12** |
| $U_л$, В | $\underline{U}_{ав}=220e^{j180°}$ | $\underline{U}_{са}=220e^{-j30°}$ | $\underline{U}_{вс}=220e^{-j60°}$ | $\underline{U}_{са}=380e^{-j30°}$ | $\underline{U}_{ав}=220e^{j150°}$ | $\underline{U}_{вс}=380e^{j60°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 22 | 12-j16 | 10 | 33+j44 | 12+j5 | 30+j30 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 4+j4 | 8+j8 | 9+j8 | 50 | 9+j12 | 30-j24 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 6-j8 | 20 | 12+j16 | 32-j24 | 20 | 40-j40 |

| **Величина** | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **13** | **14** | **15** | **16** | **17** | **18** |
| $U_л$, В | $\underline{U}_{ав}=220e^{-j165°}$ | $\underline{U}_{са}=380e^{j90°}$ | $\underline{U}_{вс}=220e^{-j45°}$ | $\underline{U}_{са}=380e^{j60°}$ | $\underline{U}_{ав}=220e^{-j165°}$ | $\underline{U}_{вс}=380e^{-j60°°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 50+j50 | 33+j44 | 20 | 40+j40 | 45 | 30+j30 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 60 | 32-j24 | 9+j12 | 44+j36 | 24-j32 | 24-j32 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 48+j36 | 50 | 20+j15 | 55 | 36+j27 | 27+j36 |

| Вели-чина | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **19** | **20** | **21** | **22** | **23** | **24** |
| $U_л$, В | $\underline{U}_{ав}=220e^{-j90°}$ | $\underline{U}_{са}=380e^{-j45°}$ | $\underline{U}_{вс}=220e^{j60°°}$ | $\underline{U}_{са}=380e^{-j165°}$ | $\underline{U}_{ав}=220e^{j45°}$ | $\underline{U}_{вс}=380e^{j150°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 20 | 27-j36 | 12-j9 | 48-j36 | 20 | 36+j27 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 12-j9 | 50 | 20+j15 | 40+j40 | 20+j15 | 24-j32 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 8+j8 | 44+j33 | 20 | 60 | 12-j9 | 45 |

| Вели-чина | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **25** | **26** | **27** | **28** | **29** | **30** |
| $U_л$, В | $\underline{U}_{ав}=220e^{-j150°}$ | $\underline{U}_{са}=380e^{-j150°}$ | $\underline{U}_{вс}=220e^{j75°}$ | $\underline{U}_{са}=220e^{-j30°}$ | $\underline{U}_{ав}=220e^{-j60°}$ | $\underline{U}_{вс}=380e^{-j120°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 36+j27 | 12+j9 | 27+j36 | 4+j4 | 32-j24 | 19 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 24-j32 | 20 | 50 | 6-j8 | 30+j30 | 20-j15 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 45 | 20+j15 | 44+j33 | 15 | 48+j36 | 16+j12 |

| Вели-чина | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **31** | **32** | **33** | **34** | **35** | **36** |
| $U_л$, В | $\underline{U}_{ав}=220e^{j165°}$ | $\underline{U}_{са}=127e^{j75°}$ | $\underline{U}_{вс}=127e^{-j150°}$ | $\underline{U}_{са}=220e^{j90°}$ | $\underline{U}_{ав}=127e^{-j30°}$ | $\underline{U}_{вс}=220e^{-j45°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 10 | 6-j8 | 11 | 15-j20 | 5+j12 | 16-j12 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 12+j9 | 4+j4 | 4+j4 | 12+j16 | 10 | 20+j15 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 12+j16 | 10 | 3-j4 | 25 | 4-j3 | 20 |

| Вели-чина | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **37** | **38** | **39** | **40** | **41** | **42** |
| $U_л$, В | $\underline{U}_{ав}=220e^{-j165°}$ | $\underline{U}_{са}=127e^{j45°}$ | $\underline{U}_{вс}=220e^{j150°}$ | $\underline{U}_{са}=127e^{-j90°}$ | $\underline{U}_{ав}=220e^{-j60°}$ | $\underline{U}_{вс}=127e^{-j165°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 20 | 10+j10 | 9+j12 | 12+j5 | 50+j50 | 32-j24 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 6-j8 | 20 | 8+j8 | 9+j12 | 60 | 30+j30 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 15+j20 | 18-j24 | 12-j16 | 20 | 48+j36 | 50 |

| Вели-чина | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **43** | **44** | **45** | **46** | **47** | **48** |
| $U_л$, В | $\underline{U}_{ав}=127e^{-j45°}$ | $\underline{U}_{са}=127e^{j165°}$ | $\underline{U}_{вс}=127e^{-j150°}$ | $\underline{U}_{са}=220e^{j90°}$ | $\underline{U}_{ав}=127e^{j150°}$ | $\underline{U}_{вс}=220e^{-j30°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 45 | 40-j40 | 33+j44 | 20 | 5+j5 | 40+j40 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 24-j32 | 48+j36 | 32-j24 | 9-j12 | 10 | 24-j32 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 36+j27 | 24-j32 | 50 | 8+j8 | 3-j4 | 36+j27 |

| Вели-чина | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **49** | **50** | **51** | **52** | **53** | **54** |
| $U_л$, В | $\underline{U}ав=127e^{j120°}$ | $\underline{U}ca=220e^{-j150°}$ | $\underline{U}вс=127e^{j60°°}$ | $\underline{U}ca=127e^{j120°}$ | $\underline{U}ав=220e^{-j90°}$ | $\underline{U}вс=127e^{-j75°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 5+j12 | 27-j36 | 20 | 30+j30 | 18-j24 | 12-j24 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 10 | 50 | 6-j8 | 24-j32 | 28+j21 | 30+j30 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 32+j24 | 44+j33 | 20+j15 | 27+j36 | 40 | 48+j36 |

| Вели-чина | Варианты | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **55** | **56** | **57** | **58** | **59** | **60** |
| $U_л$, В | $\underline{U}ав=220e^{j165°}$ | $\underline{U}ca=220e^{j120°}$ | $\underline{U}вс=127e^{-j60°}$ | $\underline{U}ca=127e^{-j150°}$ | $\underline{U}вс=127e^{-j150°}$ | $\underline{U}ca=220e^{-j165°}$ |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 12-j9 | 20+j20 | 8+j8 | 12-j12 | 12-j9 | 30+j30 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 20+j15 | 32+j24 | 12-j9 | 20+j20 | 24+j32 | 32-j24 |
| $\underline{Z}_{ав}$ Ом | 20 | 20+j15 | 20 | 20+j15 | 20+j15 | 40-j40 |

## Пример выполнения индивидуального задания

***Исходные данные***: $\underline{U}_{CA} = 220e^{j75^o}$ В, $\underline{Z}_{AB} = (30 + j30)$Ом;

$\underline{Z}_{BC} = (32 - j24)$Ом; $\underline{Z}_{CA} = (40 - j40)$Ом.

Определить: $\underline{I}_{AB}$, $\underline{I}_{BC}$, $\underline{I}_{CA}$, $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$, $P_{W1}$, $P_{W2}$.

