

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
**«Белорусский государственный аграрный технический университет»**

Кафедра электротехники

**Теоретические основы электротехники**

Методические рекомендации

по выполнению лабораторных работ для студентов заочной формы обучения (НИСПО)

по специальности 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства

(электроэнергетика)

**ЧАСТЬ 2**

Лабораторная работа №1. *Исследование трехфазной цепи при  
соединении приемника звездой*

Лабораторная работа №2. *Исследование переходных процессов в линейных  
электрических цепях*

Минск, 2016

УДК 621.3(07)

ББК 32.2я7

Т33

Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ для студентов заочной формы обучения (НИСПО) специальности 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика) по курсу «Теоретические основы электротехники», часть 2, рассмотрены на заседании кафедры электротехники агроэнергетического факультета.

Протокол № 1 от 31 августа 2016 года.

Составители: канд. тех. наук, доц. *А.В. Крутов*,  
канд. пед. наук, доц. *Г.М. Дворник*,  
ст. преподаватели *Т.Ф. Гузанова, И.И. Скочек*

## СОДЕРЖАНИЕ

Правила выполнения лабораторных работ	3
Правила безопасности при выполнении лабораторных работ	5
Лабораторная работа №1. Теоретические сведения	8
Отчет по лабораторной работе №1	13
Лабораторная работа №2. Теоретические сведения	19
Отчет по лабораторной работе №2	22

### ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные занятия преследуют цель более глубокого усвоения теоретических вопросов путем экспериментальной проверки основных положений курса. Кроме того, эти занятия способствуют выработке навыков проведения исследования и анализа электрических цепей и электромагнитного поля.

Перед выполнением лабораторных работ, в начале семестра каждый студент должен изучить правила безопасности, относящиеся к данной лаборатории.

К каждому очередному лабораторному занятию необходимо изучить описание лабораторной работы и соответствующий теоретический материал по конспекту лекций и учебным пособиям. Электрические схемы и таблицы для записи наблюдений должны быть подготовлены заранее.

Перед началом выполнения каждой работы проводится проверка готовности студентов к этой работе. В случае неподготовленности студент к работе не допускается.

Прежде чем собирать электрическую цепь, следует ознакомиться с находящимся на рабочем месте оборудованием, выяснить его назначение, параметры каждого элемента цепи, а для приборов — пределы измерений, род

тока и цену деления шкалы. При наличии на рабочем месте автотрансформаторов типа ЛАТР и реостатов следует установить в начальное положение их движки, чтобы после включения электрической цепи напряжение и ток в ней были минимальными. После этого необходимо собрать электрическую цепь.

Сборку сложной электрической цепи рекомендуется начинать с последовательно соединенных элементов и приборов, а затем подключать параллельные ветви как самой электрической цепи, так и приборов.

Каждая собранная электрическая цепь, а также произведенные в ней изменения должны быть проверены преподавателем или лаборантом и только с их разрешения цепь может быть включена под напряжение. Во время выполнения лабораторных работ студенты должны строго выполнять правила безопасности и соблюдать дисциплину. Лица, нарушающие правила безопасности, отстраняются от выполнения работы. К ним, по ходатайству кафедры могут применяться меры дисциплинарного воздействия.

Проводя те или иные испытания, необходимо стремиться получить достоверные результаты. Следует помнить, что небрежность в снятии показаний приборов и записях обычно приводит к ошибкам, неправильным выводам о свойствах испытуемой цепи. При наличии грубых ошибок в испытаниях опыт или вся лабораторная работа должны быть проведены повторно.

При выполнении работы бригадой студенты должны распределить обязанности и периодически ими меняться. При этом все должны активно вникать в смысл проводимых испытаний, уметь собирать электрические схемы, определять цену деления прибора.

После окончания каждого опыта необходимо ознакомить с результатами замеров преподавателя и только с его разрешения разбирать электрическую цепь.

По завершении лабораторных занятий необходимо оборудование и приборы аккуратно составить на рабочем месте, а провода, перемычки убрать со стола и

сложить в установленное преподавателем место. После этого студенты приступают к оформлению отчета.

Отчет по проведенной работе оформляется каждым студентом, должен содержать: название работы, ее цель; электрические схемы цепей, исследованных в данной работе; заполненные таблицы, графики или иные результаты всех опытов, проведенных в работе; расчетные формулы и результаты вычислений; анализ результатов и выводы.

Отчеты оформляются на специальных бланках или в обычной тетради аккуратно, с использованием чертежных принадлежностей и с соблюдением стандартных графических и буквенных обозначений для элементов электрических схем.

Все графики должны быть выполнены в соответствующем масштабе и с обозначением величин. На графиках обязательно должны быть нанесены точки, по которым строились кривые.

Отчет по проведенной работе должен быть защищен студентом в конце занятия или перед началом следующей работы. В противном случае студент, не отчитавшийся за две работы, не допускается к выполнению следующей. Пропущенные лабораторные занятия по уважительным или неуважительным причинам должны быть отработаны в период, согласованный с преподавателем, с разрешения деканата.

