

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к лабораторным работам
по теории электрических цепей**

для студентов технических специальностей

Брест 2018

Лабораторные работы выполняются с использованием стендов НТС-01/08 со сменными платами для исследования различных вариантов электрических цепей при изучении курса ТЭЦ. В комплекте оборудования имеется шесть сменных плат, что позволяет охватить все разделы курса. Указания по использованию плат находятся в описании конкретных лабораторных работ. При выполнении ряда работ предусмотрено использование мультиметра и осциллографа.

Проведение лабораторных работ по курсу «Теория электрических цепей» при исследовании процессов на физическом оборудовании с проверкой результатов измерений теоретическим расчётом имеет важное методическое значение, как для усвоения положений теории, так и для приобретения навыков практической работы в электрических установках.

В лабораторных работах нашли отражение следующие основные разделы курса:

- техника безопасности при работе с электрическими цепями и установками;
- основы электрических измерений;
- основные понятия для цепей постоянного тока;
- анализ цепей постоянного тока;
- основные понятия цепей синусоидального тока;
- анализ цепей синусоидального тока;
- резонанс напряжений;
- трёхфазные цепи;
- переходные процессы.

Составители: Прокопеня О.Н., к.т.н., доцент;
Ярошевич А.В., к.т.н., доцент

Рецензент: главный инженер ОАО «Автометрия» Шацкий А.В.

Оглавление

1. Общие методические указания.....	4
2. Литература.....	4
3. Методические указания к лабораторным работам.....	5
3.1 Лабораторная работа №1. Основы безопасности и измерений в электрических цепях.....	5
3.2 Лабораторная работа №2. Вольт–амперные характеристики элементов цепей постоянного тока.....	19
3.3 Лабораторная работа №3. Анализ разветвлённых цепей постоянного тока.....	26
3.4 Лабораторная работа №4. Методы наложения и эквивалентного генератора для линейных цепей.....	31
3.5 Лабораторная работа №5. Амплитуды и фазы сигналов для элементов цепей синусоидального тока.....	35
3.6 Лабораторная работа №6. Исследование резонанса напряжений в неразветвленной RLC цепи.....	45
3.7 Лабораторная работа №7. Исследование трёхфазной цепи «звезда – звезда».....	49
3.8 Лабораторная работа №8. Исследование переходных процессов в цепях первого порядка.....	57
3.9 Лабораторная работа №9. Исследование переходных процессов в цепях второго порядка.....	65

1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Курс лабораторных работ продолжительностью 36 часов предназначен для изучения понятий и методов теории электрических цепей. Каждая работа рассчитана на 4 часа. Работа выполняется бригадами по 3 человека.

Каждая работа содержит четыре части:

- изучение теории, сопутствующей исследованиям по теме лабораторной работы, подготовка исходных параметров элементов цепей по заданному варианту и при необходимости подготовка таблиц для записи результатов. После подготовки преподаватель может проводить собеседование и принимать решение о допуске студента к выполнению работы;

- построение цепей на платах, проведение исследований и сохранение результатов;
- выполнение расчёта характеристик исследуемых цепей теоретическими методами и сравнение с результатами моделирования;

- анализ результатов и оформление отчёта.

Третий и четвёртый этапы выполняются в рамках самостоятельной работы, предусмотренной программой курса.

Отчёт о выполнении работы предъявляется каждым студентом преподавателю на последующем занятии. При отсутствии отчёта без уважительных причин студент не допускается к выполнению следующей работы. Отчёт выполняется на двойных листах из тетради в клетку или листах формата А4, скреплённых степлером. Первый лист является титульным и должен содержать:

- наименование университета;

- наименование кафедры;

- тему лабораторной работы;

- номер работы в тексте: «Отчёт о выполнении лабораторной работы №...по курсу ТЭЦ»;

- фамилию и группу студента;

- фамилию преподавателя;

- дату выполнения работы.

Отчёт о работе включает следующие разделы:

- тема работы;

- цель;

- исходные данные;

- результаты измерений;

- теоретические расчёты и построения;

- выводы по цели исследования.

2. ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке [и др.]. – 5-е изд. М.: Энергия, 1989.

2. Матханов, П. Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи / П. Н Матханов. – М.: Высшая школа, 1981.

3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов [и др.]. – М.: Высшая школа, 1984. – т.1.

4. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов [и др.]. – М.: Высшая школа, 1986. – т.2.

Компьютерные программы.

1. Mathcad 5.0, MathSoft Inc., 1994.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Лабораторная работа № 1

Основы безопасности и измерений в электрических цепях

Цель работы: изучить основные положения безопасности работ с электрическими цепями и освоить методы измерений электрических величин.

Задание на выполнение работы:

1. Изучить основные положения по безопасности работ с электрическими цепями.

Действие электрического тока на организм человека

Электротравмы составляют около 1% от общего числа травм на производстве и 20...30% от числа смертельных несчастных случаев. При этом большинство (до 80%) смертельных несчастных случаев приходится на электроустановки напряжением до 1000 В.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- при прикосновении к токоведущим частям электроустановки;
- при приближении на недопустимо близкое расстояние к незаизолированным токоведущим частям;
- при возникновении в электроустановках аварийного режима;
- при несоответствии параметров электроустановки требованиям нормативных документов;
- при наличии шагового напряжения.

Опасность воздействия электрического тока на человека велика потому, что он незаметен для глаза, не слышим, не чувствуется на расстоянии, не имеет запаха, а воспринимается лишь в момент воздействия на человека.

Действие электрического тока на человека носит многообразный характер. Проходя через организм человека, электрический ток вызывает термическое, электрическое, электролитическое, биологическое и механическое действие.

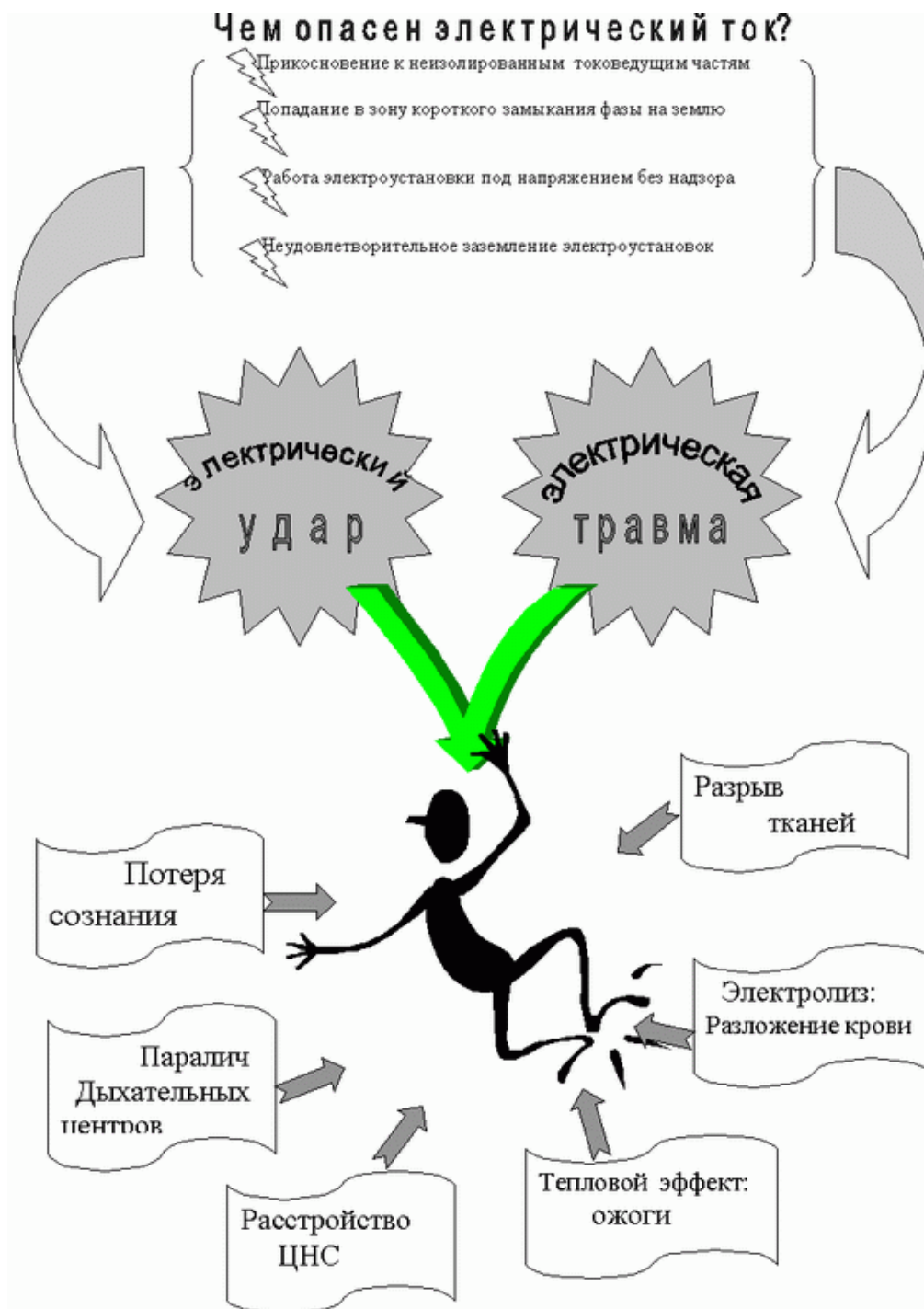
Термическое действие тока проявляется в ожогах отдельных участков тела, нагреве кровеносных сосудов, нервов, мышц сердца, мозга и других органов.

Электролитическое действие тока проявляется в разложении крови и других органических жидкостей организма и вызывает значительные нарушения их физико-химического состава.

Биологическое действие тока проявляется как раздражение и возбуждение живых тканей организма, что сопровождается непроизвольными судорожными сокращениями мышц, в том числе легких и сердца. В результате могут возникнуть различные нарушения и даже полное прекращение деятельности органов кровообращения и дыхания.

Механическое действие тока приводит к разрыву тканей.

Это многообразие действий электрического тока может привести к двум видам поражения: электрическим травмам и электрическим ударам.



Электрические травмы представляют собой четко выраженные местные повреждения тканей организма, вызванные воздействием электрического тока или электрической дуги. В большинстве случаев электротравмы излечиваются, но иногда, при тяжелых ожогах, травмы могут привести к гибели человека.

Различают следующие электрические травмы: электрические ожоги, электрические знаки, металлизация кожи, электроофтальмия и механические повреждения.

Электрический ожог – самая распространенная электротравма. Ожоги бывают двух видов: токовый (контактный) и дуговой.

Токовый ожог обусловлен прохождением тока через тело человека в результате контакта с токоведущей частью и является следствием преобразования электрической энергии в тепловую.

Различают четыре степени ожогов:

I – покраснение кожи;

II – образование пузырей;

III – омертвление всей толщи кожи;

IV – обугливание тканей.

Тяжесть поражения организма обуславливается не степенью ожога, а площадью обожженной поверхности тела.

Токовые ожоги возникают при напряжении не выше 1 ... 2 кВ и являются в большинстве случаев ожогами I и II степени; иногда бывают и тяжелые ожоги.

Дуговой ожог. При более высоких напряжениях между токоведущей частью и телом человека образуется электрическая дуга (температура дуги выше 3500 °С и у нее весьма большая энергия), которая и причиняет дуговой ожог. Дуговые ожоги, как правило, тяжелые III и IV степени.

Электрические знаки (метки тока) возникают при хорошем контакте с токоведущими частями. Они представляют собой припухлость с затвердевшей в виде мозоли кожей серого или желтовато-белого цвета круглой или овальной формы. Края электрического знака резко очерчены белой или серой каймой.

Металлизация кожи – проникновение под поверхность кожи частиц металла вследствие разбрызгивания и испарения его под действием тока, например при горении дуги.

Электроофтальмия – воспаление наружных оболочек глаз – роговицы и конъюнктивы (слизистой оболочки покрывающей глазное яблоко), возникающее в результате воздействия мощного потока ультрафиолетовых лучей, которые энергично поглощаются клетками организма и вызывают в них химические изменения.

Механические повреждения – являются следствием резких непроизвольных судорожных сокращений мышц под действием тока, проходящего через человека. В результате могут произойти разрывы сухожилий, кожи, кровеносных сосудов и нервной ткани; могут иметь место вывихи суставов и даже переломы костей.

Механические повреждения возникают при относительно длительном нахождении человека под напряжением и, как правило, являются серьезными травмами.

Под *электрическим ударом* следует понимать возбуждение живых тканей организма протекающим через него электрическим током, сопровождающееся непроизвольным су-

дорожным сокращением мышц. Степень отрицательного воздействия на организм этих явлений может быть различной. В худшем случае электрический удар приводит к нарушению и даже полному прекращению деятельности жизненно важных органов – легких и сердца, т. е. к гибели организма. При этом внешних местных повреждений человек может и не иметь.

В зависимости от исхода поражения электрические удары можно условно разделить на следующие четыре степени:

I – судорожное сокращение мышц без потери сознания;

II – судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимся дыханием и работой сердца;

III – потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (либо того и другого вместе);

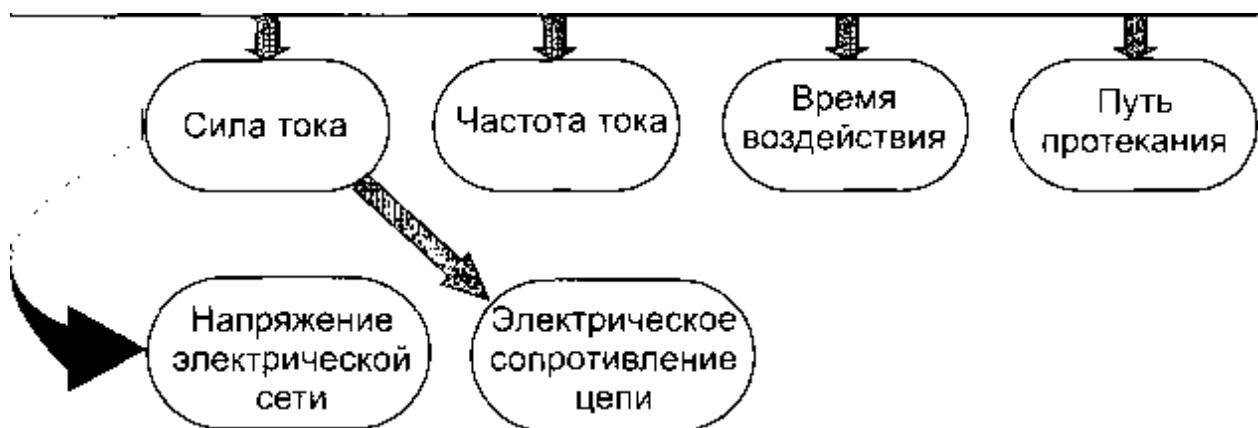
IV – клиническая смерть, т. е. отсутствие дыхания и кровообращения.