Построить векторную диаграмму напряжений, совмещенную с диаграммой токов.

При прямом чередовании фаз

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{AB}e^{-j120^o}; \qquad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_{AB}e^{j120^o}.$$

Поэтому $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{CA}e^{-j120^o} = 220e^{j75^o} \cdot e^{-j120^o} = 220e^{-j45^o}$ В.

$\underline{U}_{BC} = 220e^{-j45^o} \cdot e^{-j120^o} = 220e^{-j165^o}$ В.

По закону Ома

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{220e^{-j45^o}}{30 + j30} = \frac{220e^{-j45^o}}{30\sqrt{2}e^{j45^o}} = 5{,}20e^{-j90^o} = -j5{,}20 \text{ А}.$$

$$\underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}} = \frac{220e^{-j165^o}}{32 - j24} = \frac{220e^{-j165^o}}{40 \cdot e^{-j36,9^o}} = 5,5e^{-j128,1^o} = (-3,4 - j4,33)\text{A}$$

$$\underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}} = \frac{220e^{j75^o}}{40\sqrt{2} \cdot e^{-j45^o}} = 3,9e^{j120^o} = (-1,95 + j3,37)\text{A}.$$

По первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA} = -j5,20 + 1,95 - j3,37 = 1,95 - j8,57 = 8,80e^{-j77,2^o}\ \text{A}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} = -3,4 - j4,33 + j5,20 = -3,4 + j0,87 = 3,5e^{j165,7^o}\ \text{A}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC} = -1,95 + j3,37 + 3,4 + J4,33 = 1,45 + j7,70 = 7,84e^{+j89,3^o}\ \text{A}$$

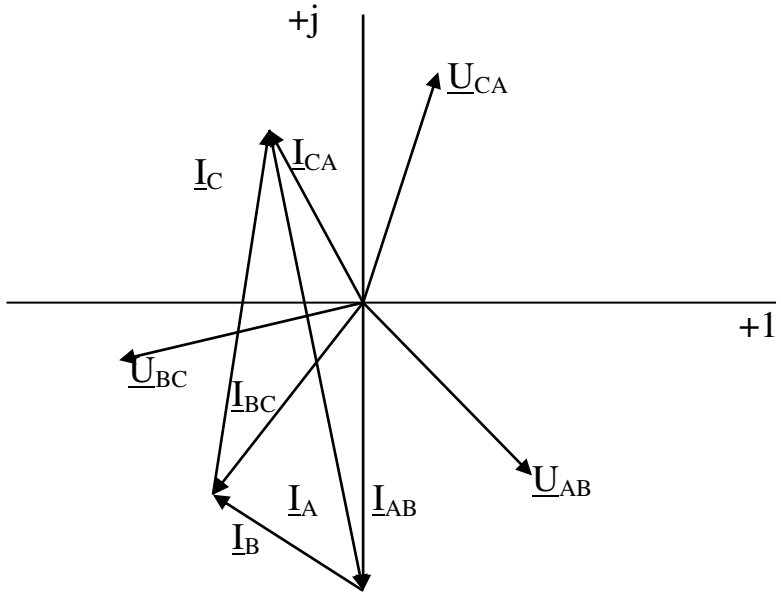
Показания ваттметров:

$$P_{W1} = U_{AB} \cdot I_A \cdot \cos\left(\underline{U}_{AB}\ \hat{}\ \underline{I}_A\right) = 220 \cdot 8,80 \cdot \cos\left(-45^o + 77,2^o\right) = -1030\ \text{Вт}$$

$$P_{W2} = U_{CB} \cdot I_C \cdot \cos\left(\underline{U}_{CB}\ \hat{}\ \underline{I}_C\right) = 220 \cdot 7,84 \cdot \cos\left(-165^o + 180^o - 89,3^o\right) =$$

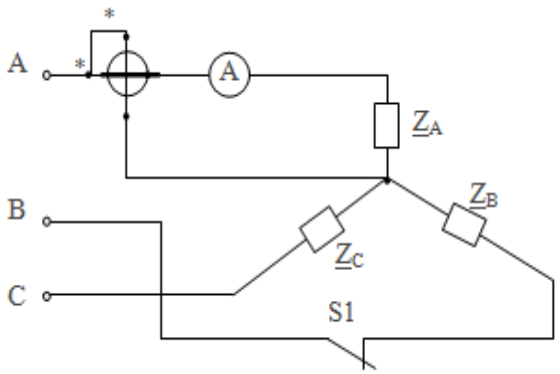
$$= 460\ Bm.$$

Векторная диаграмма для токов и напряжений, построенная по результатам расчетов, приведена на рисунке.



## ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 10

Определить фазные токи, активную мощность *P*, реактивную мощность *Q* и полную мощность *S*. Построить топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов, при замкнутом ключе *S1*. Определить показание амперметра при разомкнутом выключателе *S1*. Построить диаграмму напряжений и токов при разомкнутом выключателе *S1*.




## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_л$, В | 220 | 380 | 660 | 220 | 380 | 660 | 220 |
| $\underline{Z}_а=\underline{Z}_в=\underline{Z}_с$, Ом | 1,5+j2 | 3+j4 | 6+j8 | 9+j12 | 12+j16 | 15+j20 | 18+j24 |

| Вариант | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_л$, В | 380 | 660 | 220 | 380 | 127 | 380 | 220 |
| $\underline{Z}_а=\underline{Z}_в=\underline{Z}_с$, Ом | $10e^{j30^o}$ | $10e^{j45^o}$ | $10e^{j60^o}$ | $20e^{j30^o}$ | $10e^{j60^o}$ | 12+j16 | 3+j4 |

| Вариант | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $U_л$, В | 660 | 380 | 220 | 127 | 220 | 380 |
| $\underline{Z}_а=\underline{Z}_в=\underline{Z}_с$, Ом | 18+j24 | 20+j15 | 16+j12 | 12+j9 | 4+j3 | 12+j9 |

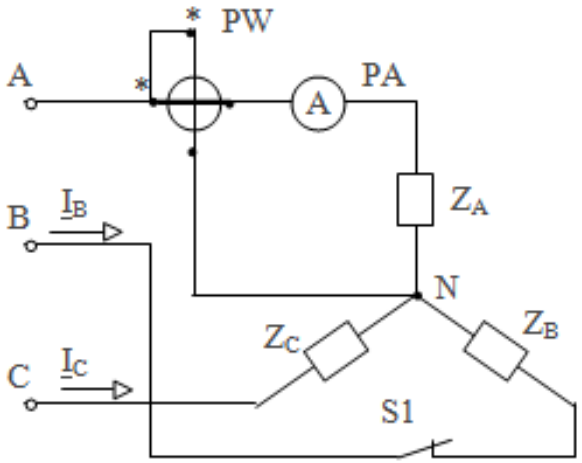
## Пример выполнения индивидуального задания