## **ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Исследование электрических цепей, установок и приборов неизбежно связано с применением небезопасных для здоровья и жизни напряжений. Поражение током может привести к тяжелым последствиям. Необходимо, чтобы

лица, работающие в этих опасных условиях, постоянно и точно выполняли соответствующие правила безопасности.

В лаборатории ТОЭ применяются номинальные фазные и линейные напряжения 127, 220 В. Опасными являются напряжения выше 36 В, а также ЭДС самоиндукции при размыкании цепей с индуктивностями, напряжение неразряженных конденсаторов. Кроме того, при неправильных действиях с электрическим оборудованием, неверно собранных электрических схемах возможны короткие замыкания и перегрузки в цепях, что приводит к выходу из строя приборов, элементов цепи, повреждению изоляции, расплавлению токопроводящих частей оборудования, его перегреву. Брызги расплавленного металла опасны ожогом открытых участков тела, а возникшая электрическая дуга поражает органы зрения.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности.

1. Не допускать загромождения рабочего места личными вещами. Не отвлекаться. Во время лабораторных занятий мобильные телефоны должны быть отключены.

2. Прежде чем собирать цепь, необходимо убедиться, что сетевой выключатель отключен и сигнальная лампа на стенде не горит.

3. При сборке электрической цепи соединения проводниками следует выполнять так, чтобы они не ложились на шкалы приборов, имели наименьшее число пересечений между собой и были надежно присоединены, обеспечивая хороший контакт. Все неиспользованные проводники должны быть сложены отдельно, убраны со стола.

4. Включение цепи под напряжение разрешается только после проверки правильности соединений преподавателем или лаборантом.

5. Во время работы нужно быть внимательным и осторожным, находиться на рабочем месте и не допускать к нему посторонних. Каждый включающий цепь под напряжение должен предупредить о своем действии остальных членов

бригады.

6. При обнаружении каких-либо неисправностей (повышенный шум, искрение, перегрев обмоток или проводов, отсутствие свечения сигнальной лампы) или при попадании кого-нибудь под напряжение нужно немедленно отключить выключатель и пригласить преподавателя.

7. Во время работы не касаться незащищенных частей электрических цепей, находящихся под напряжением.

8. Все изменения в цепи проводятся при отключенном выключателе. После этого цепь должен проверить преподаватель или лаборант. При выходе студентов на перерыв электрическая цепь должна быть отключена от источника питания.

9. После окончания работы необходимо показать преподавателю результаты замеров и только после этого разобрать цепь, привести в порядок рабочее место (сложить провода, составить приборы, стулья).

10. За порчу лабораторного оборудования, вызванную небрежным обращением с ним или невыполнением требований данного пособия, студенты несут моральную и дисциплинарную ответственность.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКА ЗВЕЗДОЙ

### 1. Цель работы

Экспериментальное исследование трехфазной цепи при соединении приемника звездой и выявление роли нейтрального провода.

### 2. Теоретические сведения

Соединение приемников электрической энергии звездой является распространенным видом соединения в трехфазных цепях.

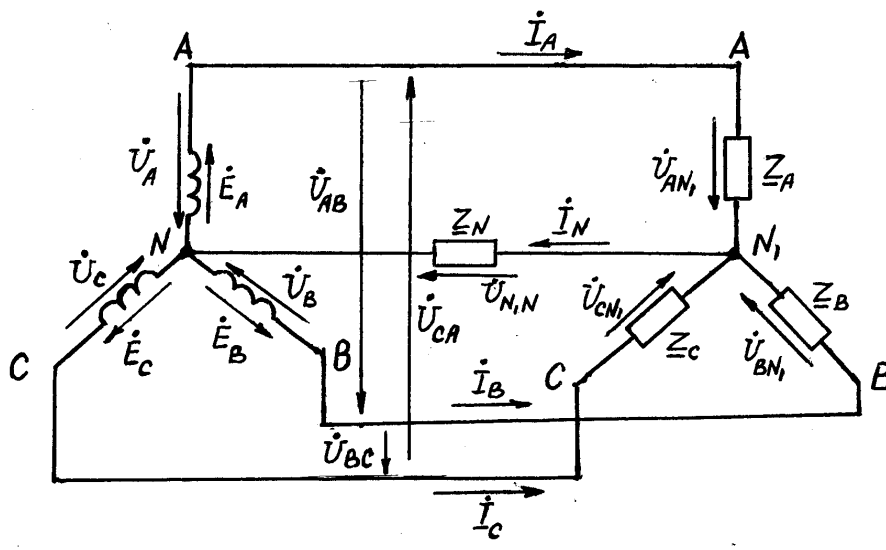


Рис. 1.1. Трехфазная электрическая цепь при соединении генератора и приемника звездой с нейтральным проводом

Различают соединение звездой с нейтральным проводом и без нейтрального провода.

Три провода, идущие от начала фаз генератора к приемнику, называются линейными проводами, а провод, соединяющий нейтральные точки генератора  $N$  и приемника  $N_1$ , называется нейтральным проводом (рис. 1.1).

Лучи звезды приемника называют фазами приемника.

Трехфазный приемник называют симметричным, если комплексные сопротивления всех фаз одинаковы, в противном случае приемник несимметричен.