Причинами смерти в результате поражения электрическим током могут быть: прекращение работы сердца, прекращение дыхания и электрический шок.

Факторы, определяющие опасность поражения электрическим током

Характер и последствия воздействия на человека электрического тока зависят от следующих факторов:

- электрического сопротивления тела человека;
- величины напряжения и тока;
- продолжительности действия электрического тока;
- пути тока через тело человека;
- рода и частоты электрического тока;
- индивидуальных свойств человека;
- условий внешней среды.



Электрическое сопротивление тела человека. Сила тока I_h , проходящего через какой-либо участок тела человека, зависит от подведенного напряжения $U_{пр}$ (напряжения прикосновения) и электрического сопротивления Z_T , оказываемого току данным участком тела:

$$I_h = U_{пр} / Z_T \quad (1.1)$$

На участке между двумя электродами электрическое сопротивление тела человека в основном состоит из сопротивлений двух тонких наружных слоев кожи, касающихся электродов, и внутреннего сопротивления остальной части тела.

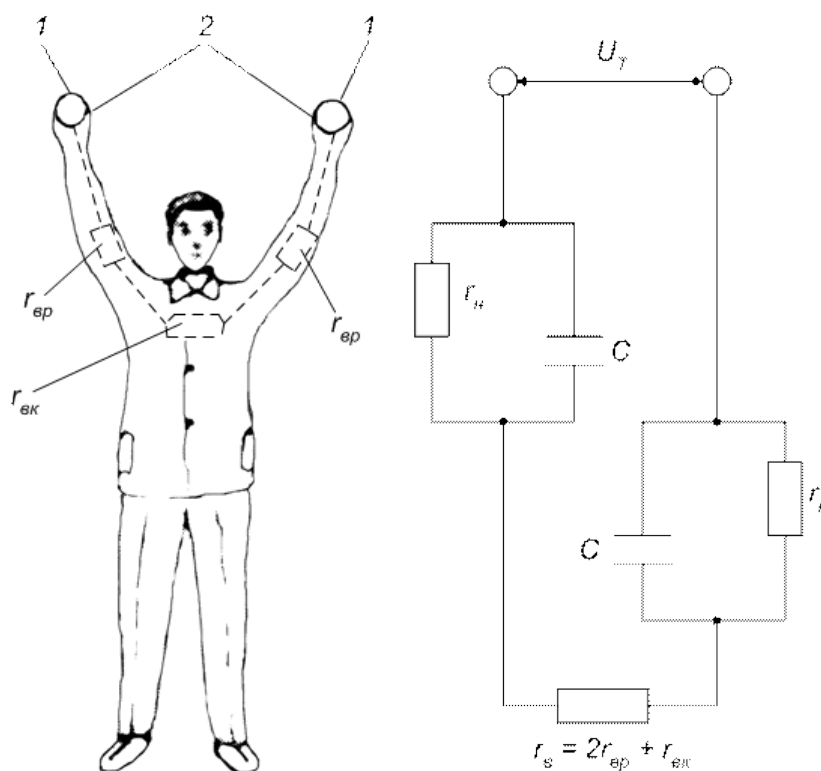
Плохо проводящий ток наружный слой кожи, прилегающий к электроду, и внутренняя ткань, находящиеся под этим слоем, как бы образуют обкладки конденсатора емкостью C . Из схемы замещения видно, что в наружном слое кожи ток протекает по двум параллельным путям; через активное наружное сопротивление R_n и емкость, электрическое сопротивление которой

$X_c = 1/\omega C$, где $\omega = 2\pi f$, – угловая частота, Гц; f – частота тока, Гц.

Тогда полное сопротивление наружного слоя кожи для переменного тока

$$Z_n = r_n \cdot X_c / \sqrt{r_n^2 + X_c^2} \quad (1.2)$$

Сопротивление r_n и емкость C зависят от площади электродов (площадь контакта). С ростом площади контакта r_n уменьшается, а емкость C увеличивается. опыты показали, что внутреннее сопротивление тела r_b можно рассматривать как чисто активное. Таким образом, для пути тока «рука – рука» общее электрическое сопротивление тела может быть представлено схемой замещения, представленной на рисунке 1.1.



1 – электрод; 2 – наружный слой кожи; $r_{вр}$, $r_{вк}$ – внутреннее сопротивление рук и корпуса

Рисунок 1.1 – Электрическая схема замещения сопротивления тела человека

В качестве расчетной величины при переменном токе промышленной частоты принимают активное сопротивление тела человека, равное 1000 Ом.

В действительных условиях сопротивление тела человека не является постоянной величиной. Оно зависит от ряда факторов, в том числе от состояния кожи, состояния окружающей среды, параметров электрической цепи и др.

Повреждение рогового слоя (порезы, царапины, ссадины и др.) снижает сопротивление тела до 500 ... 700 Ом, что увеличивает опасность поражения человека током.

Такое же влияние оказывает увлажнение кожи водой или потом. Таким образом, работа с электроустановками влажными руками или в условиях, вызывающих увлажнение кожи, а также при повышенной температуре, вызывающей усиленное потовыделение, усугубляет опасность поражения человека током.

Загрязнение кожи вредными веществами, хорошо проводящими электрический ток (пыль, окалина и т. п.), приводят к снижению ее сопротивления.

Величина напряжения и тока. Основным фактором, обуславливающим исход поражения электрическим током, является сила тока, проходящего через тело человека (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Характер воздействия тока

Ток, проходящий через тело человека, мА	Переменный (50 Гц) ток	Постоянный ток
0,5 ... 1,5	Начало ощущений: слабый зуд, пощипывание кожи	Не ощущается
2 ... 4	Ощущение распространяется на запястье; слегка сводит мышцы	Не ощущается
5 ... 7	Болевые ощущения усиливаются по всей кисти; судороги; слабые боли во всей руке до предплечья	Начало ощущений; слабый нагрев кожи под электродами
8 ... 10	Сильные боли и судороги во всей руке, включая предплечье. Руки трудно оторвать от электродов	Усиление ощущения
10 ... 15	Едва переносимы боли во всей руке. Руки невозможно оторвать от электродов	Значительный нагрев под электродами и в прилегающей области кожи
20 ... 25	Сильные боли. Руки парализуются мгновенно, оторвать их от электродов невозможно. Дыхание затруднено	Ощущение внутреннего нагрева, незначительное сокращение мышц рук
25 ... 50	Очень сильная боль в руках и в груди. Дыхание крайне затруднено. При длительном воздействии может наступить остановка дыхания или ослабление сердечной деятельности с потерей сознания	Сильный нагрев, боли и судороги в руках. При отрыве рук от электродов возникают сильные боли
50 ... 80	Дыхание парализуется через несколько секунд, нарушается работа сердца. При длительном воздействии может наступить фибрилляция сердца	Очень сильный поверхностный и внутренний нагрев. Сильные боли в руке и в области груди. Руки невозможно оторвать от электродов
80 ... 100	Фибрилляция сердца через 2...3 с.; еще через несколько секунд – остановка дыхания	То же действие, выраженное сильнее. При длительном действии – остановка дыхания
300	То же действие за меньшее время	Фибрилляция сердца через 2...3 с.; еще через несколько секунд – остановка дыхания

Напряжение, приложенное к телу человека, также влияет на исход поражения, но лишь постольку, поскольку оно определяет значение тока, проходящего через человека.

Таким образом, величина тока оказывает существенное влияние на степень поражения человека. При одинаковой длительности протекания тока через человека характер воздействия существенно изменяется от ощущения (0,6 ... 1,6 мА) до неотпускания (6 ... 24 мА) и фибрилляции сердца (более 50 мА).

Продолжительность действия электрического тока. Существенное влияние на исход поражения оказывает длительность прохождения тока через тело человека. Продолжительное действие тока приводит к тяжелым, а иногда смертельным поражениям.

При кратковременном воздействии (0,1 ... 0,5 с) ток порядка 100 мА не вызывает фибрилляции сердца. Если увеличить длительность воздействия до 1 с, то этот же ток может привести к смертельному исходу. С уменьшением длительности воздействия значения допустимых для человека токов существенно увеличиваются. Так, при изменении времени воздействия от 1 до 0,1 с допустимый ток возрастет, примерно в 16 раз.

Пути тока через тело человека. Путь тока в теле человека зависит от того, какими участками тела пострадавший прикасается к токоведущим частям, его влияние на исход поражения проявляется еще и потому, что сопротивление кожи на разных участках тела неодинаково.

Наиболее опасно прохождение тока через дыхательные мышцы и сердце.

Род и частота тока. Установлено, что переменный ток более опасен, чем постоянный.

Исследования показали, что самыми неблагоприятными для человека являются токи промышленной частоты (50 Гц). С уменьшением частоты (от 50 Гц до 0) значения неотпускающего тока возрастают и при частоте, равной нулю (постоянный ток – болевой эффект), они становятся больше примерно в 3 раза.

При увеличении частоты (более 50 Гц) значения неотпускающего тока возрастают. Дальнейшее же повышение частоты тока сопровождается снижением опасности поражения, которая полностью исчезает при частоте 45 ... 50 кГц. Но эти токи могут вызвать ожоги как при возникновении электрической дуги, так и при прохождении их непосредственно через тело человека. Снижение опасности поражения током с повышением частоты практически заметно при частоте 1000 ... 2000 Гц.

Индивидуальные свойства человека. Установлено, что физически здоровые и крепкие люди легче переносят электрические удары.

Повышенной восприимчивостью к электрическому току отличаются лица, страдающие болезнями кожи, сердечно-сосудистыми заболеваниями, органов внутренней секреции, легких, нервными болезнями и др.

Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок предусматривают отбор персонала для обслуживания действующих электроустановок по состоянию здоровья. С этой целью проводится медицинское освидетельствование лиц при поступлении на работу и периодически 1 раз в год в соответствии со списком болезней и расстройств, препятствующих допуску к обслуживанию действующих электроустановок.

Условия внешней среды. Влажность и температура воздуха, наличие заземленных металлических конструкций и полов, токопроводящей пыли оказывают дополнительное влияние на условия электробезопасности.

В зависимости от наличия перечисленных условий, повышающих опасность воздействия тока на человека, все помещения по опасности поражения людей электрическим током подразделяются на следующие классы: без повышенной опасности, с повышенной опасностью, особо опасные.

Помещения без повышенной опасности характеризуются отсутствием условий, создающих повышенную или особую опасность.

Помещения с повышенной опасностью характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность:

- сырости (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%) или токопроводящей пыли;
- токопроводящих полов (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и др.);
- высокой температуры (выше +35⁰С);
- возможности одновременного прикосновения человека к имеющим соединения с землей металлоконструкциям зданий, технологическим аппаратам, механизмам и т. п., с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования – с другой.

Особо опасные помещения характеризуются наличием одного из следующих условий, создающих особую опасность:

- особой сырости (относительная влажность воздуха близка к 100%: потолок, стены, пол и предметы в помещении покрыты влагой);
- химически активной или органической среды (разрушающей изоляцию и токоведущие части электрооборудования);
- одновременно двух или более условий повышенной опасности.

Освобождение человека от действия электрического тока

При поражении человека электрическим током необходимо быстро и осторожно, так чтобы самому не попасть под напряжение, освободить его от воздействия тока. Для этого лучше всего отключить установку ближайшим выключателем или разорвать цепь тока (в электроустановках до 1000 В), перерезав провод при помощи инструментов с изолированными ручками (нож, кусачки, топор и др.). В случаях, когда пострадавший в момент поражения находится на высоте, после отключения электроустановки ему угрожает падение. Необходимо принять меры, предупреждающие падение или возможные ушибы пострадавшего.

При невозможности отключения установки для освобождения пострадавшего от воздействия электрического тока необходимо отделить его от токоведущих частей. В установках до 1000 В для этого используют любой непроводящий ток предмет, например, можно встать на сверток сухой одежды или доску, обмотав шарфом руку, взять пострадавшего за сухую одежду и оттащить его от токоведущих частей. Лучше, конечно, использовать для этого диэлектрические средства защиты (перчатки, боты, коврики).

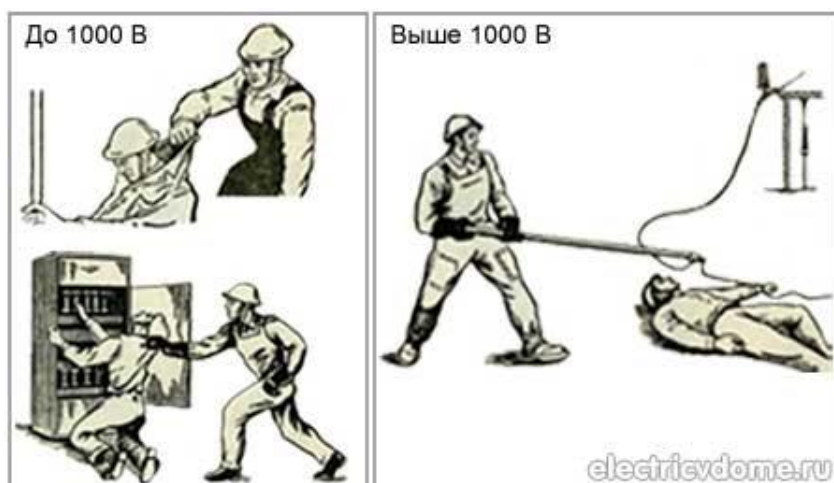


Рисунок 1.2

Доврачебная помощь пострадавшим от электрического тока

Оказание первой помощи зависит от состояния, в котором находится пораженный электрическим током. Для определения этого состояния необходимо немедленно:

- уложить пострадавшего на спину на твердую поверхность;
- проверить наличие у пострадавшего дыхания, пульса;
- выяснить состояние зрачка – узкий или расширенный (расширенный зрачок указывает на резкое ухудшение кровоснабжения мозга).