***Исходные данные:***

$U_л = 380В;$ $\underline{Z}_ф = 3 + j4 = 5e^{j53}$ Ом

**РЕШЕНИЕ**

Запишем условие задачи в комплексной форме




$$\underline{U}_{AB} = 380e^{j30^o}\ B\ ;$$

$$\underline{U}_A = 220\ B\ ;$$

$$\underline{U}_{BC} = 380e^{-j90^o}\ B$$

$$\underline{U}_B = 220e^{-j120^o}\ B$$

$$\underline{U}_{CA} = 380e^{j150^o}\ B$$

$$\underline{U}_C = 220e^{j120^o}\ B$$

$$Z_ф = 3 + j4 = 5e^{j53^o}\ Ом$$

Определяем фазные токи

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_a} = \frac{220}{5e^{j53^o}} = 44e^{j53^o}\ A$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_в} = \frac{220e^{-j120^o}}{5e^{j53^o}} = 44e^{j173^o}\ A$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j120^o}}{5e^{j53^o}} = 44e^{j67^o}\ A$$

Определяем показания ваттметра

$$P_W = U_A \cdot I_A \cos\left(\underline{U}_A \wedge \underline{I}_A\right) = 220 \cdot 44 \cos 53^o = 5808Bm.$$

Так как нагрузка симметричная, активная мощность цепи равна

$$P = 3P_{ф} = 3 \cdot 5808 = 17424 Bm$$

или $P = 3 \cdot I_{ф}^{2} \cdot R = 3 \cdot 44^{2} \cdot 3 = 17424 Bm.$

Реактивная мощность

$$Q = 3 \cdot I_{ф}^{2} \cdot X = 3 \cdot 44^{2} \cdot 4 = 23232 Bap;$$

$$Q = 3 \cdot U_{ф} \cdot I_{ф} \sin\varphi = 3 \cdot 220 \cdot 44 \cdot \sin 53^{o} = 23232 Bap.$$

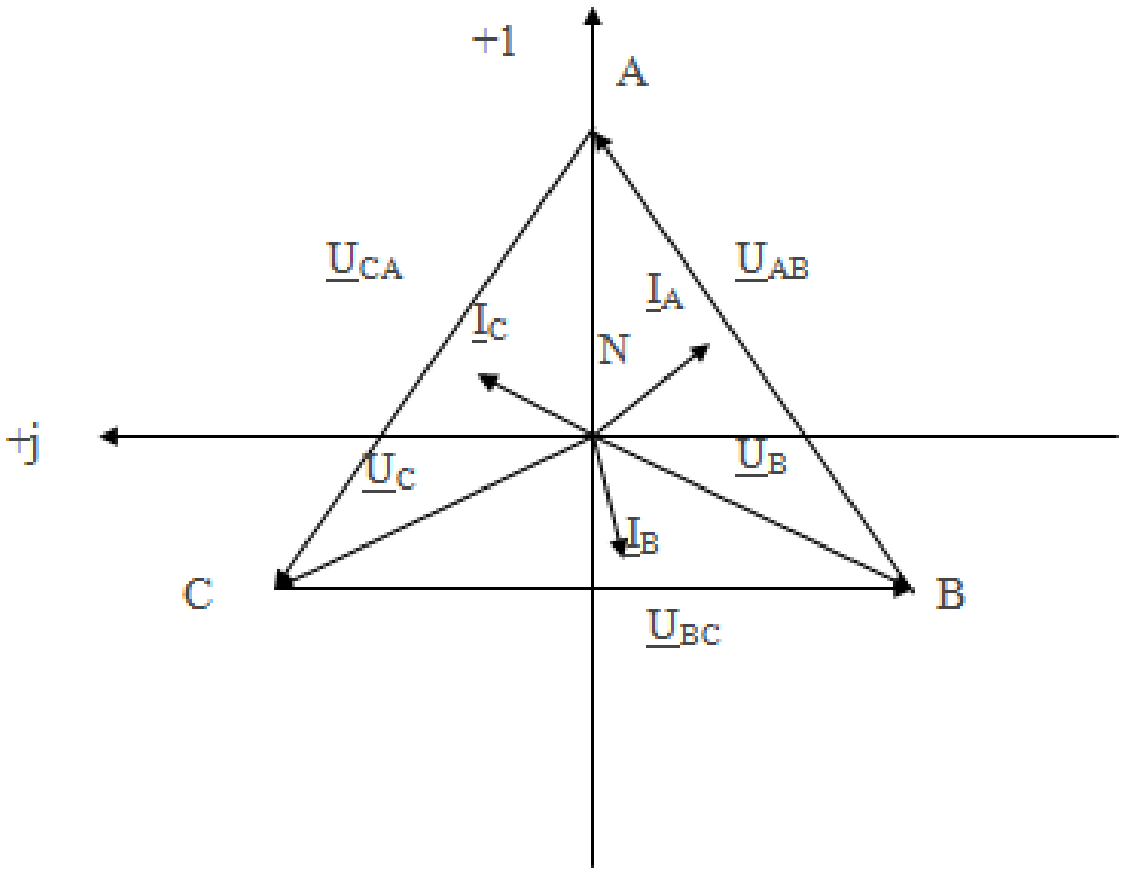
Полная мощность

$$S = 3U_{ф} \cdot I_{ф} = 3 \cdot 220 \cdot 4 = 29040 BA;$$

$$S = \sqrt{P^{2} + Q^{2}} = \sqrt{17424^{2} + 23232^{2}} = 29040 \ BA.$$

Построим топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов, при замкнутом ключе S1.

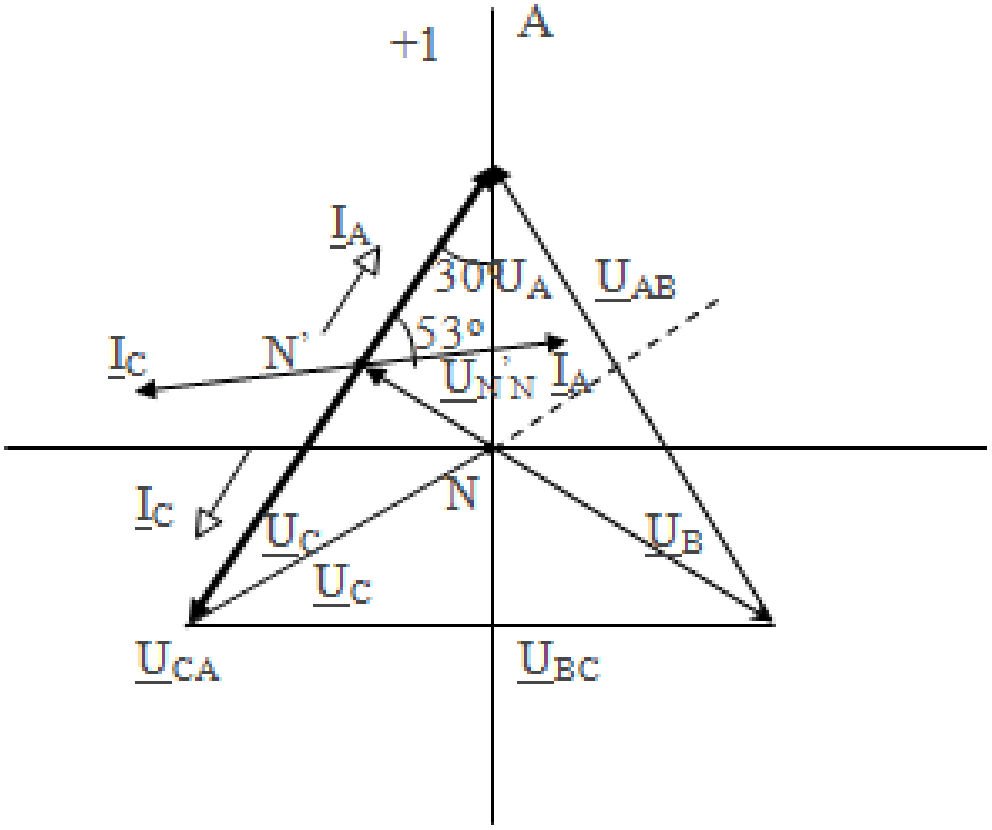
Режим симметричный. Напряжение смещения нейтрали $U_{N}{}^{1}{}_{N} = 0$.