При соединении звездой в линейном проводе и в одноименной фазе приемника протекает один и тот же ток, то есть линейный ток равен фазному :  $I_{л} = I_{\phi}$ .

Напряжения между линейными проводами  $\dot{U}_{AB}$ ,  $\dot{U}_{BC}$ ,  $\dot{U}_{CA}$  называются линейными напряжениями. Напряжения на фазах (обмотках) источника электрической энергии  $\dot{U}_{AN}$ ,  $\dot{U}_{BN}$ ,  $\dot{U}_{CN}$  называют фазными напряжениями генератора и их принято обозначать  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_C$ . Напряжения на фазах приемника электрической энергии  $\dot{U}_{AN_1}$ ,  $\dot{U}_{BN_1}$ ,  $\dot{U}_{CN_1}$  называют фазными напряжениями приемника.

Трехфазные электрические генераторы создают симметричную систему фазных напряжений, то есть они равны по величине и сдвинуты по фазе на  $120^\circ$  (рис. 1.2).

$$\dot{U}_A = U_A, \quad \dot{U}_B = \dot{U}_A e^{j120^\circ}, \quad \dot{U}_C = \dot{U}_A e^{j240^\circ}.$$

Линейные напряжения равны разности соответствующих фазных напряжений, например,  $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ . Линейное напряжение больше фазного напряжения генератора в  $\sqrt{3}$  раз:  $U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}$

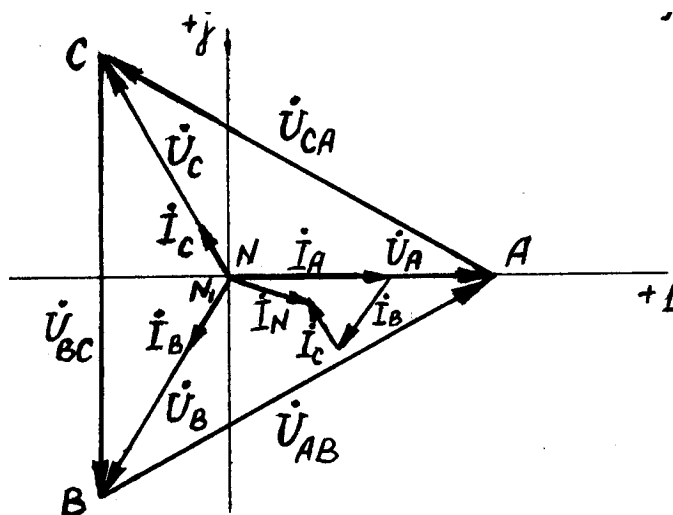


Рис. 1.2. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для схемы рис. 1.1 при несимметричном приемнике,

сопротивления фаз активные,  $Z_N = 0$ .

При наличии нейтрального провода, сопротивлением  $\underline{Z}_N$  которого можно пренебречь ( $\underline{Z}_N = 0$ ), каждая фаза приемника непосредственно соединена с соответствующей фазой генератора (рис. 1.1) и напряжения на фазах приемника будут такие же, как и на фазах генератора  $\dot{U}_{AN_1} = \dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_{BN_1} = \dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_{CN_1} = \dot{U}_C$ , то есть равны по величине и сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ . Поэтому соединение звездой с нейтральным проводом используют при несимметричном приемнике, например, для подключения бытовых потребителей (электролампы, однофазные электродвигатели и др.).

Токи в фазах приемника находят по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN_1}}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN_1}}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN_1}}{\underline{Z}_C}.$$

Ток в нейтральном проводе находят по первому закону Кирхгофа:

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

При отсутствии нейтрального провода ( $\underline{Z}_N = \infty$ ) и при несимметричном приемнике между нейтральными точками приемника и генератора появляется напряжение  $\dot{U}_{N_1N}$ . Это напряжение можно рассчитать по формуле

$$\dot{U}_{N_1N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

где  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$  – проводимости фаз приемника.

Напряжения на фазах приемника находят по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_{AN_1} = \dot{U}_A - \dot{U}_{N_1N}; \quad \dot{U}_{BN_1} = \dot{U}_B - \dot{U}_{N_1N}; \quad \dot{U}_{CN_1} = \dot{U}_C - \dot{U}_{N_1N}.$$

Топографическая диаграмма для одного из возможных случаев несимметрии приемника представлена на рис. 1.3.

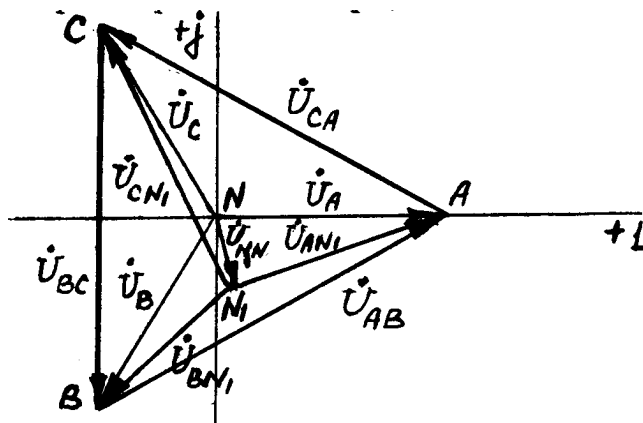


Рис. 1.3 Топографическая диаграмма напряжений для схемы рис .1.1 при несимметричном приемнике без нейтрального провода,  $\underline{Z}_N = \infty$ .