Во всех случаях поражения электрическим током необходимо вызвать врача независимо от состояния пострадавшего.

При этом следует немедленно начать оказание соответствующей помощи пострадавшему:

– если пострадавший находится в сознании, но до этого был в состоянии обморока или продолжительное время находился под током, его следует удобно уложить на подстилку, накрыть чем-нибудь (одеждой) и до прибытия врача обеспечить полный покой, непрерывно наблюдая за дыханием и пульсом;

– если сознание отсутствует, но сохранились устойчивые пульс и дыхание, нужно ровно и удобно уложить пострадавшего на подстилку, расстегнуть пояс и одежду, обеспечить приток свежего воздуха и полный покой; давать пострадавшему нюхать нашатырный спирт и обрызгивать его водой;

– если пострадавший плохо дышит (резко, судорожно), делать искусственное дыхание и наружный массаж сердца;

– если отсутствуют признаки жизни (дыхание, сердцебиение, пульс), нельзя считать пострадавшего мертвым. В этом случае надо делать искусственное дыхание и массаж сердца.

Вопросы для самопроверки

1. Какие действия может оказывать электрический ток на человека?
2. Назовите местные электротравмы.
3. На какие степени подразделяются электрические удары?
4. Что влияет на сопротивление тела человека?
5. Назовите три критерия электробезопасности.

6. Как продолжительность тока влияет на степень поражения человека электрическим током?

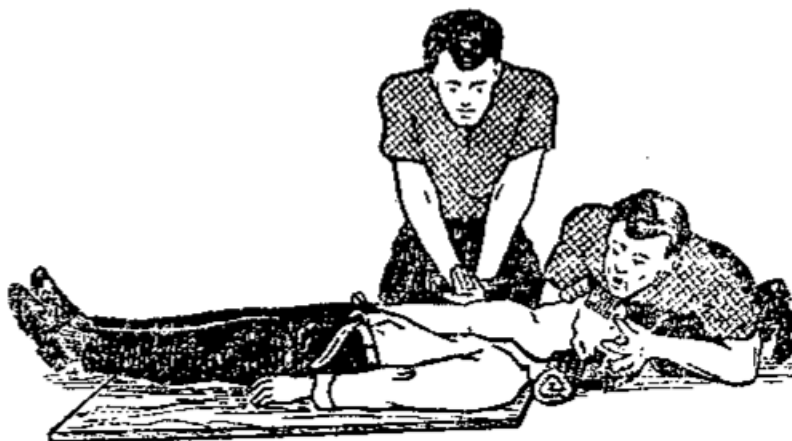


Рисунок 1.3

7. Как путь прохождения тока влияет на степень поражения человека электрическим током?

8. Как можно освободить человека от действия электрического тока?

2. Изучить устройство мультиметра и основные приёмы измерений электрических параметров.

Мультиметр – это универсальный комбинированный измерительный прибор, который сочетает в себе функции нескольких измерительных приборов.

Набор функций мультиметра – это измерение величины напряжения, тока, сопротивления, емкости конденсаторов, частоты тока, проверка диодов (измерение падения напряжения на р-п переходе), звуковой пробник, измерение температуры и многое другое.

Для примера возьмем широко распространенный мультиметр серии **MS8200G**.

Рассмотрим внешнюю панель мультиметра. В верхней части расположен жидкокристаллический индикатор, на котором и будут отображаться измеряемые нами величины.

Под индикатором три кнопки: питание; подсветка; сохранение.

Далее по центру прибора, расположен переключатель величин и пределов измерения.

Под переключателем четыре гнезда для измерительных проводов (щупов) слева направо:

– правое гнездо для общего (минусового) провода во всех режимах и на всех диапазонах;

далее влево:

– гнездо $V \Omega$ для сигнального (плюсового) провода во всех режимах и на всех диапазонах кроме режима измерения тока;

– гнездо для сигнального (плюсового) провода в режиме измерения тока до 200 мА;

– гнездо для сигнального (плюсового) провода в режиме измерения тока до 10А.

Установку диапазона измерения тока и открывание гнезд измерения тока можно выполнить только после извлечения щупа из гнезда $V \Omega$.

Основные функции цифрового мультиметра и назначение органов управления прибором



Рисунок 1.4

Будьте внимательны, при измерении тока больше 200 мА плюсовой провод подключать только крайнее левое гнездо!

Мультиметр питается от 9-вольтовой батарейки типа «Крона» или согласно типоразмеру - 6F22.

Внутри, под задней крышкой мультиметра, имеется предохранитель на 250 мА, который защищает прибор в режиме измерения тока на пределах до 200 мА.

Измерение мультиметром электрических величин

Для измерения напряжения на элементе (участке) электрической цепи прибор включается параллельно этому элементу (или участку цепи) (рис.1.5а). Для измерения тока в цепи прибор **включается в разрыв** измеряемой цепи (то есть последовательно с элементами цепи) (рис.1.5б).

Индикатор для отображения значений измеряемых величин:

Кнопка POWER – включение питания.

Жёлтая кнопка – подсветка индикатора.

H – кнопка сохранения последнего показания.

Переключатель видов и диапазонов измерений:

Ω – сопротивление (200 Ом...20 МОм);

V = – постоянное напряжение DCV (200 mV...1000V);

V~ – переменное напряжение ACV (2V...700V);

Hz – частота;

TEMP – температура;

A~ – переменный ток ACA (2 mA...10A);

A= – постоянный ток DCA (2 mA...10A);

F – ёмкость (2 nF...20 μF);

▶| – проверка диода, проверка цепи.

Гнёзда для щупов:

COM – общий (чёрный провод, -, катод);

V Ω – сигнальный (красный провод, +, анод): напряжение, сопротивление, температура, ёмкость, диод;

mA – сигнальный (красный): ток (MAX 200mA);

10A – сигнальный (красный): ток (MAX 10A).

Как пользоваться мультиметром при измерении постоянного напряжения.

Первое, что необходимо сделать, это выбрать род измеряемого напряжения и предел измерения. Для измерения постоянного напряжения мультиметр имеет целый диапазон значений постоянного напряжения, которые устанавливаются с помощью переключателя пределов.

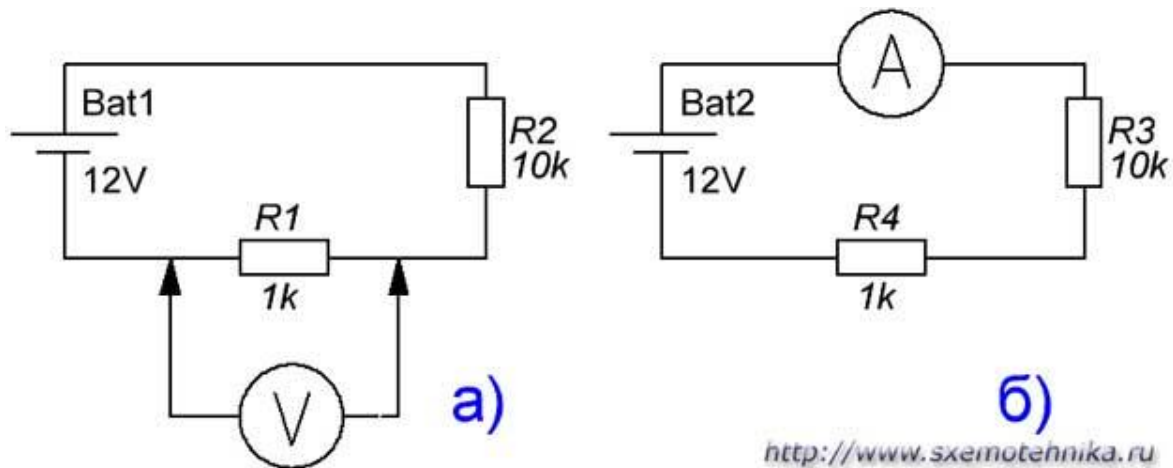


Рисунок 1.5

Для установки предела измерения сначала определим приблизительно значение напряжения, которое нужно измерить. Если измеряете напряжение элементов питания (батареек, аккумуляторов), то ищите надписи на элементах, если измеряете, напряжение на различных элементах цепи, то оцените величину напряжения расчётом параметров цепи.

Допустим, нам необходимо измерить постоянное напряжение на *аккумуляторе*.

1. Изучаем надписи на аккумуляторе, видим, что напряжение АКБ равно 7,4 вольта.

2. Устанавливаем предел измерения **больше** этого напряжения, ближайший к этому значению, тогда измерения будут точнее. Для нашего примера предел измерения 20 вольт.

3. Подключаем мультиметр к клеммам аккумулятора (или параллельно тому участку, где вы проводите измерение напряжения):

– щуп черного цвета один конец – к гнезду COM мультиметра, другой – к минусу измеряемого источника напряжения;

– щуп красного цвета – к гнезду $V\Omega$ и к плюсу измеряемого источника напряжения.

4. Снимаем значение постоянного напряжения с ЖК-индикатора.

Примечание: если вам не известна примерная величина измеряемого значения напряжения, то измерение необходимо начинать с установки самого большого предела и последовательно приближаться к пределу наиболее близкому к измеряемому значению напряжения.

Измерение переменного напряжения производится по той же схеме, что и постоянного.

Правила пользования мультиметром при измерении постоянного тока.

Для измерения тока мультиметр подключается в разрыв ветви цепи, ток которой нужно измерить.

Если значения тока будут меньше 200mA, то, выбрав соответствующий предел измерения, красный щуп подключаем к гнезду **mA** и включаем мультиметр в разрыв цепи.

Если значения тока будут больше 200mA, то подключаем красный щуп к гнезду 10A. Измерение переменного тока производится по той же схеме, что и постоянного.

Правила пользования мультиметром при измерении сопротивления.

Правила выбора пределов измерения сопротивления следующие:

– если известно значение измеряемого сопротивления и необходимо выполнить проверку, то предел измерения устанавливается ближайшим большим к измеряемой величине. В этом случае погрешность измерений минимальна;

– если значение сопротивления неизвестно, то измерения начинают с диапазона с максимальным значением (20Мом), затем уменьшают пределы, приближаясь к измеряемому значению. Если на дисплее отображается «1», то измеряемое значение больше установленного предела – нужно увеличить диапазон.

Для измерения сопротивления необходимо *отключить от цепи*, разорвав ветвь, в которой оно находится.

Для других видов измерений воспользуйтесь пособиями по технике измерений электрических параметров.

3. Провести измерения мультиметром сопротивления всех резисторов, напряжения источника и токов ветвей цепи с использованием лабораторного стенда.

Принципиальная схема исследуемой цепи представлена на рис. 1.6.

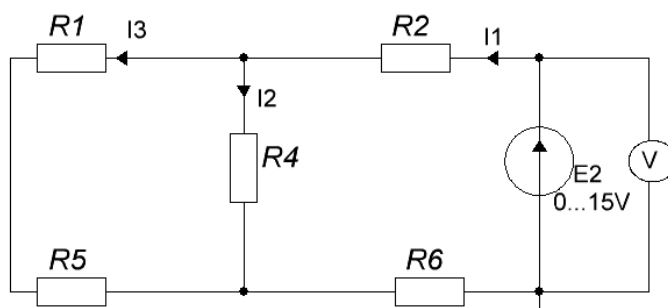


Рисунок 1.6

3.1 На монтажной плате NTC-01.8/01 измерить мультиметром величину сопротивления резисторов, указанных на схеме на рис.1.6.

3.2 Собрать цепь по схеме на монтажной плате, установив перемычки в соответствии с фото1.1.

3.3 Включив питание стенда, установить мультиметр на измерение напряжения на источнике **E2** и вращением ручки слева внизу стенда установить 12 Вольт. Измерить токи **I1**, **I2**, **I3**. Проверить правильность измерений расчётом цепи.

1. Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе выполняется каждым студентом на основе экспериментальных данных, полученных при выполнении работы бригадой и расчётов, произведённых самостоятельно. Отчёт выполняется на двойных листах из тетради в клетку, первый лист титульный. В отчёт включаются следующие разделы:

- цель работы;
- краткие ответы на вопросы по технике безопасности;

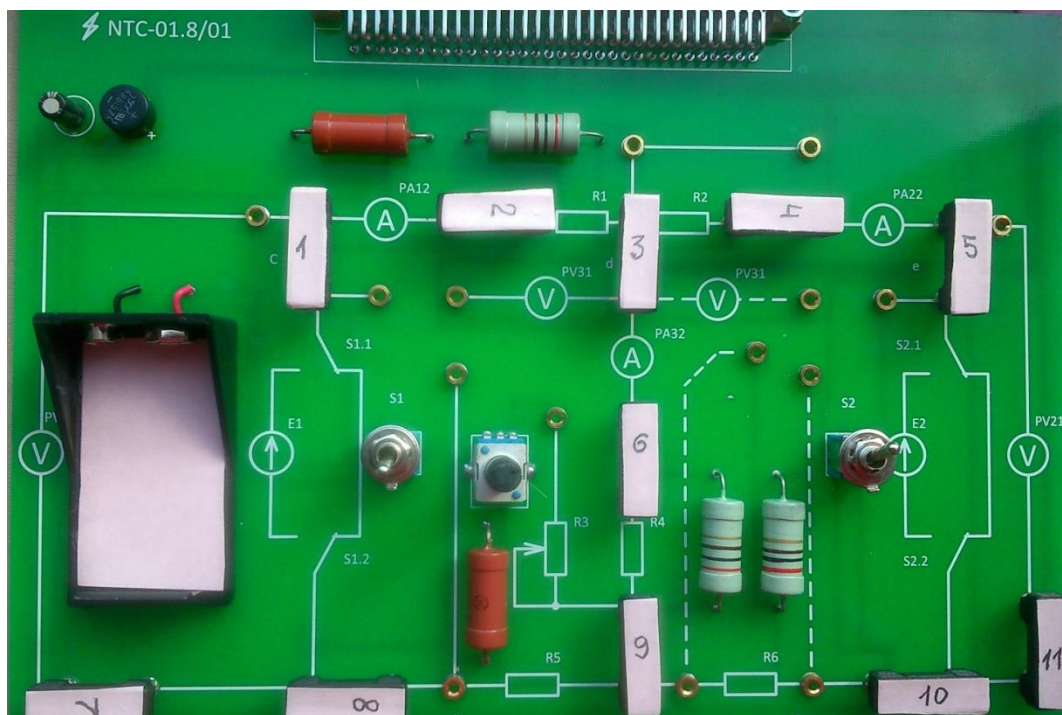


Фото 1.1

- принципиальную схему цепи для измерений с обозначением мест подключения мультиметра в режиме амперметра и вольтметра;
- значения всех измеренных параметров;
- проверку измерений расчётом цепи;
- выводы по работе в целом.