При размыкании ключа S1 происходит обрыв фазы В. Следовательно, $\underline{I}_B = 0$, тогда ток $\underline{I}_A = -\underline{I}_C$ . Сопротивления $\underline{Z}_A$ и $\underline{Z}_C$ оказываются соединенными последовательно и находятся под линейным напряжением, но так как $\underline{Z}_A = \underline{Z}_C$, то падение напряжения на сопротивлениях равно $U_л/2$.

$$\underline{U}_A = 190e^{-j30^o}\ B;\ \underline{U}_C = 190e^{j150^o}\ B;$$

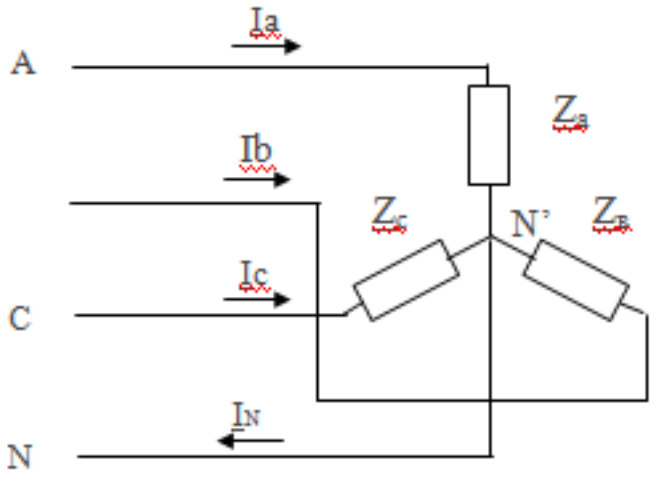
$$\underline{I}_A = \frac{190e^{-j30^o}}{5e^{j53^o}} = 38e^{-j83^o}\ A;\quad \underline{I}_C = \frac{190e^{j150^o}}{5e^{j53^o}} = 38e^{j97^o}\ A.$$




Напряжение смещения нейтрали

$$U_{N'N} = U_A \cdot \sin 30^o = 220 \cdot 0{,}5 = 110B.$$

## ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 11




Три потребителя электроэнергии, имеющие одинаковые полные сопротивления фаз $Z_ф$, соединены “звездой” и включены в четырехпроводную трехфазную сеть с системой симметричных линейных напряжений $U_л$.

Определить токи $I_ф$ по фазам и в нейтральном проводе $I_N$, а также мощность P трехфазной цепи. Построить топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов.

| Варианты | Величины | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Uл, В | $Z_ф$, Ом | Фаза A | | Фаза B | | Фаза C | |
| | | | $cos\phi_a$ | характер нагрузки | $cos\phi_b$ | характер нагрузки | $cos\phi_c$ | характер нагрузки |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | $\underline{U}_{AB} = 220e^{j30}$ | 5 | 1 | R | 0 | $X_L$ | 0,5 | R,Xc |
| 2 | $\underline{U}_{AB} = 380$ | 10 | 0,71 | R,$X_L$ | 0,6 | R,$X_L$ | 0 | Xc |
| 3 | $\underline{U}_{BC} = 380e^{-j150}$ | 22 | 0,6 | R,Xc | 1 | R | 0,71 | R,Xc |
| 4 | $\underline{U}_{CA} = 220e^{j60}$ | 12,7 | 0,87 | R,$X_L$ | 0,71 | R,Xc | 1 | R |
| 5 | $\underline{U}_{AB} = 220e^{j90}$ | 25,4 | 0 | $X_L$ | 0,8 | R,Xc | 0,8 | R,$X_L$ |
| 6 | $\underline{U}_{BC} = 380e^{-j90}$ | 11 | 0,8 | R,Xc | 0,87 | R,Xc | 0,6 | R,$X_L$ |
| 7 | $\underline{U}_{AB} = 220e^{-j60}$ | 40 | 0,5 | R,Xc | 0 | $X_L$ | 0,87 | R,$X_L$ |
| 8 | $\underline{U}_{BC} = 380e^{-j120}$ | 50 | 0,5 | R,$X_L$ | 0,5 | R,$X_L$ | 1 | R |
| 9 | $\underline{U}_{CA} = 380e^{j90}$ | 44 | 0 | Xc | 0,6 | R,$X_L$ | 0,71 | R,$X_L$ |
| 10 | $\underline{U}_{BC} = 220e^{-j30}$ | 12,7 | 0,8 | R,$X_L$ | 0,71 | R,Xc | 0,5 | R,$X_L$ |
| 11 | $\underline{U}_{AB} = 380e^{j60}$ | 27,5 | 0,71 | R,$X_L$ | 1 | R | 0,6 | R,Xc |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | $\underline{U}_{CA} = 380e^{j150}$ | 22 | 1 | R | 0,87 | $R,X_L$ | 0,5 | $R,X_L$ |
| 13 | $\underline{U}_{AB} = 220e^{-j30}$ | 21 | 0,87 | $R,X_L$ | 0,5 | R,Xc | 0 | $X_L$ |
| 14 | $\underline{U}_{CA} = 220e^{j120}$ | 42 | 0,6 | $R,X_L$ | 0,8 | $R,X_L$ | 1 | R |
| 15 | $\underline{U}_{BC} = 380e^{-j60}$ | 44 | 1 | R | 0,6 | R,Xc | 0,71 | $R,X_L$ |
| 16 | $\underline{U}_{CA} = 380e^{-j150}$ | 10 | 1 | R | 0 | Xc | 0,87 | $R,X_L$ |
| 17 | $\underline{U}_{AB} = 220e^{-j30}$ | 25,4 | 0 | $X_L$ | 0,87 | R,Xc | 0,6 | $R,X_L$ |
| 18 | $\underline{U}_{CA} = 220e^{j60}$ | 6,1 | 0,5 | $R,X_L$ | 0,6 | $R,X_L$ | 0,71 | R,Xc |
| 19 | $\underline{U}_{BC} = 220e^{-j120}$ | 32 | 0,87 | R,Xc | 0,5 | $R,X_L$ | 1 | R |
| 20 | $\underline{U}_{AB} = 380e^{j90}$ | 50 | 0,71 | $R,X_L$ | 0,71 | $R,X_L$ | 0,6 | R,Xc |
| 21 | $\underline{U}_{AB} = 220e^{j30}$ | 25,4 | 0,6 | R,Xc | 0,8 | R,Xc | 0,71 | $R,X_L$ |
| 22 | $\underline{U}_{BC} = 380e^{-j150}$ | 11 | 0,87 | $R,X_L$ | 0 | $X_L$ | 0,5 | R,Xc |
| 23 | $\underline{U}_{AB} = 220e^{j90}$ | 12,7 | 0 | $X_L$ | 1 | R | 0,71 | R,Xc |
| 24 | $\underline{U}_{CA} = 380e^{j90}$ | 44 | 0,71 | $R,X_L$ | 0 | Xc | 0,6 | $R,X_L$ |
| 25 | $\underline{U}_{BC} = 380e^{-j120}$ | 22 | 0,5 | $R,X_L$ | 1 | R | 0,87 | $R,X_L$ |
| 26 | $\underline{U}_{AB} = 220e^{j30}$ | 21 | 0 | $X_L$ | 0,5 | R,Xc | 0,87 | R,Xc |
| 27 | $\underline{U}_{CA} = 380e^{-j150}$ | 50 | 1 | R | 0,71 | R,Xc | 0,5 | $R,X_L$ |
| 28 | $\underline{U}_{BC} = 380e^{-j90}$ | 10 | 0,6 | $R,X_L$ | 0 | Xc | 0,71 | $R,X_L$ |
| 29 | $\underline{U}_{AB} = 220$ | 25,4 | 0,87 | R,Xc | 0 | $X_L$ | 0,6 | $R,X_L$ |
| 30 | $\underline{U}_{CA} = 220e^{j150}$ | 12,7 | 0,8 | $R,X_L$ | 0,5 | $R,X_L$ | 0,71 | R,Xc |