Из топографической диаграммы напряжений хорошо видно, что при отсутствии нейтрального провода в трехфазной цепи с несимметричным приемником напряжения на фазах приемника оказываются разными по величине. Поскольку все потребители рассчитаны на определенное напряжение, то как повышение напряжения, так и снижение напряжения, нарушают нормальную работу потребителя.

Основным назначением нейтрального провода с весьма малым сопротивлением  $\underline{Z}_N$  является сведение к нулю напряжения между нейтральными точками приемника и генератора :  $\dot{U}_{N_1N} = \dot{I}_N \underline{Z}_N = \dot{I}_N \cdot 0 = 0$ . В этом случае напряжения на фазах приемника будут равны напряжениям на фазах генератора. Между фазными и линейными напряжениями приемника сохраняется равенство  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$ .

Очевидно, что при симметричном приемнике, то есть при одинаковых сопротивлениях в фазах приемника, токи фаз будут равны по величине и сдвинуты по фазе на угол  $120^\circ$  и, следовательно, их сумма будет равна 0. Поэтому при симметричном приемнике (трехфазные электродвигатели, электропечи и др.) нет необходимости в нейтральном проводе. Напряжения на фазах симметричного приемника равны напряжениям на фазах генератора и при отсутствии нейтрального провода, так как  $\dot{U}_{N_1N} = 0$ .

Между фазными и линейными напряжениями симметричного приемника сохраняется равенство  $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$ .

Трехфазный приемник соединяют звездой в том случае, когда его фазы рассчитаны на напряжение в  $\sqrt{3}$  раз меньшее линейного напряжения линии электропередачи. При этом несимметричный приемник подключают к четырехпроводной линии электропередачи (с нейтральным проводом). Для симметричного трехфазного приемника нейтральный провод не требуется.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
**«Белорусский государственный аграрный технический  
университет»**

Кафедра электротехники

**Отчёт по лабораторной работе №1**  
*Исследование трехфазной цепи при соединении  
приемника звездой*

**Выполнил:** студент \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

\_\_\_\_\_  
(№ группы, курс)

**Принял:** \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

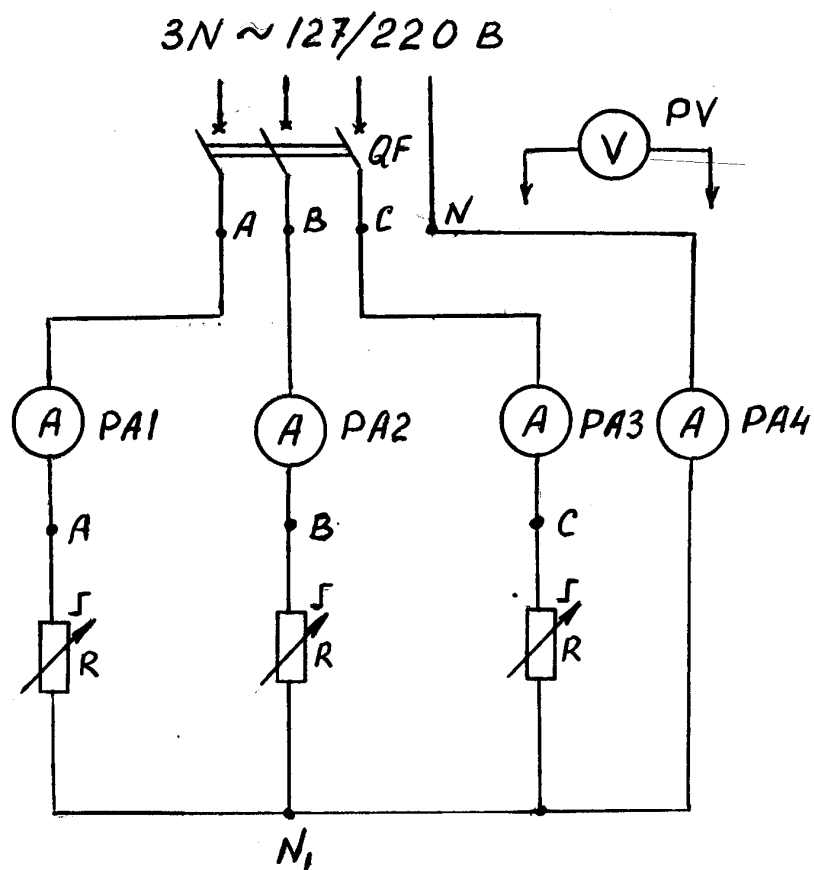
Минск, 201\_\_

## 1. Цель работы

Цель работы - экспериментальное исследование трехфазной цепи при соединении приемника звездой и выявление роли нейтрального провода.

## 2. Описание лабораторной установки

Исследуемая трехфазная цепь (рис. 1.1) содержит приемник, каждая фаза которого представляет собой набор резисторов.