Лабораторная работа № 2

Вольт–амперные характеристики элементов цепей постоянного тока

Цель работы: построить по данным измерений вольт–амперные характеристики (ВАХ) источника напряжения и резистора.

Задание на выполнение работы:

1. Построить ВАХ и определить внутреннее сопротивление источника напряжения.
 - 1.1. По схеме на рис. 2.1 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/01 в соответствии с фото 2.1. Тумблер источника E2 включён (вверх).

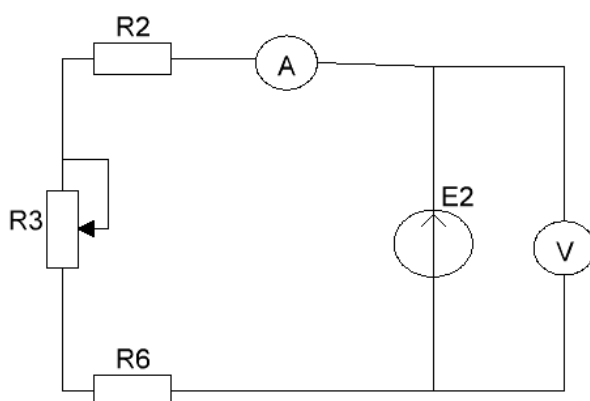


Рисунок 2.1

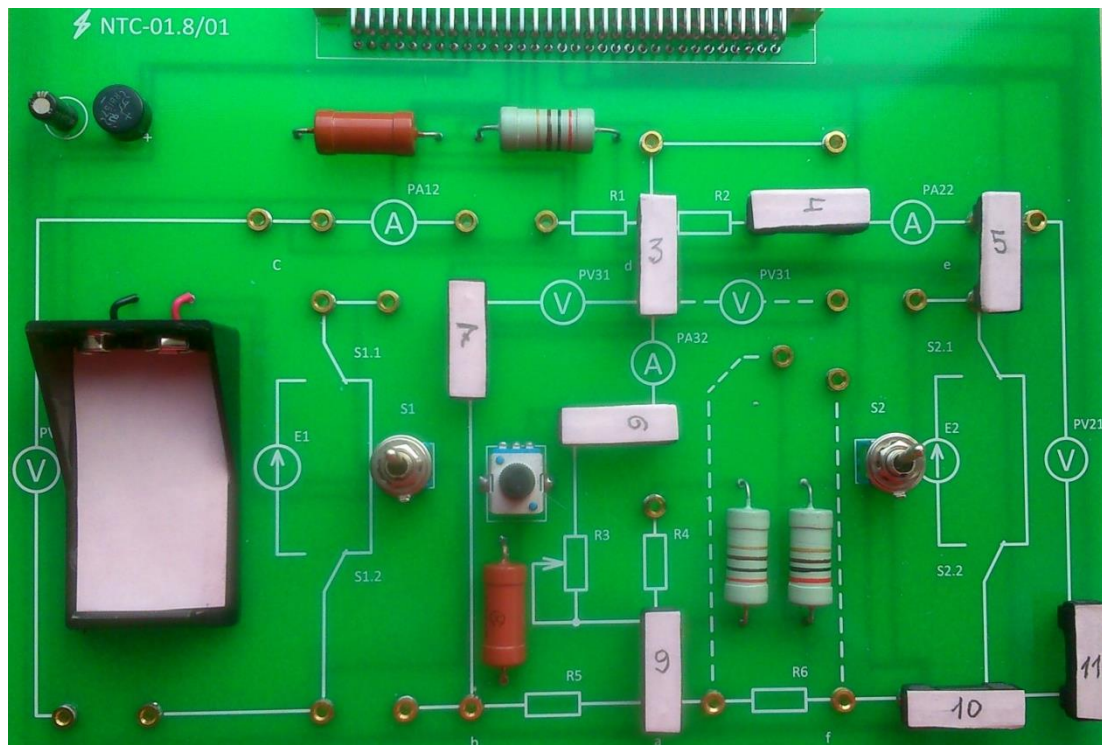


Фото 2.1

- 1.2. Включить питание стенда (фото 2.2), установить напряжение источника $E2$ $U_2 = \max$ на холостом ходу (разрыв цепи, перемычка 4).

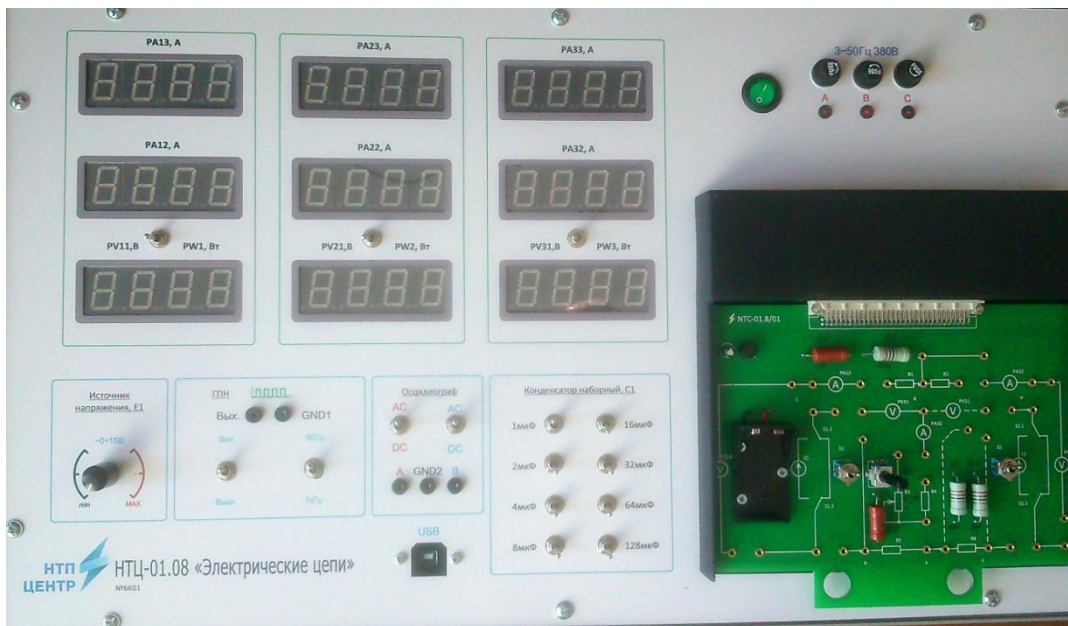


Фото 2.2

Регулирование напряжения источника E2 производится рукояткой, изображённой на фото 2.3.



Фото 2.3

1.3. Снять ВАХ источника напряжения, изменяя сопротивление резистора R_3 от min до max значений. Для этого зафиксировать диапазон токов от I_{min} (PA22) при R_{3min} до I_{max} при R_{3max} . Разбить диапазон на пять интервалов и записать в таблицу значения тока в цепи I (PA22) на границах интервалов (6 значений). Регулировкой R_3 зафиксировать соответствующие значениям тока из таблицы значения напряжения U_2 (PV21). Удалить перемычку (5) и зафиксировать напряжение U_2 (PV21) на холостом ходу ($I = 0$). Результаты измерений записать в таблицу.

Построить график линейной зависимости напряжения U_2 от тока I (ВАХ) и определить из графика внутреннее сопротивление r_0 источника напряжения через угол наклона прямой к горизонтальной оси тока. Значения параметров элементов цепи:

$E_2 = max$; $R_2 = 200 \text{ Ом}$; R_3 от 200 Ом до 1200 Ом и ∞ (разрыв ветви);
 $R_6 = 200 \text{ Ом}$

2. Построить ВАХ и определить сопротивление резистора.

2.1. По схеме на рис. 2.2 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/01 в соответствии с фото 2.1.

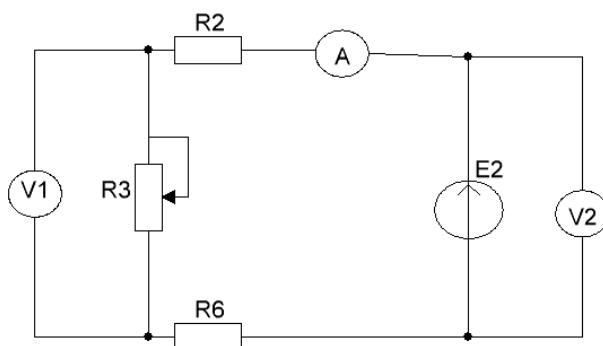


Рисунок 2.2

2.2. Установить положение движка потенциометра $R3$ около среднего положения.

2.3. Измеряя напряжение U_1 ($PV31$) резистора $R3$ и ток I ($PA22$), снять ВАХ резистора при изменении напряжения источника U_2 ($PV21$) от 2 В до max с шагом 2 В (6 точек). Результаты измерений записать в таблицу.

Построить график линейной зависимости напряжения U_1 от тока I (ВАХ) и определить из графика значение сопротивления $R3$ через угол наклона прямой к горизонтальной оси тока. Значения параметров элементов цепи:

$E_2 = 2 \dots \text{max В}$; $R_2 = 200\text{ Ом}$; $R_6 = 200\text{ Ом}$.

Теоретические сведения:

Электрическая цепь представляет собой совокупность связанных определенным образом источников и потребителей (или соответственно активных и пассивных элементов).

Источником электрической энергии называют элемент электрической цепи, осуществляющий преобразование энергии неэлектрического вида в электрическую. Например: гальванические элементы и аккумуляторы преобразуют химическую энергию.

Потребителем электрической энергии называют элемент электрической цепи, преобразующий электрическую энергию в неэлектрическую. Для того чтобы выполнить расчет, необходимо каждое электротехническое устройство представить его схемой замещения.

Схема замещения электрической цепи состоит из совокупности идеализированных элементов, отображающих отдельные свойства физически существующих устройств. Так, идеализированный резистор (сопротивление R) учитывает преобразование электромагнитной энергии в тепло, механическую работу или ее излучение.

Объединение источников, потребителей и соединительных проводов образует электрическую цепь, на каждом участке которой может действовать электрическое напряжение и протекать электрический ток. Эти напряжения и токи в общем случае могут быть постоянными и переменными во времени и зависеть от свойств элементов цепи. В данной работе будут рассматриваться постоянные токи и напряжения.

Реальные электрические цепи изучаются на моделях, которые изображаются с помощью условных обозначений в виде электрических схем.

Напряжение U на элементе электрической цепи обозначается на схеме (рис. 2.3) знаками «+» и «-», имеющими смысл только при совместном рассмотрении, т. к. знак «+» указывает на точку с относительно более высоким потенциалом.

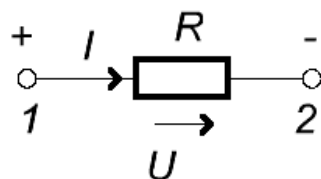


Рисунок 2.3

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$[U] = B \text{ (Вольты)}$$

Ток I в элементе электрической цепи обозначается стрелкой на схеме (рис. 2.3) и указывает направление упорядоченного перемещения положительных электрических зарядов, если ток I выражается положительным числом.

$$I = \frac{q}{t} \quad [I] = A \text{ (Амперы)}$$

Зависимость между током и напряжением на элементе цепи называется *вольт-амперной характеристикой (ВАХ)* элемента, которая обычно изображается графически.

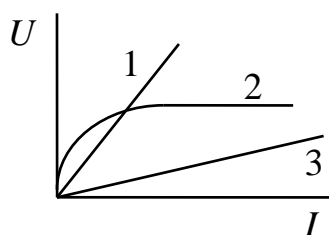


Рисунок 2.4

На рис. 2.4. показаны ВАХ потребителей различного типа. Прямолинейные ВАХ (1) и (3) соответствуют линейным элементам, а криволинейная ВАХ (2) – нелинейным элементам. Мы изучаем линейные цепи, для которых отношение $\frac{U}{I} = const = k$. В данном случае, когда ВАХ изображается прямой линией, считают, что потребитель подчиняется *закону Ома*, согласно которому напряжение и ток пропорциональны друг другу.

Этот коэффициент пропорциональности k называют *электрическим сопротивлением* элемента R , которое измеряется в Омах (Ом).

В качестве потребителя в теории электрических цепей постоянного тока выступает резистор, характеризующийся сопротивлением (R), для которого справедлив закон Ома:

$$\frac{U}{I} = R \text{ или } U = I \cdot R, \quad I = \frac{U}{R}.$$

Обозначение резистора на электрических схемах изображено на рис. 2.5.

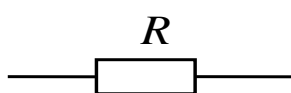


Рисунок 2.5

Величину, обратную сопротивлению $G = \frac{1}{R}$, называют *проводимостью*, которая измеряется в Сименсах (См).