## Пример выполнения индивидуального задания

**Исходные данные:**

| Величины | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Характер нагрузки | $Z_ф$, Ом | Фаза А | | Фаза В | | Фаза С | |
| | | $\cos\varphi_A$ | Характер нагрузки | $\cos\varphi_B$ | Характер нагрузки | $\cos\varphi_C$ | Характер нагрузки |
| $\underline{U}_{AB}$=380 | 10 | 0,71 | $R,X_L$ | 0,6 | $R,X_L$ | 0 | $X_C$ |

РЕШЕНИЕ

$$\underline{U}_{AB} = 380 \ B;$$

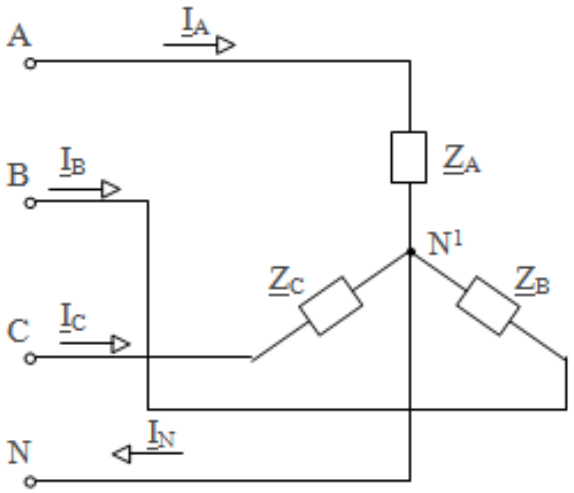
$$\underline{U}_A = 220e^{-j30^o} \ B;$$

$$\underline{U}_{BC} = 380e^{-j120^o} \ B;$$

$$\underline{U}_B = 220e^{-j150^o} \ B;$$

$$\underline{U}_{CA} = 380e^{j120^o} \ B;$$

$$\underline{U}_C = 220e^{j90^o} \ B;$$




$$\underline{Z}_A = 10e^{j45^o} = 7{,}07 + j7{,}07 \ \text{Ом};$$

$$\underline{Z}_в = 10e^{j53^o} = 6 + j8 \ \text{Ом};$$

$$\underline{Z}_c = 10e^{-j90^o} = -j10 \ \text{Ом}.$$

Определяем фазные токи $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$.

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_a} = \frac{220e^{-j30^o}}{10e^{j45^o}} = 22e^{-j75^o} \ \text{А};$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_в} = \frac{220e^{-j150^o}}{10e^{j53^o}} = 22e^{-j203^o} \ \text{А};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j90^o}}{10e^{-j90^o}} = 22e^{-j180^o} \ \text{А}.$$

Определяем ток в нулевом проводе по первому закону Кирхгофа

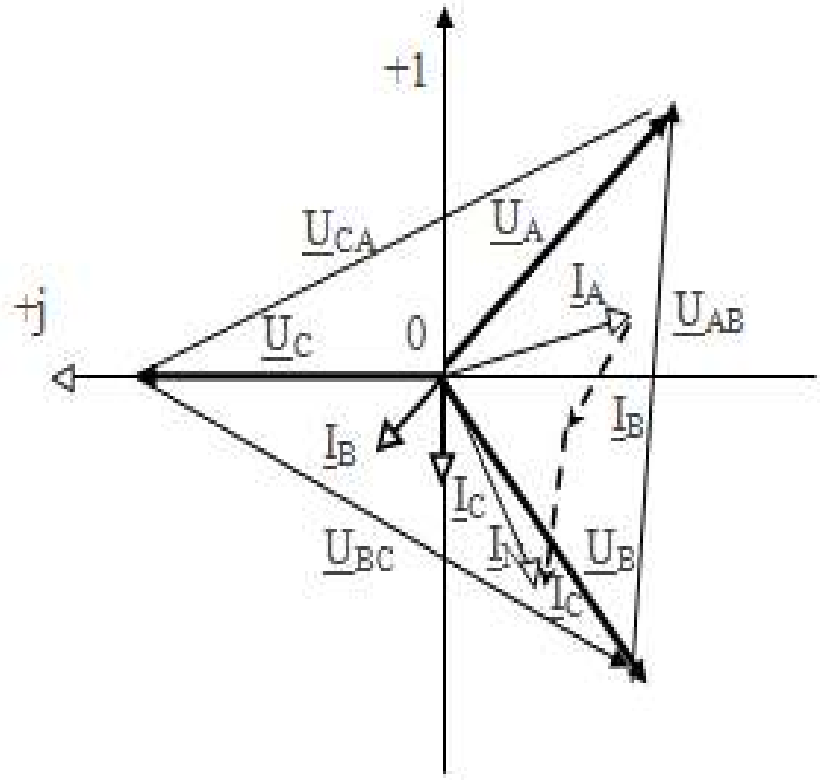
$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 22e^{-j75^o} + 22e^{-j203^o} + 22e^{j280^o} =$$

$$= 5{,}7 - j21{,}2 - 20{,}2 + j8{,}6 - 22 = -37{,}5 - j12{,}6 = 39{,}6e^{-j161^o} \ A$$

Определяем активную мощность всей цепи, которая равна сумме активных мощностей по фазам

$$P = \underline{I}_A^2 R_A + \underline{I}_B^2 R_B + \underline{I}_C^2 R_C = 22^2 \cdot 7{,}07 + 22^2 \cdot 6 + 22^2 \cdot 0 =$$
$$3422 + 2904 = 6326 \ \ Вт$$

Строим топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов.



## ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 12

Рассчитать переходный процесс в цепи с емкостью. В момент времени $t = 0$ ключ находится в положении 1, а через промежуток $\Delta t$ - в положении 2 (рис. П.12.1)

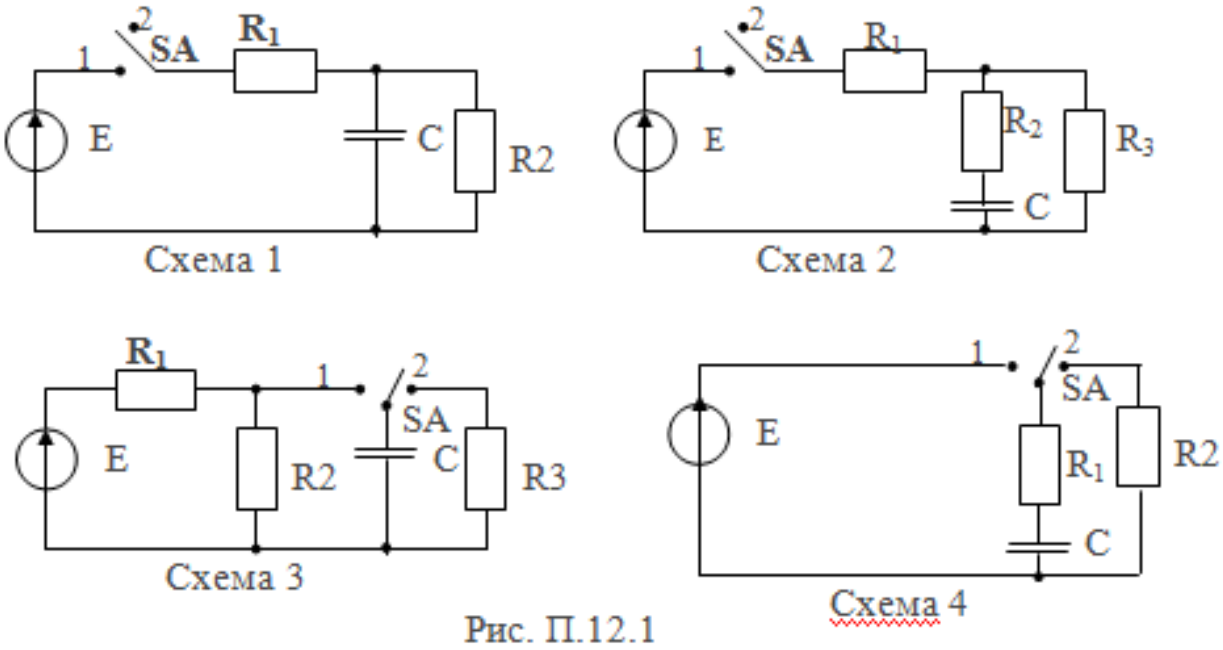



Рис. П.12.1

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

| Вариант | № схемы | *R1* кОм | *R2* кОм | *R3* кОм | *C* мкФ | *E* В | *Δt* С |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 30 | 10 | - | 400 | 40 | 4 |
| 2 | 4 | 40 | 10 | - | 10 | 100 | 1 |
| 3 | 2 | 10 | 20 | 20 | 50 | 90 | 0,5 |
| 4 | 3 | 20 | 30 | 40 | 400 | 30 | 2,5 |
| 5 | 1 | 10 | 30 | - | 160 | 60 | 5 |
| 6 | 4 | 10 | 20 | - | 12 | 100 | 2 |
| 7 | 2 | 20 | 10 | 30 | 50 | 60 | 1 |
| 8 | 3 | 5 | 20 | 30 | 100 | 80 | 1 |
| 9 | 1 | 30 | 10 | - | 100 | 50 | 4 |
| 10 | 4 | 20 | 20 | - | 20 | 100 | 2 |
| 11 | 2 | 10 | 30 | 20 | 10 | 120 | 1,2 |
| 12 | 3 | 10 | 30 | 20 | 100 | 60 | 0,8 |
| 13 | 1 | 10 | 30 | - | 10 | 50 | 4 |
| 14 | 2 | 10 | 10 | 20 | 2 | 100 | 0,7 |
| 15 | 3 | 30 | 10 | 20 | | 40 | 1 |

***Требуется определить:***

1. Постоянную времени зарядки конденсатора.
2. Постоянную времени разрядки конденсатора
3. Построить временную диаграмму изменения напряжения на конденсаторе.

Значения данных величин взять из таблицы, согласно заданию преподавателя.

| Вариант | № схемы | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | C | E | Δ t |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | кОм | кОм | кОм | мкФ | В | С |

## Пример выполнения индивидуального задания № 12

**Исходные данные:**

| Вари-ант | № схемы | *R1* | *R2* | *R3* | *C* | *E* | *Δt* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | кОм | кОм | кОм | мкФ | В | С |
| 3 | 2 | 10 | 20 | 20 | 10 | 90 | 0,5 |

**Решение**

1. ЗАРЯДКА КОНДЕНСАТОРА

Коммутация происходит в момент времени $t = 0$. Ключ SA замыкается в положение 1 (рис. П.12.2).

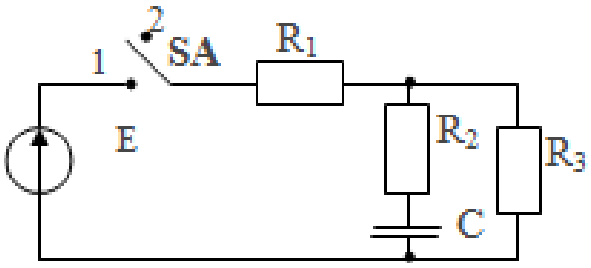



Схема 2

Рис. П.12.2

1.Выбираем положительные направления токов и составляем систему уравнений по законам Кирхгофа для послекоммутационной цепи.

2.