PA1, PA2, PA3 – амперметры, 1 А,

PA4 – амперметр 1 А, с зеркальной шкалой,

PV – вольтметр 150-300 В.

Рисунок 1.1 – Электрическая схема для исследования трехфазной цепи при соединении приемника звездой

### 3. Программа и методика выполнения работы

3.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 1.1. Измерить и записать в табл. 1.1. линейные и фазные напряжения на входе цепи (на генераторе).

Таблица 1.1. Линейные и фазные напряжения на входе цепи

Измерено						Вычислено		
$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$\frac{U_{AB}}{U_A}$	$\frac{U_{BC}}{U_B}$	$\frac{U_{CA}}{U_C}$
В	В	В	В	В	В			

3.2. Измерить токи и напряжения на приемнике, изменяя сопротивления фаз приемника в соответствии с табл. 1.2.

Таблица 1.2. Напряжения и токи приемника, соединенного звездой с нейтральным проводом

Приемник	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{AN_1}$	$U_{BN_1}$	$U_{CN_1}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$
	В	В	В	В	В	В	А	А	А	А
Симметричный. Включить вес резисторы в фазах										
Обрыв фазы приемника. В одной фазе по указанию преподавателя отключить все резисторы										
Несимметричный. Включить разное число резисторов в фазах										

3.3. Отключить нейтральный провод. Измерить токи и напряжения на приемнике, изменяя сопротивления фаз приемника в соответствии с табл. 1.3.

Таблица 1.3. Напряжения и токи приемника, соединенного звездой без нейтрального провода

Приемник	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{AN_1}$	$U_{BN_1}$	$U_{CN_1}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U_{N_1N}$
	В	В	В	В	В	В	А	А	А	В
Симметричный										
Обрыв фазы приемника										
Несимметричный										
Короткое замыкание фазы приемника (см. примечание)										

*Примечание:* при включении цепи с коротким замыканием пригласить преподавателя. Для короткого замыкания фазы приемника необходимо проводом соединить начало и конец фазы приемника, например, зажимы  $A$  и  $N_1$ , при этом сопротивление фазы становится равным нулю. В закороченную фазу включить амперметр на 2 А, вместо одноамперного. В фазах включить все резисторы.

3.4. По опытным данным табл. 1.1. найти отношения линейного и фазного напряжений на входе цепи. Построить топографическую диаграмму напряжений на входе цепи.

3.5. По опытным данным табл. 1.2 и 1.3 для всех пунктов построить в масштабе топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов.



#### 4. Методические указания к обработке результатов эксперимента

Топографическая диаграмма представляет собой диаграмму комплексных потенциалов точек схемы, причем каждой точке схемы соответствует определенная точка на топографической диаграмме. Напряжение между двумя любыми точками электрической схемы изображается вектором, соединяющим соответствующие точки диаграммы.

Точку схемы, потенциал которой принят равным нулю, на топографической диаграмме помещают в начало координат. Для трехфазной электрической цепи это нейтральная точка генератора  $N$ .

Построение топографических диаграмм напряжений для всех пунктов таблиц 1.2, 1.2 и 1.3 следует начинать с симметричной системы фазных и линейных напряжений на входе цепи (табл. 1.1) так, как это показано на рис. 1.2.

Рекомендуемый масштаб  $m_u = 50 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ . Концы векторов напряжений  $\dot{U}_A$ ,  $\dot{U}_B$ ,  $\dot{U}_C$  соответствуют потенциалам точек  $A$ ,  $B$ ,  $C$  схемы 1.4.

При наличии нейтрального провода точка  $N_1$  (на диаграмме будет совпадать с точкой  $N$  так как потенциалы этих точек одинаковы).

При отсутствии нейтрального провода положение точка  $N_1$  на топографической диаграмме в общем случае нужно искать методом засечек. Из вершины  $A$  проводится окружность радиусом  $U_{AN_1}$ , а из вершины  $B$  – радиусом  $U_{BN_1}$ , и из вершины  $C$  – радиусом  $U_{CN_1}$ . Точка пересечения окружностей есть точка  $N_1$ . Её соединяют с точками  $A$ ,  $B$ ,  $C$  диаграммы так, как показано на рис. 1.3, и получают векторы фазных напряжений приемника  $\dot{U}_{AN_1}$ ,  $\dot{U}_{BN_1}$ ,  $\dot{U}_{CN_1}$ .

В случае обрыва или короткого замыкания фазы приемника в цепи без нейтрального провода положение точки  $N_1$ , на диаграмме можно найти более простыми способами.

При обрыве фазы две другие фазы оказываются соединены последовательно и подключены к линейному напряжению. Если сопротивления фаз одинаковы, то напряжения на них будут равны половине линейного, а точка  $N_1$  на диаграмме будет находиться на середине вектора соответствующего линейного напряжения. Например, при обрыве фазы  $A$  точка  $N_1$  будет находиться на середине вектора  $\dot{U}_{BC}$ .