Закон Ома можно представить через проводимость:

$$\frac{I}{U} = G, \quad U = \frac{I}{G}, \quad I = U \cdot G.$$

В пассивных элементах ток течет от точек с относительно большим потенциалом к точкам, имеющим относительно меньший потенциал. Поэтому на рис. 2.3 стрелка тока направлена от «+» к «-», что соответствует закону Ома в форме:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I \cdot R$$

Таким образом, потребитель моделируется идеальным потребителем, свойства которого определяются значением единственного параметра (R или G).

Источники энергии моделируются с помощью источника ЭДС (E), или *источника напряжения*, и *источника тока* (J). ВАХ источников энергии – это внешние характеристики, обычно имеющие ниспадающий характер, т. к. в большинстве случаев с увеличением тока напряжение источника уменьшается.

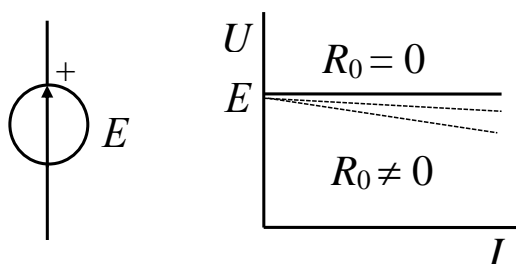


Рисунок 2.6

Идеализированный источник напряжения – это элемент цепи, напряжение которого не зависит от тока и является заданной постоянной величиной, ему соответствует на рис. 2.6. сплошная ВАХ.

В действительности мы имеем дело с реальными источниками напряжения, которые отличаются от идеальных источников тем, что их напряжение с ростом потребляемого тока уменьшается.

ВАХ реального источника напряжения представлена на рис. 2.6. пунктирной линией, тангенс угла наклона которой равен внутреннему сопротивлению источника напряжения R_0 .

Любой реальный источник при сопротивлении нагрузки $R \gg R_0$ может быть приведен к идеализированному следующим образом (рис. 2.7.):

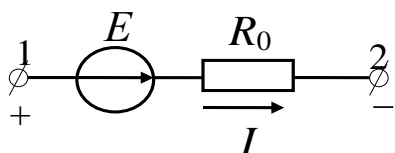


Рисунок 2.7

$$U_{12(\text{реальн.})} = I \cdot R - E$$

$$E_{\text{реальн}} = E - I \cdot R$$

Таким образом, свойства источника ЭДС или реального источника напряжения определяются двумя параметрами – вырабатываемой ЭДС E и внутренним сопротивлением R_0 .

Идеализированный источник тока – это элемент цепи, ток которого не зависит от напряжения и является заданной постоянной величиной, ему соответствует сплошная ВАХ на рис. 2.8.

Идеализированный источник тока – это элемент цепи, ток которого не зависит от напряжения и является заданной постоянной величиной, ему соответствует сплошная ВАХ на рис. 2.8.

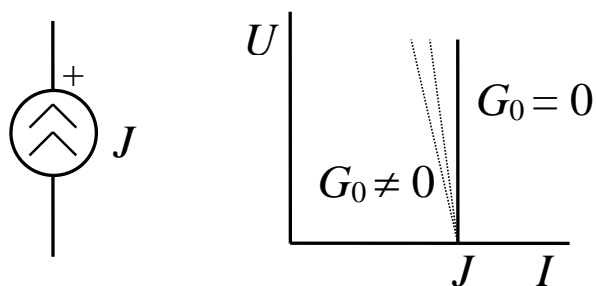


Рисунок 2.8

У реального источника тока с ростом напряжения вырабатываемый ток уменьшается. ВАХ реального источника напряжения представлена на рис. 2.8. пунктирной линией, тангенс угла наклона которой равен внутренней проводимости источника тока G_0 .

Любой реальный источник тока может быть приведен к идеализированно-

му следующим образом (рис. 2.9.)

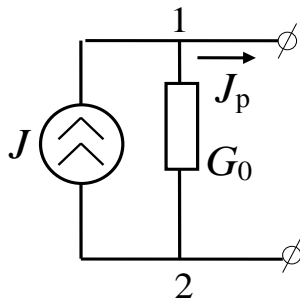


Рисунок 2.9

$$J_p = J - U_{12} \cdot G_0,$$

где J , G_0 – постоянные параметры.

Таким образом, свойства источника задающего тока определяются двумя параметрами: задающим током J и внутренней проводимостью G_0 . Чем меньше G_0 , тем ближе характеристика реального источника тока к идеализированному.

Поскольку внутренние сопротивления реальных источников всегда можно отнести к потребителям цепи, далее рассматриваются только идеализированные источники напряжения и тока.

Таким образом, в теории линейных электрических цепей объектом изучения является *расчетная модель*, состоящая из потребителей и идеализированных источников, конфигурация и свойства элементов которой определены условиями задачи.

При решении задач большое значение придается *структуре электрической цепи (топологии)*, определяемой характером связей между элементами.

К структурным или топологическим свойствам цепи относятся такие ее особенности, которые не связаны с характеристиками входящих в нее активных и пассивных элементов. К ним относятся следующие понятия: ветвь, узел, контур.

Ветвью электрической цепи называют участок, элементы которого включены последовательно друг за другом и обтекаются одним и тем же током.

Узлом электрической цепи называют место соединения нескольких ветвей. Узел связывает не менее трех ветвей и является точкой разветвления.

Ветви считаются соединенными *последовательно*, если они обтекаются одним и тем же током. Ветви считаются соединенными *параллельно*, если они присоединены к одной и той же паре узлов. Таким образом, при последовательном соединении элементов общим параметром для них является ток, при параллельном – напряжение между узлами.

Контуром электрической цепи называется совокупность следующих друг за другом ветвей. Узлы, в которых эти ветви соединяются, являются точками разветвления. При обходе *замкнутого* контура начальная и конечная точки совпадают. В дальнейшем под контуром понимается замкнутый контур.

Цепь, в которой отсутствуют разветвления, называют *одноконтурной*, при наличии разветвлений – *многоконтурной*. Многоконтурная цепь характеризуется числом независимых контуров. Совокупность независимых контуров определяется тем, что каждый из последующих контуров, начиная от элементарного, отличается по меньшей мере одной новой ветвью. Число независимых контуров может быть определено по формуле Эйлера:

$$p = m - n + 1,$$

где m – количество ветвей,

n – количество узлов, причем $m > n$ всегда.

Пример.

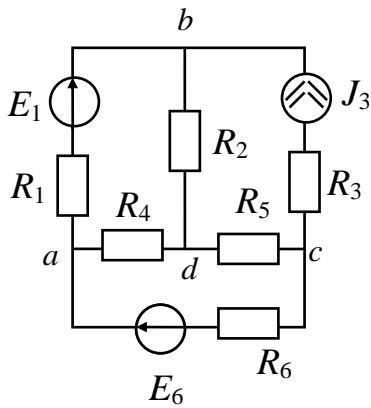


Рисунок 2.10

В цепи на рис. 2.10. четыре узла: a, b, c, d; шесть ветвей: ab, bd, bc, ad, dc, ac. Количество независимых контуров по формуле Эйлера определится следующим образом:

$$p = 6 - 4 + 1 = 3.$$

Это могут быть следующие контуры: abcd, dbc, adc или abd, dbca, adc и другие.

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе выполняется каждым студентом на основе экспериментальных данных, полученных при выполнении работы бригадой, и теоретических расчётов и построений, произведённых самостоятельно. Отчёт выполняется на двойных листах из тетради в клетку, первый лист титульный. В отчёт включаются следующие разделы:

- тема работы;
- цель работы;
- содержание работы. Содержание работы включает наименование опыта, схемы электрических цепей, значения параметров элементов и исходные данные для опытов, результаты измерений, построенные характеристики, расчётные параметры и выводы по каждому опыту;
- выводы по работе в целом.

Отчеты по всем последующим работам выполняются аналогично.

Лабораторная работа № 3 Анализ разветвлённых цепей постоянного тока

Цель работы: определить токи в ветвях многоконтурных цепей с одним и двумя источниками напряжения путём измерений в цепи и расчётов, сравнить результаты.

Задание на выполнение работы:

1. Исследование разветвлённой цепи с одним источником.
 - 1.1. По схеме на рис. 3.1 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/01 в соответствии с фото 3.1.

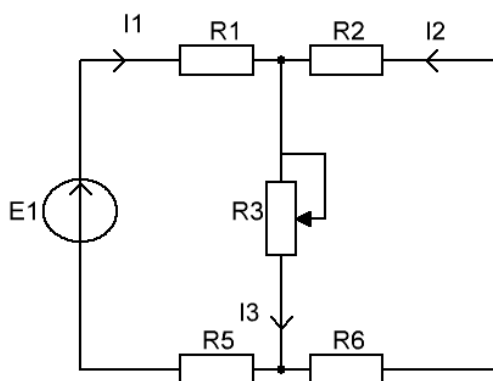


Рисунок 3.1

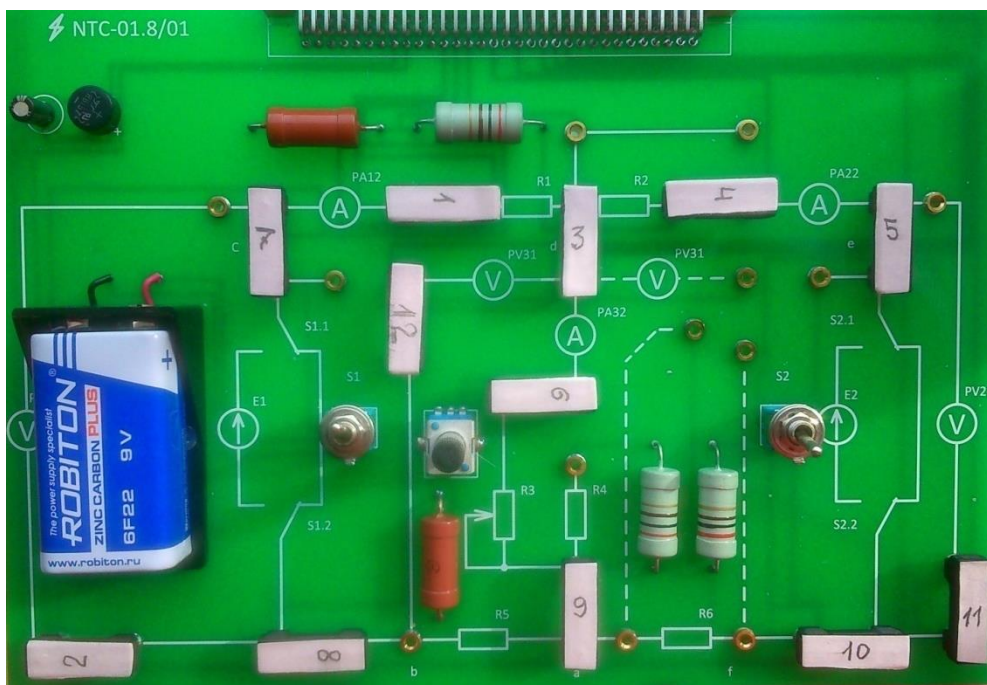


Фото 3.1

Тумблер источника $E1$ включён (вверх), тумблер источника $E2$ выключен (вниз).

Параметры элементов цепи: $E1 = 9\text{В}(PV11)$; $R1 = 51\ \text{Ом}$; $R2 = 200\ \text{Ом}$; $R3 = N \cdot 200\ \text{Ом}$, N – номер бригады; $R5 = 50\ \text{Ом}$ $R6 = 200\ \text{Ом}$. С помощью омметра, удалив пере-

мычку (6), установить заданное для варианта бригады значение $R3$. Измерение сопротивления выполнять мультиметром.

1.2. Измерить значения напряжения источника $E1$ (PV11) и токи ветвей $I1$ (PA12), $I2$ (PA22), $I3$ (PA32).

При оформлении отчёта рассчитать цепь на рис. 3.1 методом пропорциональных величин.

2. Исследование разветвлённой цепи с двумя источниками.

2.1. Схема цепи показана на рис. 3.2. Цепь на монтажной плате в соответствии с фото 3.2.

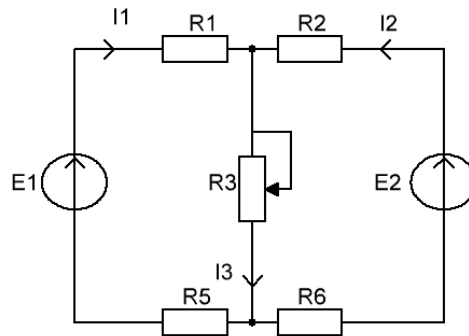


Рисунок 3.2

Включить источник $E2$. Установить напряжение $U_2 = 10 + N \cdot 0,5B$ (PV21) на холостом ходу (разрыв цепи, переключка 4). N – номер бригады. Остальные параметры из предыдущего задания.

2.2. Измерить значения напряжения источников $E1$ (PV11), $E2$ (PV21) и токи ветвей $I1$ (PA12), $I2$ (PA22), $I3$ (PA32).

При оформлении отчёта рассчитать цепь на рис. 3.2 методом узловых потенциалов (методом двух узлов).

Теоретические сведения

Расчет разветвленных цепей с одним источником

Разветвленную цепь с одним источником обычно упрощают, преобразуя в неразветвленную (рис. 3.3). Основная проблема состоит в нахождении токов и напряжений ветвей исходной схемы, поскольку в результате преобразования такие ветви не сохраняются.