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0; \quad (1) \qquad i_1 R_1 + i_2 R_2 + u_C = E; \quad (2)$$

$$i_3 R_3 - i_2 R_2 - u_C = 0; \quad (3) \qquad u_C = \frac{1}{C}\int i_2 dt \ \text{ и } \ i_2 = C\frac{du_C}{dt}; \quad (4)$$

из (2) $$i_1 = \frac{E}{R_1} - \frac{u_C}{R_1} - \frac{R_2}{R_1} C \frac{du_C}{dt}\ ; \quad (5)$$

из (3) $$i_3 = \frac{u_C}{R_3} + \frac{R_2}{R_3} C \frac{du_C}{dt}\ . \quad (6)$$

Подставляем уравнения (4), (5),(6) в уравнение (1):

$$\frac{E}{R_1} - \frac{u_C}{R_1} - \frac{R_2 C}{R_1} \cdot \frac{du_C}{dt} - C\frac{du_C}{dt} - \frac{R_2 C}{R_3}\frac{du_C}{dt} - \frac{u_C}{R_3} = 0\ .$$

Преобразуем полученное уравнение:

$$C\left(\frac{R_2}{R_1} + 1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\frac{du_C}{dt} + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)u_C = \frac{E}{R_1}\ . \quad (7)$$

Уравнение (7) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными коэффициентами. Следовательно, решением задачи является уравнение

$$u_{c(t)} = u_{C\,np} + Ae^{pt}\ . \quad (8)$$

Принужденная составляющая напряжения $U_{Cnp}$ определяется как частное решение неоднородного уравнения (7):

$$C\left(\frac{R_2}{R_1} + 1 + \frac{R_2}{R_3}\right)\frac{du_{Cnp}}{dt} + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)u_{Cnp} = \frac{E}{R_1}\ ;$$

$$U_{Cnp} = \frac{E \cdot R_1 \cdot R_3}{R_1(R_1 + R_3)} = \frac{E \cdot R_3}{R_1 + R_3}\ ; \qquad U_{Cnp} = \frac{90 \cdot 20 \cdot 10^3}{(10+20)\cdot 10^3} = 60B\ .$$

Составим характеристическое уравнение и решим его:

$$C\left(\frac{R_2}{R_1} + 1 + \frac{R_2}{R_3}\right) \cdot p + \frac{R_3 + R_1}{R_1 \cdot R_3} = 0\ ;$$

$$10 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot p = -\frac{(10+20)\cdot 10^3}{10 \cdot 20 \cdot 10^6}\ ;$$

$$p = -\frac{30 \cdot 10^3 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^6 \cdot 40} = -\frac{30}{8} = -3{,}75\ c^{-1}\ .$$

Отсюда постоянная времени зарядки $\tau_3 = \left|\frac{1}{p}\right| = 0{,}27\ c$.

Для определения постоянной интегрирования А рассмотрим уравнение (8) в момент времени *t=0*:

$$u_C(0) = u_{Cпр} + A \quad \text{или} \quad A = u_C(0) - u_{Cпр}$$
$$u_c(0\text{-}) = u_c(0+) = 0.$$

Отсюда $A = 0 - u_{Cпр} = - u_{Cпр}$. Окончательно получаем уравнение напряжения на конденсаторе в процессе его зарядки:

$$u_C(t) = u_{Cпр} - u_{Cпр}e^{pt} = u_{Cпр}\left(1 - e^{pt}\right)$$

или через постоянную времени $\tau_3$:

$$u_C(t) = u_{Cпр}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}}\right). \qquad (9)$$

## 2. РАЗРЯДКА КОНДЕНСАТОРА

Разрядка конденсатора *C* на сопротивление $R_3$ начинается в момент переключения ключа *SA* в положение 2 (рис. П.12.2).

Процесс описывается одним уравнением, т.к. разрядный ток протекает в замкнутом контуре:

$$i \cdot (R_3 + R_2) + u_C = 0.$$

Так как $i = \frac{Cdu_C}{dt}$, то $(R_3 + R_2)C\frac{du_C}{dt} + u_C = 0$.

Правая часть уравнения равна нулю, следовательно, принужденная составляющая напряжения также равна нулю, и уравнение переходного процесса имеет вид

$$u_C(t) = U_O e^{pt} = U_O e^{-\frac{t}{\tau_p}}; \qquad (10)$$

$$p = -\frac{1}{(R_3 + R_2)C} = -\frac{10^6}{40 \cdot 10^3 \cdot 10} = -\frac{1000}{400} = -2{,}5\ c^{-1}.$$

Отсюда $\tau_p = \frac{1}{2{,}5} = 0{,}4\ c$.

$U_o$ – напряжение на конденсаторе в момент коммутации.

$$U_o = U_{Cпр}\left(1 - \frac{t}{\tau_з}\right), \text{ при } t = 0{,}5c;$$

$$U_o = 60\left(1 - e^{-\frac{0{,}5}{0{,}27}}\right) = 60(1 - 0{,}16) = 50B.$$

## 3. ПОСТРОЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ДИАГРАММЫ

Для построения временной диаграммы зарядки определяем напряжение в момент времени $t = \tau_3, 2\tau_3, 3\tau_3, 4\tau_3$:

$$u_c(t) = U_{пр}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}}\right);$$

$$u_c(0) = U_{пр}(1 - 1) = 0;$$

$$u_c(\tau) = U_{пр}(1 - 2^{-1}) = 60(1 - 0{,}37) = 37{,}8\ B;$$

$$u_c(2\tau) = U_{пр}(1 - e^{-2}) = 60(1 - 0{,}13) = 52{,}2\ B;$$

$$u_c(3\tau) = U_{пр}(1 - e^{-3}) = 60(1 - 0{,}05) = 57\ B;$$

$$u_c(4\tau) = U_{пр}(1 - e^{-4}) = 60(1 - 0{,}02) = 58{,}8\ B.$$

Временная диаграмма переходного процесса зарядки конденсатора представлена на рис. П.16.3.

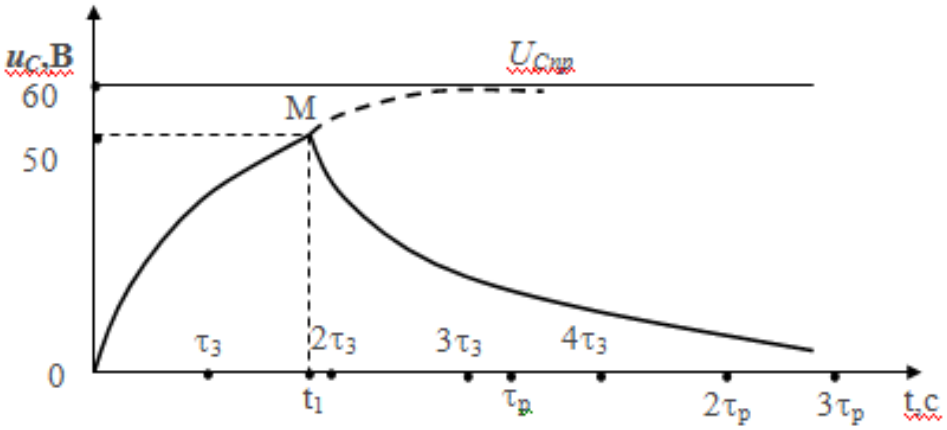



Рис. П.12.3

Коммутация на разрядку конденсатора производится через время $\Delta t$ = 0,5с (на рисунке П.12.3 точка $t_1$). В этот момент напряжение $U_o$= 50В (точка М). От точки $t_1$ ось абсцисс разбиваем на отрезки, равные постоянной времени $\tau_p$.