При отсутствии нейтрального провода и коротким замыкании, например фазы  $A$  приемника, потенциал нейтральной точки  $N_1$ , становится равным потенциалу точки  $A$ . На диаграмме точка  $N_1$ , совпадает с точкой  $A$ . Аналогичное явление произойдет при коротком замыкании фаз  $B$  или  $C$ . При этом на закороченной фазе напряжение равно 0 а на двух других фазах приемника напряжения равны линейным.

Векторы токов в фазах  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  рисуются на всех диаграммах из точки  $N_1$ , совпадающими по фазе с соответствующими фазными напряжениями приемника, так как сопротивления всех фаз чисто активные. Рекомендуемый масштаб для тока  $m_i = 50 \frac{\text{В}}{\text{см}}$ .

Вектор тока  $N_1$  находится из соотношения  $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ .

В режиме короткого замыкания фазы  $A$  вектор тока  $\dot{I}_A$  находится из условия  $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ , откуда  $\dot{I}_A = -(\dot{I}_B + \dot{I}_C)$ . Аналогично можно найти положение векторов тока  $\dot{I}_B$  или  $\dot{I}_C$  при коротком замыкании фаз  $B$  или  $C$ .

## 5. Контрольные вопросы

1. Когда трехфазный приемник соединяют звездой и как это соединение выполняется ?
2. Что называется фазой приемника ?
3. Какие напряжения называют линейными и какие фазными? Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями генератора, если его обмотки соединены звездой ?
4. Какие токи называют линейными и какие фазными ? Каково соотношение между линейным и фазным током при соединении звездой ?
5. Что значит симметричный и что значит несимметричный трехфазный приемник ?
6. В каких случаях используются соединение приемника звездой без нейтрального провода и в каких случаях с нейтральным проводом ?
7. В чем состоит назначение нейтрального провода ?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

### 1. Цель работы

Исследование переходных процессов в цепях, содержащих резистор и катушку индуктивности, резистор и электрический конденсатор при включении их на постоянное напряжение и при коротком замыкании. Ознакомление с осциллограммами переходных процессов.

### 2. Теоретические сведения

Переходным называется процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому.

Переходной процесс вызывается коммутацией, то есть включением или отключением приемников или источников электрической энергии, коротким замыканием отдельных участков цепи, переключениями.

Переходной процесс заканчивается спустя некоторое (теоретически бесконечно большое) время после коммутации.

Согласно первому закону коммутации ток в индуктивной катушке в момент коммутации имеет такое значение, которое он имел непосредственно перед коммутацией, затем он будет изменяться, начиная именно с этого значения.

$$i_L(0_+) = i_L(0_-).$$

Поскольку перед включением цепи  $R, L$  ток отсутствовал, то при включении цепи  $R, L$  ток начнет изменяться с нуля и затем будет возрастать. При коротком замыкании цепи  $R, L$  ток начнет свое изменение с того значения, которое он имел перед коротким замыканием.

Согласно второму закону коммутации напряжение на конденсаторе в момент коммутации имеет такое значение, которое оно имело непосредственно перед коммутацией, затем оно будет изменяться, начиная с этого значения.

$$u_C(0_+) = u_C(0_-).$$

Поскольку перед включением цепи  $R, C$  напряжение на конденсаторе отсутствовало, то при включении цепи  $R, C$  напряжение на конденсаторе  $u_C$  начнет свое изменение с нуля и затем будет возрастать. При коротком замыкании цепи  $R, C$  напряжение на конденсаторе  $u_C$  начнет свое изменение с того значения, которое оно имело перед коротким замыканием.

Полный характер изменения переходных токов и напряжений в цепях  $R, L$  и  $R, C$  определяется решением дифференциальных уравнений этих цепей.

При включении цепи  $R, L$  на постоянное напряжение переходный процесс описывается уравнением:

$$Ri + L \frac{di}{dt} = U.$$

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

$$U_L = L \frac{di}{dt} = U e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

где  $\tau = \frac{L}{R}$  – постоянная времени, определяющая скорость протекания переходного процесса в цепи  $R, L$ .

Из уравнений видно, что при включении цепи  $R, L$  ток постепенно возрастает от нуля до установившегося значения, равного  $\frac{U}{R}$ , а напряжение на индуктивном элементе постепенно убывает от своего начального значения  $U$  до нуля.

При коротком замыкании цепи  $R, L$  ток определяется из уравнения

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0.$$

Если до коммутации в цепи протекал ток, равный  $\frac{U}{R}$ , то в переходном режиме

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau = \frac{L}{R}.$$

Напряжение на индуктивном элементе:

$$U_L = L \frac{di}{dt} = U e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Из последних выражений следует, что при коротком замыкании цепи  $R, L$  ток и напряжение по абсолютному значению убывают от своих начальных значений до нуля.

При включении цепи  $R, C$  на постоянное напряжение возникает переходной процесс, описываемый уравнением:

$$Ri + u_C = U.$$

$$i = c \frac{du_C}{dt}, \quad \text{поэтому} \quad Rc \frac{du_C}{dt} + u_C = U.$$

Решив уравнение, получим:  $u_C = U (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ ,  $i = c \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$ .

где  $\tau = RC$  – постоянная времени, определяющая скорость протекания переходного процесса в цепи  $R, C$ .