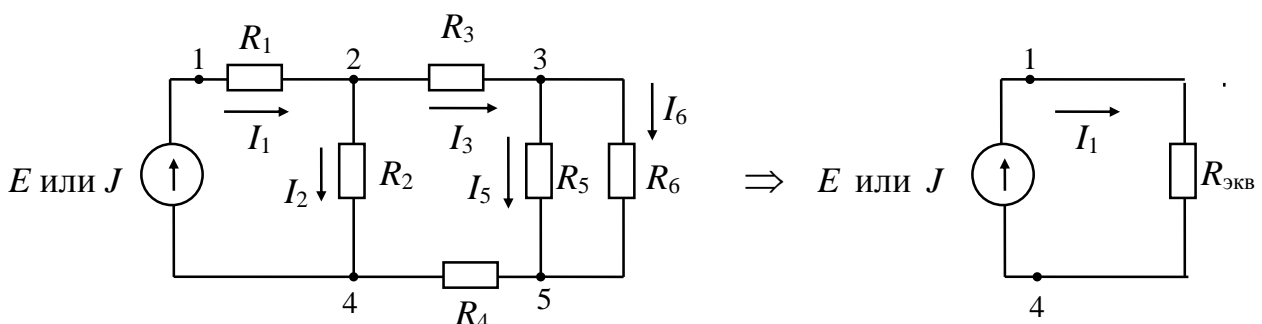


Рисунок 3.3

Для определения токов и напряжений в схеме рис. 2.1. сначала определяется $R_{\text{экв}}$ смешанного соединения потребителей относительно зажимов источника (точки 1 и 4 на рис. 3.3.). Затем, если цепь питается источником напряжения, то определяется ток по формуле:

$$I = \frac{E}{R_{\text{экв}}}.$$

Если цепь питается источником тока, то определяется напряжение

$$U_J = J \cdot R_{\text{экв}}.$$

Порядок дальнейшего расчета одинаков для обоих случаев, т. к. известны E или U_J и I или J неразветвленной части схемы. Рассмотрим порядок расчета для представленной на рис. 3.3 цепи.

Ток в потребителе R_1 совпадает с найденным током неразветвленной части I , а напряжение $U_1 = I_1 \cdot R_1$.

$$U_{24} = E - I_1 \cdot R_1; \quad I_2 = \frac{U_{24}}{R_2} = U_{24} \cdot G_2.$$

Ток I_3 определяется по закону Кирхгофа: $I_3 = I_1 - I_2$.

$$U_{35} = U_{24} - I_3 \cdot (R_3 + R_4); \quad I_5 = \frac{U_{35}}{R_5} = U_{35} \cdot G_5; \quad I_6 = \frac{U_{35}}{R_6} = U_{35} \cdot G_6.$$

Недостаток заключается в том, что цепь приходится рассчитывать дважды – преобразованную и исходную.

При расчетах удобно пользоваться *формулой о токах в двух параллельных пассивных ветвях*. Выведем ее на примере схемы рис. 3.3. Напряжение U_{35} по закону Ома определяется по формуле

$$U_{35} = I_3 R_{56} = I_3 \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}.$$

Тогда ток I_5 можно определить

$$I_5 = \frac{U_{35}}{R_5} = I_3 \frac{R_5 R_6}{(R_5 + R_6) R_5} = I_3 \frac{R_6}{R_5 + R_6}.$$

Аналогично можно определить ток

$$I_6 = I_3 \frac{R_5}{R_5 + R_6}.$$

Таким образом, ток в одной из двух параллельных ветвей равен току неразветвленной части (общей ветви), умноженному на сопротивление противоположной ветви, деленному на сумму сопротивлений обеих ветвей.

Известен еще один метод расчета таких цепей – *метод пропорциональных величин*. Он применим к «удлиненным» цепям (цепным соединениям).

Суть этого метода состоит в следующем: в ветви, наиболее удаленной от источника, (R_6) задаются некоторым значением тока или напряжения. Для удобства расчетов обычно это 1А или 1В. Затем, перемещаясь к началу цепи, определяют поочередно токи и напряжения всех ветвей вплоть до ветви, содержащей источник. Тем самым определя-

ют, какие напряжение $U_{вх}$ и ток $I_{вх}$ должен иметь источник для того, чтобы вызвать во всех ветвях токи и напряжения вычисленных значений. Если ЭДС (E) или задающий ток (J) с этими значениями не совпадают, то необходимо пропорционально изменить вычисленные значения токов и напряжений ветвей путем умножения их на отношение $\frac{E}{U_{вх}}$ или $\frac{J}{J_{вх}}$.

Для схемы на рис. 3.3. пусть $I_6 = 1$. Тогда $U_{35} = I_6 \cdot R_6$ $I_5 = \frac{U_{35}}{R_5}$.

I_3 можно определить по I закону Кирхгофа: $I_3 = I_5 + I_6$.

U_{24} определяем по II закону Кирхгофа: $U_{24} = I_3 \cdot (R_3 + R_4) + U_{35}$.

По закону Ома: $I_2 = \frac{U_{24}}{R_2}$, по I закону Кирхгофа: $I = I_2 + I_3$.

$U_{вх} = U_{24} + I_1 \cdot R_1$.

Коэффициент пересчета определяется следующим образом: $k = \frac{E}{U_{вх}}$. Все рассчитанные значения токов и напряжений необходимо умножить на коэффициент k .

Расчет разветвленных цепей с несколькими источниками

Метод расчета электрических цепей, в котором за неизвестные принимают потенциалы узлов схемы, называют *методом узловых потенциалов*. Число неизвестных в методе узловых потенциалов равно числу уравнений, которые необходимо составить для схемы по I закону Кирхгофа.

Методика расчета цепи постоянного тока методом узловых потенциалов следующая:

1. Обозначить все токи ветвей и их положительное направление.
2. Произвольно выбрать опорный узел и пронумеровать все остальные узлы.
3. Определить собственные и общие проводимости узлов, а также узловые токи, т. е. рассчитать коэффициенты в системе уравнений.
4. Записать систему уравнений в виде:

$$\begin{cases} G_{11}\varphi_1 + G_{12}\varphi_2 + \dots + G_{1k}\varphi_k = J_{11} \\ G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 + \dots + G_{2k}\varphi_k = J_{22} \\ \vdots \\ G_{k1}\varphi_1 + G_{k2}\varphi_2 + \dots + G_{kk}\varphi_k = J_{kk} \end{cases} \dots \begin{cases} \text{для } 1\text{-го узла} \\ \text{для } 2\text{-го узла} \\ \vdots \\ \text{для } n\text{-го узла} \end{cases}$$

Собственная проводимость узла (G_{ii}) представляет собой арифметическую сумму проводимостей всех ветвей, соединенных в i -м узле.

Общая проводимость i -го и j -го узлов ($G_{ij} = G_{ji}$) представляет собой взятую со знаком «-» сумму проводимостей ветвей, присоединенных одновременно к i -му и j -му узлам.

Проводимости ветвей с источниками тока полагаются равными нулю и в собственные и общие проводимости не входят!

Узловой ток (J_{ij}) состоит из двух алгебраических сумм: первая содержит токи источников тока, содержащиеся в ветвях, соединенных в i -м узле; вторая представляет собой произведение ЭДС источников напряжения на проводимости соответствующих ветвей,

соединенных в i -м узле. Со знаком «+» в эту сумму входят E и J источников, действие которых направлено к узлу, со знаком «-» остальные.

В этой системе каждому узлу соответствует отдельное уравнение.

5. Полученную систему уравнений решить относительно неизвестных $(n - 1)$ потенциалов.

6. С помощью обобщенного закона Ома рассчитать неизвестные токи.

Для разветвленной цепи, имеющей только два узла и произвольное количество ветвей, метод узловых потенциалов вырождается в *метод двух узлов*. Решение сводится к отысканию значения потенциала одного из узлов, т. к. потенциал другого узла может быть принятым равным нулю.

Система уравнений превращается в одно уравнение:

$$\varphi_1 \cdot G_{11} = J_{11} \Rightarrow U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{J_{11}}{G_{11}} = \frac{\pm \sum E \cdot G \pm \sum J}{\sum G}$$

при условии, что $\varphi_2 = 0$.

После определения U_{12} токи ветвей и напряжения источников тока находят при помощи обобщенного закона Ома.

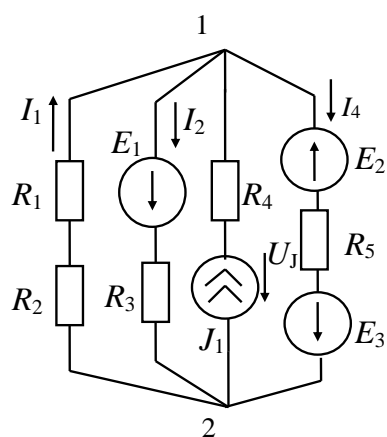


Рисунок 3.4

Пример.

Пусть $\varphi_2 = 0$, тогда

$$U_{12} = \varphi_1 = \frac{-\frac{E_1}{R_3} + J + \frac{E_2 - E_3}{R_5}}{\frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5}}$$

По обобщенному закону Ома:

$$I_1 = \frac{U_{21}}{R_1 + R_2} = \frac{-U_{12}}{R_1 + R_2} \quad I_2 = \frac{U_{12} + E_1}{R_3}$$

Содержание отчета соответствует предыдущей работе.

Методы наложения и эквивалентного генератора для линейных цепей

Цель работы: выполнить экспериментальную проверку методов наложения и эквивалентного генератора при анализе разветвлённой цепи с двумя источниками.

Задание на выполнение работы: для проверки метода наложения провести измерения тока ветви R_3 цепи с двумя источниками и подтвердить правильность метода измерением токов во вспомогательных схемах с одним источником. Определить ток ветви R_3 методом эквивалентного генератора.

1. Проверка метода наложения .

1.1. По схеме на рис. 4.1 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/01 в соответствии с фото 4.1.

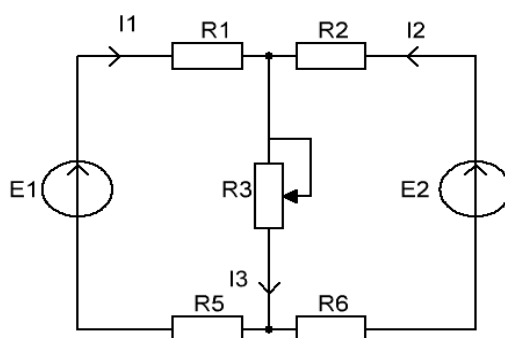


Рисунок 4.1

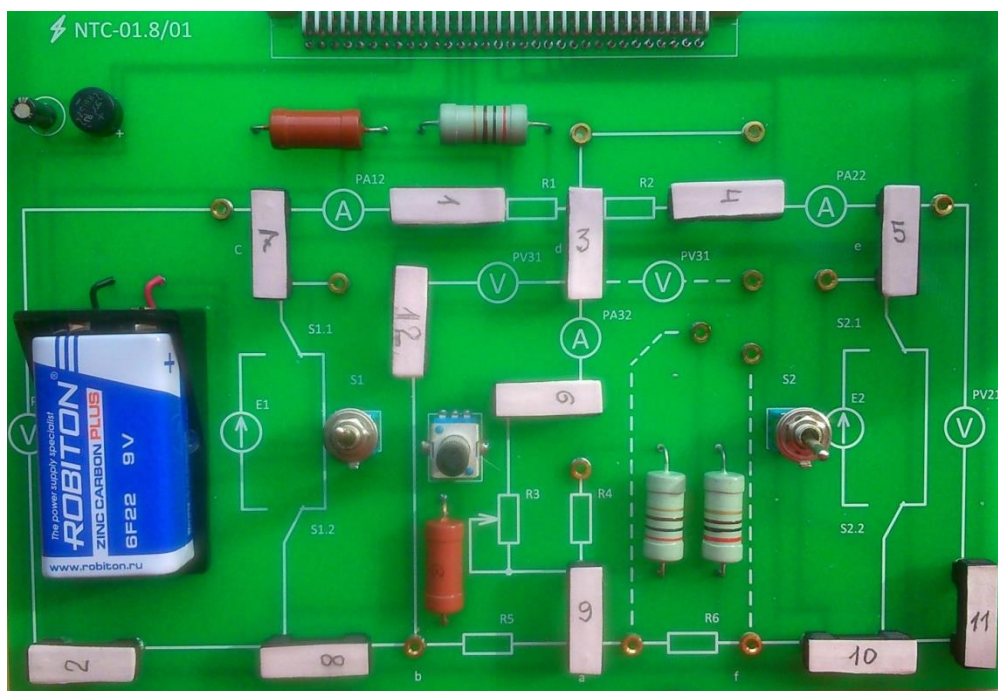


Фото 4.1

Тумблер источника E_1 включён (вверх), тумблер источника E_2 включён (вверх).
 Параметры элементов цепи: $R_1 = 51 \text{ Ом}$; $R_2 = 2000 \text{ Ом}$;

$R3 = N \cdot 200 \text{ Ом}$, N – номер бригады; $R5 = 51 \text{ Ом}$; $R6 = 200 \text{ Ом}$. С помощью омметра, удалив перемычку (6), установить заданное для варианта бригады значение $R3$. Измерение сопротивления выполнять мультиметром. Повернуть регулятор напряжения $E2$ вправо на *max*, включить питание стенда. Измерить значения напряжения источника $E1$ (PV11) и $E2$ (PV21), ток ветви $I3$ (PA32).

1.2. Удалить из цепи источник $E1$ в соответствии со схемой на рис.4.2.

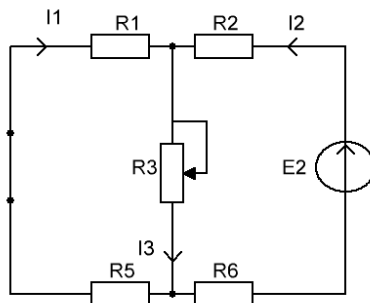


Рисунок 4.2

Для удаления $E1$ выключить (вниз) тумблер на плате.

Измерить ток I_3' ветви $R3$.

1.3. Удалить из цепи источник $E2$ в соответствии со схемой на рис.4.3, для этого включить $E1$ и выключить $E2$.

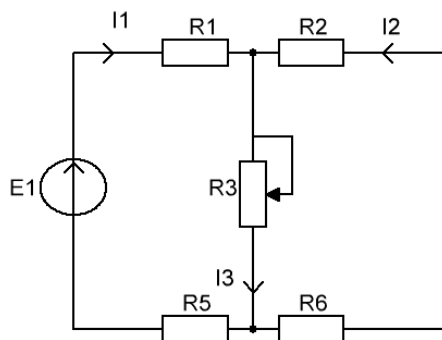


Рисунок 4.3

Измерить ток I_3'' ветви $R3$.