Определяем изменение напряжения в процессе разрядки:

$$u_c = U_o e^{-\frac{t}{\tau_p}};$$

$$u_c(\tau_p) = 50e^{-\frac{\tau_p}{\tau_p}} = 50e^{-1} = 18{,}4B;$$

$$u_c(2\tau_p) = 50e^{-\frac{2\tau_p}{\tau_p}} = 50e^{-2} = 6{,}7B;$$

$$u_c(3\tau_p) = 50e^{-\frac{3\tau_p}{\tau_p}} = 50e^{-3} = 2{,}5B.$$

## ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 13

***Требуется:*** По заданным входным сопротивлениям холостого хода, короткого замыкания и частоте определить первичные параметры длинной линии и ее длину.

### ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

| Вариант | $\underline{Z}_{10}$ | $\underline{Z}_{1k}$ | $f$ | $V_ф$ |
|---|---|---|---|---|
| № | Ом | Ом | Гц | км/с |
| 1 | $386e^{j42°}$ | $4620e^{j53°}$ | 800 | $2{,}5\cdot10^5$ |
| 2 | $360e^{j78°}$ | $900e^{j60°}$ | 2000 | $3\cdot10^5$ |
| 3 | $767e^{j50°}$ | $767e^{j50°}$ | 10000 | $2{,}4\cdot10^5$ |
| 4 | $597e^{j70°}$ | $836e^{j62°}$ | 1000 | $3\cdot10^5$ |
| 5 | $320e^{j68°}$ | $540e^{j50°}$ | 5000 | $2{,}8\cdot10^5$ |
| 6 | $950e^{j51°}$ | $1256e^{j30°}$ | 1000 | $3\cdot10^5$ |
| 7 | $1040e^{j37°}$ | $410e^{j25°}$ | 800 | $3\cdot10^5$ |
| 8 | $1235e^{j41°}$ | $620e^{j21°}$ | 5000 | $2{,}6\cdot10^5$ |
| 9 | $835e^{j65°}$ | $1040e^{j32°}$ | 1500 | $3\cdot10^5$ |
| 10 | $429e^{j67°}$ | $638e^{j45°}$ | 1000 | $2{,}5\cdot10^5$ |
| 11 | $842e^{j75°}$ | $361e^{j51°}$ | 2000 | $3\cdot10^5$ |
| 12 | $1050e^{j78°}$ | $538e^{j64°}$ | 1400 | $2{,}6\cdot10^5$ |
| 13 | $386e^{j42°}$ | $484e^{j31°}$ | 5000 | $3\cdot10^5$ |
| 14 | $1340e^{j68°}$ | $425e^{j26°}$ | 1000 | $2{,}5\cdot10^5$ |
| 15 | $384e^{j76°}$ | $964e^{j53°}$ | 2000 | $3\cdot10^5$ |

Значения данных величин взять из таблицы согласно заданию преподавателя.

| $\underline{Z}_{10}$ | $\underline{Z}_{1k}$ | $f$ | $V_ф$ |
|---|---|---|---|
| Ом | Ом | Гц | км/с |
| | | | |

**Пример выполнения индивидуального задания** № 13

**Исходные данные:**

| Вариант | $\underline{Z}_{10}$ | $\underline{Z}_{1k}$ | $f$ | $V_ф$ |
|---|---|---|---|---|
| № | Ом | Ом | Гц | км/с |
| 4 | $597e^{-j70°}$ | $836e^{j62°}$ | 1000 | $3\cdot10^5$ |

**Решение**

1. Определяем волновое сопротивление:

$$\underline{Z}_в = \sqrt{\underline{Z}_{10}\cdot\underline{Z}_{1k}} = \sqrt{597\cdot e^{-j70}\cdot 836e^{j67}} = 707e^{-j4^o}\ Ом.$$

2. Определяем $th\gamma l$:

$$th\gamma l = \frac{\underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_B} = \frac{836e^{j67^o}}{707e^{-j4^o}} = 1{,}18e^{j66^o}\ .$$

3. Определяем коэффициент распространения γ:

$$th\gamma l = \frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{e^{\gamma l} + e^{\lambda l}}\ .$$

Умножаем числитель и знаменатель на $e^{\gamma l}$:

$$th\gamma l = \frac{e^{2\gamma l} - 1}{e^{2\gamma l} + 1},\quad \text{преобразуем}\quad th\gamma l\cdot e^{2\gamma l} + th\gamma l = e^{2\gamma l} - 1,$$

перегруппируем $e^{2\gamma l} - th\gamma l\cdot e^{2\gamma l} = 1 + th\gamma l$

и определим

$$e^{2\gamma l} = \frac{1+th\gamma l}{1-th\gamma l} = \frac{1+1{,}18e^{j66^o}}{1-1{,}18e^{j66^o}} = \frac{1+0{,}48+j1{,}08}{1-0{,}48-j1{,}08} =$$

$$= \frac{1{,}48+j1{,}08}{0{,}52-j1{,}08} = \frac{1{,}83e^{j36^o}}{1{,}29e^{-j66^o}} = 1{,}42e^{j102^o} = Ae^{jv};$$

$$e^{2\gamma l} = e^{2\alpha l}\cdot e^{j2\beta l} = 1{,}42e^{j102^o};$$

$$e^{2\alpha l} = 1{,}42\ ,\ \text{а}\quad 2\beta l = 102^o\ .$$

Поскольку размерность β рад/км, выразим ν в радианах:

$$v = \frac{102^o}{57,3} = 1,78 \text{ рад.} \quad \beta = \frac{\omega}{v_\phi} = \frac{2\pi\pi}{v_\phi} = \frac{6,28 \cdot 10^3}{3 \cdot 10^5} = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ рад/км.}$$

4. Определяем длину линии:

$$l = \frac{v}{2\beta} = \frac{1,78}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-2}} = 42,2 \text{ км.}$$

5. Определяем коэффициент затухания:

$$e^{2\alpha l} = A \quad \alpha = \frac{lnA}{2e} = \frac{ln1,42}{2 \cdot 42,2} = \frac{0,35}{2 \cdot 42,2} = 0,41 \cdot 10^{-2};$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = 0,41 \cdot 10^{-2} + j2,1 \cdot 10^{-2} = 2,15 \cdot 10^{-2} e^{j79^o};$$

$$\underline{Z}_B \cdot \underline{\gamma} = \underline{Z}_o = r_o + j\omega L_0 = 707e^{-4^o} \cdot 2,15 \cdot 10^{-2} e^{j79^o} =$$

$$= 15,2e^{j75^o} = 4 + j14,7 \text{ Ом;}$$

$$r_0 = 4 \text{ Ом/км;}$$

$$L_0 = \frac{14,7}{6,28 \cdot 10^3} = 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км;}$$

$$\frac{\gamma}{\underline{Z}_B} = \underline{Y}_0 = q_0 + j\omega C_0 = \frac{2,15 \cdot 10^{-2} \cdot e^{j79^o}}{707 \cdot e^{-j4^o}} = 3 \cdot 10^{-5} e^{j83^o} =$$

$$(0,36 + j2,98) \cdot 10^{-5} \text{ См;}$$

$$C_0 = \frac{2,98 \cdot 10^{-5}}{6,28 \cdot 10^3} = 4,7 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км;}$$

$$g_0 = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$