Из выражений следует, что на конденсаторе постепенно возрастает от нуля до  $U$ , а ток постепенно убывает от  $U/R$  до нуля.

При коротком замыкании цепи  $R, C$  происходит разряд конденсатора на сопротивление  $R$ . Напряжение на конденсаторе определяется в этом случае уравнением:

$$Ri + u_C = 0.$$

Если до коммутации напряжение на конденсаторе равнялось  $U$ , то в переходном режиме:

$$u_C = U e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad i = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad \tau = RC.$$

Из последних выражений следует, что при коротком замыкании цепи  $R, C$  ток и напряжение на конденсаторе по абсолютному значению постепенно убывают от своих начальных значениях до нуля.

Анализ выражений тока и напряжения как цепи  $R, L$  так и для цепи  $R, C$ , показывает, что переходный процесс практически заканчивается через  $4...5 \tau$ , поэтому на постоянной времени  $\tau$  можно судить о длительности переходного процесса.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования

**«Белорусский государственный аграрный технический  
университет»**

Кафедра электротехники

**Отчёт по лабораторной работе №2**

**Исследование переходных процессов в линейных  
электрических цепях**

**Выполнил:** студент \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

\_\_\_\_\_  
(№ группы, курс)

**Принял:** \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

Минск, 201\_\_

## 2. Цель работы

Исследование переходных процессов в цепях, содержащих  $R$ ,  $L$  и  $R, C$ , при включении их на постоянное напряжение и при коротком замыкании.

## 3. Описание лабораторной установки

Схема электрической цепи для исследования переходных процессов представлена на рисунке 1.1. Переходный процесс практически продолжается сотые доли секунды.

Чтобы наблюдать переходный процесс, необходимо его повторять. Для этой цели используется поляризованное реле  $K$ , которое контактом  $K1$  периодически, 50 раз в секунду, включает и отключает цепь от источника ЭДС.

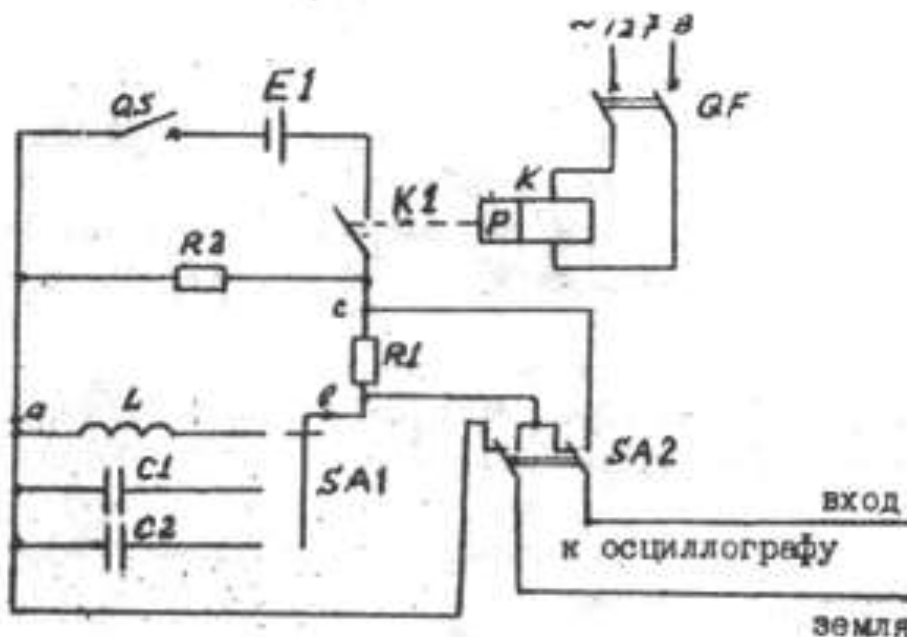


Рисунок 1.1 – Схема электрической цепи для исследования переходных процессов

Цепь имеет две параллельные ветви: ветвь с сопротивлением  $R_2$  и ветвь с последовательным соединением сопротивления  $R_1$  и одного из элементов, подключенного к зажимам «а» и «в». При включении цепи процессы в каждой ветви не влияют друг на друга, и на осциллографе демонстрируются кривые переходного процесса во второй ветви (включение цепи  $R_1, L$  или цепи  $R_1, C$  на постоянное напряжение). При отключении цепи контактом  $K1$  первая ветвь образует со второй ветвью замкнутую цепь с последовательным соединением сопротивления  $R_{12} = R_1 + R_2$  и одного из элементов подключаемого к зажимам «а» и «в». В данной цепи будут протекать переходные процессы, соответствующие режиму короткого замыкания цепи  $R_{12}, L$  или  $R_{12}, C$ . Этот переходный процесс будет демонстрироваться на осциллографе вслед за предыдущим. Например, для случая, когда к зажимам «а» и «в» подключен элемент  $L$  кривые тока и напряжения двух процессов на экране осциллографа имеют вид рисунок 1.2.