Проверить выполнение теоремы наложения $I_3 = I_3' + I_3''$.

2. Проверка метода эквивалентного генератора.

2.1. Изъять из цепи по схеме на рис. 4.4 резистор $R3$ и в образовавшейся цепи измерить напряжение холостого хода U_{xx} (PV31).

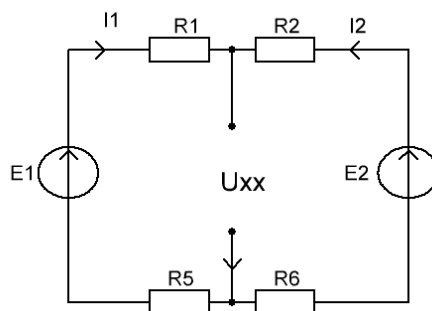


Рисунок 4.4

2.2. Измерить в этой же цепи (рис.4.4) ток $I_{кз}$ (РА32) короткого замыкания полюсов $x) - x)$. Рассчитать эквивалентное сопротивление цепи по отношению к ветви $R3$ $R_o = U_{xx} / I_{кз}$. По схеме на рис. 4.5 рассчитать эквивалентное сопротивление R_o и сравнить с экспериментальным.

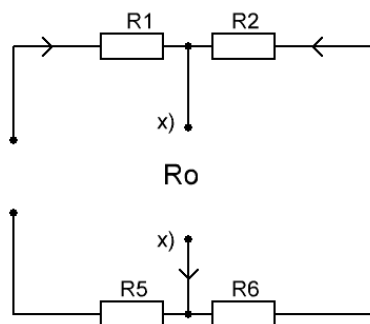


Рисунок 4.5

2.3. Рассчитать ток ветви $I3$ по схеме с эквивалентным источником напряжения по схеме на рис. 4.6.

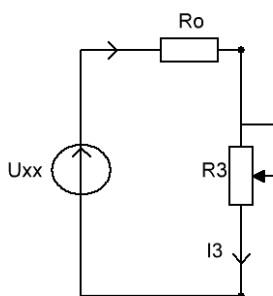


Рисунок 4.6

Сравнить рассчитанное значение тока с током $I3$, измеренным в методе наложения и сделать вывод по теореме об эквивалентном генераторе.

3. Провести расчёт цепи на рис. 4.1 методом двух узлов и сравнить параметры с результатами измерений.

Теоретические сведения:

Теорема наложения.

Метод наложения заключается в следующем: ток или напряжение произвольной ветви или участка разветвленной электрической цепи постоянного тока определяется как алгебраическая сумма токов или напряжений, вызванных каждым из источников в отдельности.

При использовании этого метода задача расчета разветвленной электрической цепи с n источниками сводится к совместному решению n цепей с одним источником.

Методика расчета линейной электрической цепи методом наложения:

1. Произвольно задать направление токов в ветвях исследуемой цепи.
2. Исходную цепь, содержащую n источников, преобразовать в n подсхем, каждая из которых содержит только один из источников, прочие источники исключаются следующим образом: источники напряжения замыкаются накоротко, а ветви с источниками тока

обрываются. При этом необходимо помнить, что внутренние сопротивления реальных источников играют роль потребителей и поэтому они должны оставаться в подсетях.

3. Определить токи каждой из подсетей любым из известных методов. В большинстве случаев расчет ведется по закону Ома с использованием метода эквивалентных преобразований пассивных цепей.

4. Полный ток в любой ветви исходной цепи определяется как алгебраическая сумма токов вспомогательных подсетей.

Теорема об эквивалентном генераторе

Линейную цепь по отношению к любой из её ветвей можно заменить эквивалентным источником напряжения U_{xx} с последовательно включённым сопротивлением R_o .

Например, цепь на рис. 4.1 по отношению к ветви R_3 можно заменить цепью, изображенной на рис. 4.6.

Напряжение эквивалентного источника U_{xx} определяется как напряжение на полюсах $x) - x)$ ветви, ток которой необходимо рассчитать. Для расчёта U_{xx} используется цепь с исключённым потребителем в этой ветви (рис. 4.4). Напряжение U_{xx} можно определить из уравнения баланса напряжений любого контура упрощённой цепи, замыкающегося через полюса $x) - x)$.

Для расчёта R_o используется цепь с заменой источников напряжения коротким замыканием, а источников тока – разрывом ветви (рис. 4.5).

Методика расчета линейной электрической цепи методом эквивалентного генератора:

1. Отключается потребитель в ветви с искомым током и на зажимах обозначается U_{xx} по направлению тока.

2. В образовавшейся более простой цепи находится U_{xx} с помощью закона напряжений Кирхгофа, записанного для любого контура, содержащего U_{xx} . Токи в ветвях упрощённой схемы определяются любым известным методом.

3. Определяется R_o на зажимах разомкнутой ветви при условии $E=0$ и $J=0$. В полученной пассивной цепи пользуются правилами эквивалентных преобразований для потребителей.

По найденным U_{xx} и R_o определяется ток в искомой ветви.

$$I = U_{xx} / (R_o + R_3).$$

Содержание отчёта аналогично предыдущей работе.

Амплитуды и фазы сигналов для элементов цепей синусоидального тока

Цель работы: анализ амплитудных и фазовых соотношений для резистора, конденсатора и индуктивности в установившемся синусоидальном режиме.

Задание на выполнение работы:

1. Осциллограф для отображения синусоидального напряжения.

Осциллограф (лат. *Oscillo* – качаюсь + греч. *Граφω* – пишу) – прибор, предназначенный для исследования (наблюдения, записи, измерения) *амплитудных и временных параметров электрического сигнала*, подаваемого на его вход.

Осциллограф имеет экран, на котором отображаются графики входных напряжений. У цифровых осциллографов изображение выводится на *дисплей*.

Многоканальные осциллографы позволяют одновременно наблюдать на экране несколько напряжений.

Входной сигнал каждого канала подаётся на свой **вход (канал)** и усиливается своим *усилителем вертикального отклонения* до уровня, необходимого для работы отклоняющей системы или *аналого-цифрового преобразователя*. Усилитель вертикального отклонения всегда строится по схеме *усилителя постоянного тока* (УПТ), то есть имеет нижнюю рабочую частоту 0 Гц. Это позволяет измерять постоянную составляющую сигнала, измерять постоянное напряжение. Такой режим работы называется — режим *с открытым входом*.

При *автоматической развёртке* генератор горизонтальной развёртки во времени работает в автоколебательном режиме, поэтому, даже в отсутствие сигнала, по окончании цикла развёртки происходит её очередной запуск, это позволяет наблюдать на экране луч даже в отсутствие сигнала или при подаче на вход вертикального отклонения постоянного напряжения.

Для получения неподвижного изображения на экране каждые последующие траектории движения луча по экрану в циклах развёртки должны пробегать по одной и той же кривой. Это обеспечивает схема *синхронизации* развёртки, запускающая развёртку на одном и том же уровне и фронте исследуемого сигнала.

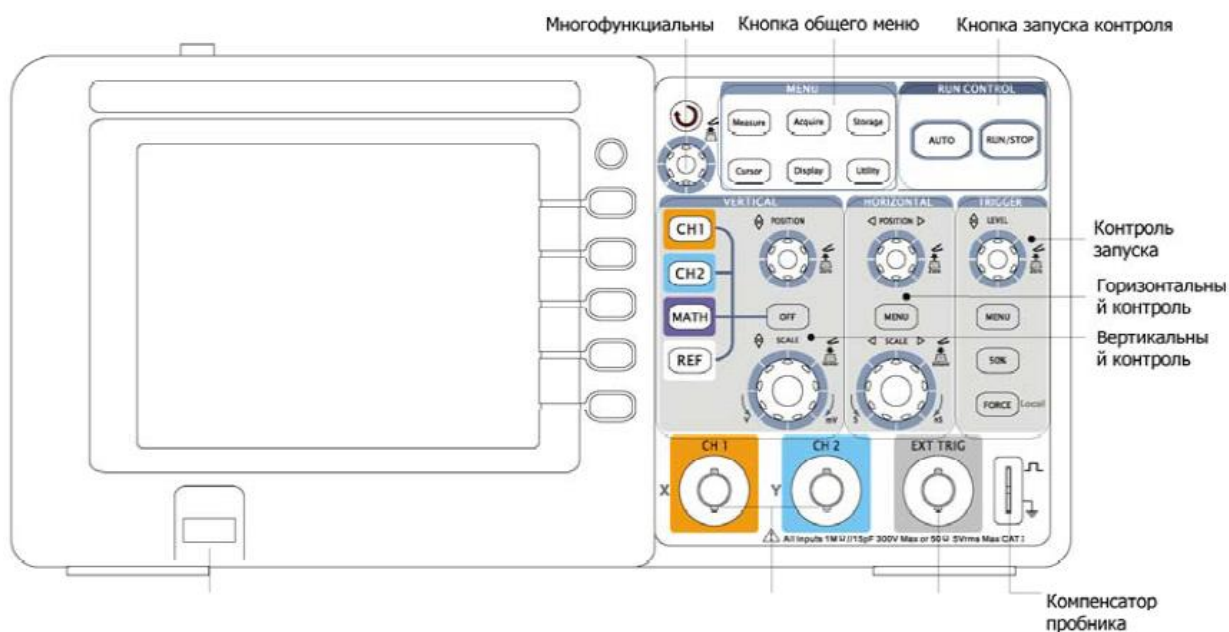
При исследовании *синусоидального* сигнала схема синхронизации может быть настроена так, чтобы запускать развёртку при нарастании синусоиды, когда её значение равно нулю. После запуска луч отображает одну или несколько, в зависимости от настроенной скорости развёртки, волн синусоиды.

Для получения стабильного изображения все осциллографы содержат систему, называемую *схемой синхронизации*. Назначение схемы синхронизации – задерживать запуск развёртки до тех пор, пока не произойдёт некоторое событие. В примере событием было прохождение синусоиды через нуль на нарастающем фронте. Поэтому схема синхронизации имеет как минимум две настройки, доступные оператору:

– уровень запуска – задаёт *напряжение* исследуемого сигнала, при достижении которого запускается развёртка;

– тип запуска – по *фронту* или по *спаду*.

В лабораторной работе используется электронный двухканальный осциллограф серии DS 1000



2. Резистор на переменном токе.

По схеме на рис. 5.1 собрать цепь на монтажной плате NTC –01.8/03 в соответствии с фото 5.1.

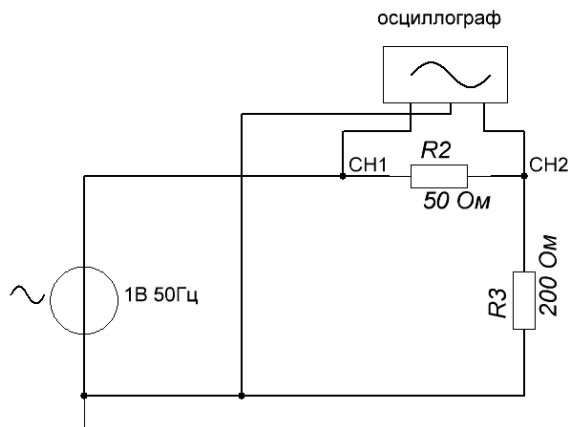


Рисунок 5.1

Установить переключики; подключить осциллограф, для чего общий провод каналов CH1 и CH2 соединить с общей точкой цепи (чёрный нижний провод на фото 5.1); подать напряжение резистора R3, совпадающее по фазе с током цепи, на канал CH2 (правый белый провод на фото 5.1); подать напряжение на входе цепи на канал CH1 (левый белый провод на фото 5.1).

Включить питание стенда. Вращением рукоятки установить напряжение источника E4 1 В. Включить осциллограф. При появлении на дисплее осциллограммы синусоид канала CH1 и CH2 вставить в гнездо осциллографа USB-флешку и войти в режим записи осциллограммы в формате BMP в соответствии с меню. Записать ток цепи (PA12).

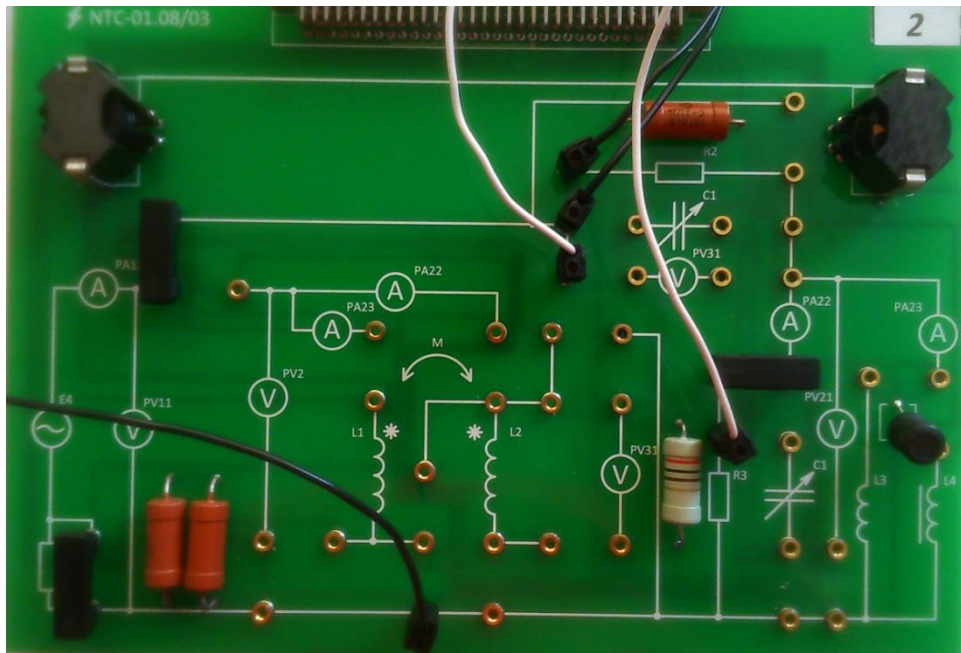


Фото 5.1

Меню записи осциллограммы имеет следующий вид.