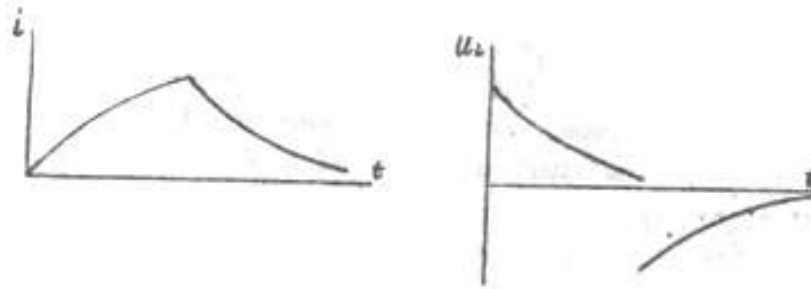


Рисунок 1.2 – Осциллограммы тока и напряжения при переходных процессах в цепи  $R, L$

Эти кривые должны рисоваться отдельно, поскольку они соответствуют различным режимам различных цепей (рисунок 1.3 , 1.4).

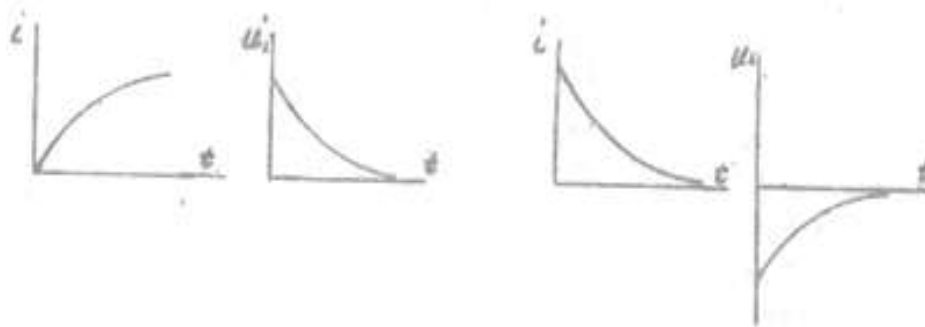


Рисунок 1.3 – Включение цепи  $R, L$  Рисунок 1.4 – Короткое замыкание цепи  $R, L$

Принадлежность кривой к виду переходного процесса (включение или короткое замыкание цепи) определяется на основании законов коммутации  $i_L(0_+) = i_L(0_-)$ ;  $u_C(0_+) = u_C(0_-)$ . При расстановке осей координат для каждой кривой необходимо руководствоваться следующим. При включении цепи  $R, L$  ток  $i$  начинает изменяться с нуля и затем возрастает. Поэтому начало кривой  $i(t)$  определяет начало осей координат (рисунок 1.3).

При коротком замыкании цепей  $R, L$  и  $R, C$  как токи, так и напряжения по абсолютной величине уменьшаются до значений близких к нулю и кривые  $i(t)$  и  $u(t)$  в конце приближаются к оси времени  $t$  (оси абсцисс) (рисунок 1.4).

В любом случае, как при включении цепей  $R, L$  и  $R, C$ , так и при коротком замыкании ось тока и ось напряжения (оси ординат) проходят через начала кривых  $i(t)$  и  $u(t)$  (рисунок 1.3 и 1.4).

Поскольку напряжение на сопротивлении  $R1$  пропорционально току, то при подключении переключателем  $SA2$  осциллографа к зажимам «в» и «с» на экране будет кривая тока  $i(t)$ , а при подключении к зажимам «а» и «в» – кривая напряжения  $u_L(t)$  или  $u_C(t)$ .

#### 4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Подключить к лабораторной установке ЭДС  $E1$  и напряжение  $U=127В$ , а также осциллограф (клеммы «земля» и «вход»).



4.2. Включить осциллограф к источнику переменного напряжения 220 В. Установить ось времени на середину экрана, для чего отключить провод от клеммы «Вход» осциллографа и ручкой «Ось Y» совместить линию, подчеркиваемую лучом (ось времени), с серединой экрана. После этого вновь подключить провод к клемме «вход»

4.3. Для получения четкого, неподвижного изображения кривой тока или напряжения на экране осциллографа необходимо регулировать частоту развертки и амплитуду синхронизации осциллографа. Для получения кривых в достаточно крупном масштабе необходимо использовать регуляторы «Усиление по вертикали» и «Усиление по горизонтали» осциллографа. В случае необходимости регулятор «Ослабление» осциллографа при наблюдении кривых напряжения можно ставить в положение 1:100, при наблюдении тока 1:10.

4.4. Поочередно подключая к зажимам «а» и «в» элементы  $L, C1, C2$  зарисовать в достаточно крупном масштабе кривые изменения напряжения и тока при включении цепи и при коротком замыкании цепи (всего 12 кривых).

## 5. Обработка экспериментальных данных

5.1. По каждой кривой записать её математическое выражение.

5.2. Сформулировать выводы по лабораторной работе.

В отчете для выполнения пунктов 4.1, 4.2 предусмотреть дополнительную страницу.

## 5. Контрольные вопросы

1. Что называется переходным процессом?
2. Какие элементы электрических цепей обуславливают наличие переходных процессов?
3. Что понимают под коммутацией?
4. Как формулируется первый и второй закон коммутации?