- Storage
- Storage
- Waveform
- Internal
- External
- Disk Mana.

Меню	Установки	Комментарии
Storage	Waveform	Сохранить или вызвать осциллограмму.
	Setup	Сохранить или вызвать настройки прибора.
	8-Bitmap	Создать или удалить файл формата bmp 8 бит.
	24-Bitmap	Создать или удалить файл формата bmp 24 бита.
	PNG	Создать или удалить файл формата PNG.
	CSV	Создать или удалить файл формата CSV
	Factory	Восстановить заводские установки
Internal		Войти в меню операций с внутренней памятью (см. Таблицу 2-22)
External		Войти в меню операций с внешней памятью (см. Таблицу 2-23)
Disk Mana.		Войти в меню управления диском (см. Таблицу 2-24)

3. Конденсатор на переменном токе.

По схеме на рис. 5.2 собрать цепь на монтажной плате NTC –01.8/03

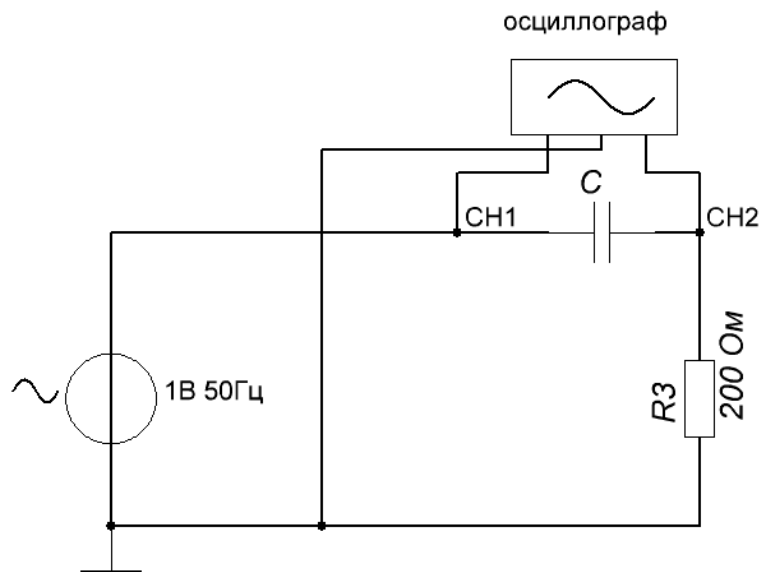


Рисунок 5.2

Ёмкость конденсатора $C=2^{N-1}$, где N – номер бригады, устанавливается тумблером наборного конденсатора $C1$. При включённом тумблере конденсаторы соединяются параллельно, ёмкости суммируются.

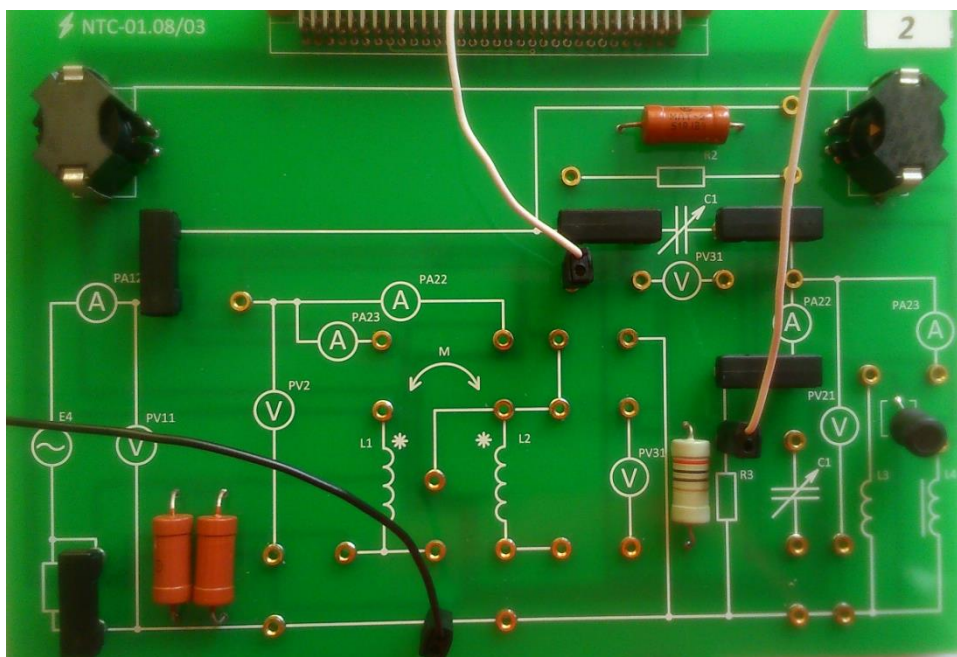


Фото 5.2

Установить переключки; подключить осциллограф, для чего общий провод каналов CH1 и CH2 соединить с общей точкой цепи (чёрный нижний провод на фото 5.2); подать напряжение резистора R3, совпадающее по фазе с током цепи, на канал CH2 (правый белый провод на фото 5.2); подать напряжение на входе цепи на канал CH1 (левый белый провод на фото 5.2).

Включить питание стенда. Вращением рукоятки установить напряжение источника E4 1 В. Включить осциллограф.

При появлении на дисплее осциллограммы синусоид канала CH1 и CH2 вставить в гнездо осциллографа USB-флешку и войти в режим записи осциллограммы в соответствии с меню. Записать ток цепи (PA12).

4. Катушка индуктивности на переменном токе.

По схеме на рис. 5.3 собрать цепь на монтажной плате NTC –01.8/03 в соответствии с фото 5.3.

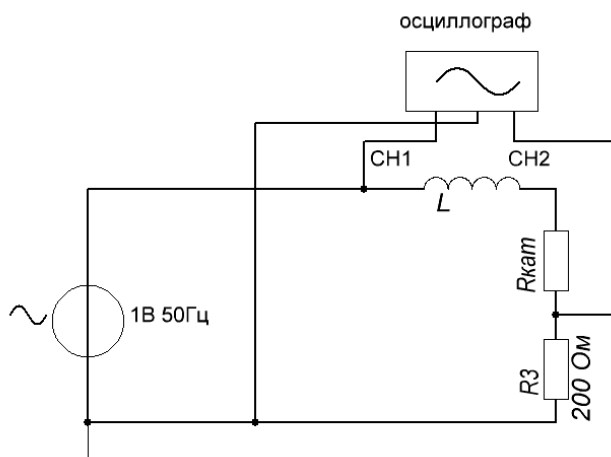


Рисунок 5.3

Индуктивность катушки L2 (по номерам плат): $L_{21}=1$, $L_{22}=5.5$, $L_{23}=1.1$, $L_{24}=0.35$, $L_{25}=0.7$, $L_{26}=0.9$ мГн.

Резистивное сопротивление витков катушки (по номерам плат):

$R_{1к}=45$, $R_{2к}=120$, $R_{3к}=40$, $R_{4к}=21$, $R_{5к}=31$, $R_{6к}=72$ Ом.

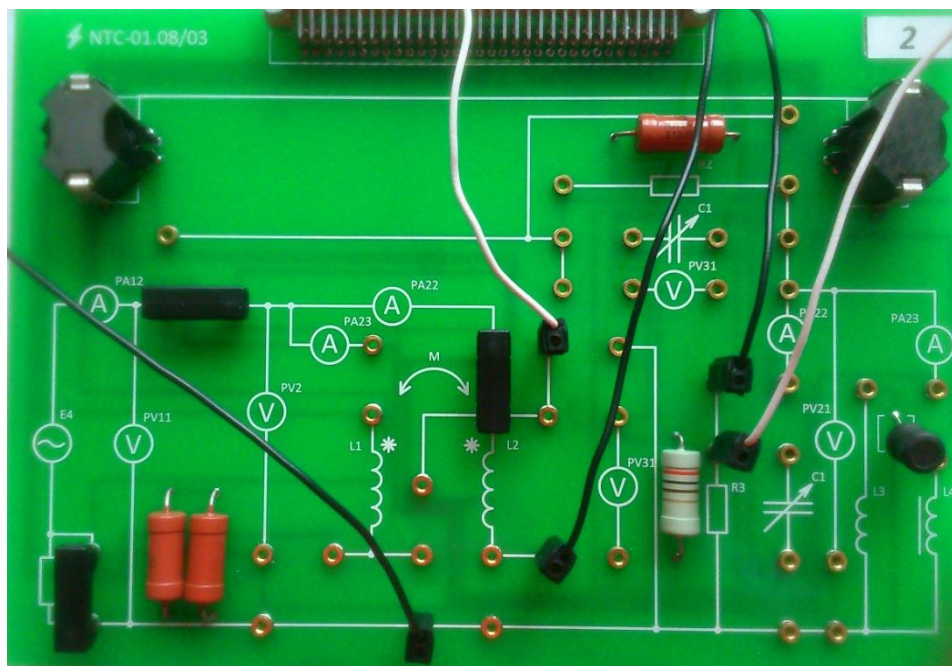


Фото 5.3

Установить переключки; подключить осциллограф, для чего общий провод каналов CH1 и CH2 соединить с общей точкой цепи (чёрный нижний провод на фото 5.1); подать напряжение резистора R3, совпадающее по фазе с током цепи, на канал CH2 (правый белый провод на фото 5.1); подать напряжение на входе цепи на канал CH1 (левый белый провод на фото 5.1).

Включить питание стенда. Вращением рукоятки установить напряжение источника E4 1 В. Включить осциллограф. При появлении на дисплее осциллограммы синусоид канала CH1 и CH2 вставить в гнездо осциллографа USB-флешку и войти в режим записи осциллограммы в соответствии с меню. Записать ток цепи (PA12).

Теоретические сведения:

Переменным *током* $i(t)$ и *напряжением* $u(t)$ называют ток и напряжение, изменяющиеся во времени по величине и направлению.

Сигналы, мгновенные значения которых повторяются через определенный фиксированный промежуток времени, называются *периодическими*, а этот промежуток времени T – *периодом*.

Величина, обратная периоду, называется *частотой* f :

$$f = \frac{1}{T} \quad [f] = c^{-1} = \text{Гц}.$$

Также существует понятие *угловой частоты*:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [\omega] = \text{рад/с}.$$

В электроэнергетике нашли широкое применение синусоидальные сигналы.

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

где $u(t)$, $i(t)$ - *мгновенное значение*

U_m , I_m – *амплитуда* переменного сигнала – максимальная по модулю его величина;

$\omega t + \psi_u$, $\omega t + \psi_i$ – *фаза* гармонического сигнала – аргумент при синусе в каждый момент времени;

ψ_u , ψ_i – *начальная фаза* – значение аргумента в начальный момент времени ($t = 0$).

Фаза измеряется в радианах или градусах.

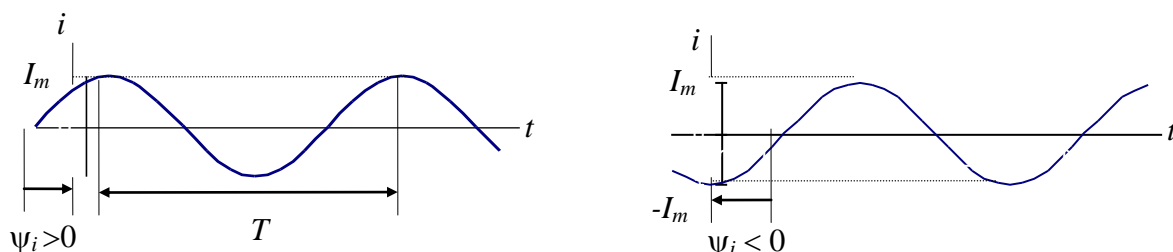


Рисунок 5.4

О значениях периодических токов и напряжений обычно судят по их среднеквадратическим значениям за период, которые называют *действующим значением* тока и напряжения и обозначают I , U .

В действующих величинах градуируются (тарируются) амперметры и вольтметры электродинамической и электромагнитной системы.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

При анализе цепей синусоидального тока применяют главным образом *комплексные действующие значения*, сокращенно их называют *комплексными значениями*, а соответствующие им векторы на комплексной плоскости – *векторами комплексных значений*. Связь между комплексом амплитуды и комплексом действующего значения устанавливается по формуле:

$$\dot{i} = I e^{j\psi_i} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i}; \quad I_m = \sqrt{2} \dot{I}.$$

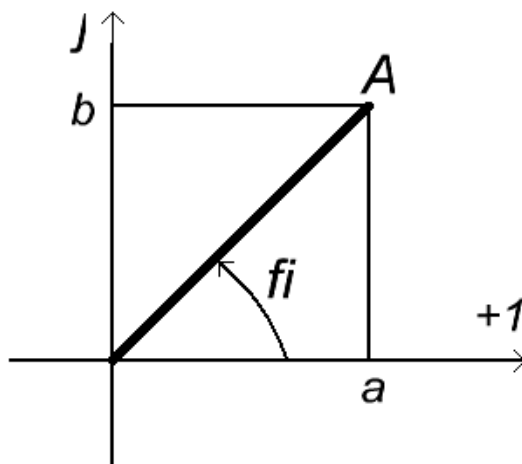
Пример символического представления функции времени $i = 10 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)$.

$$\dot{I}_m = 10 e^{j\frac{\pi}{3}} \text{ – комплекс амплитуды;}$$

$$\dot{I}(t) = 10 e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)} \text{ – комплекс мгновенного значения;}$$

$$\dot{I} = \frac{10}{\sqrt{2}} e^{j\frac{\pi}{3}} \text{ – комплекс действующего значения.}$$

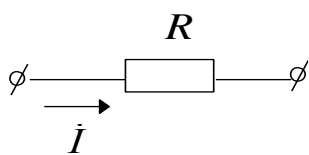
Совокупность векторов комплексных значений синусоидальных величин *одной частоты*, изображенных на комплексной плоскости, называют *векторной диаграммой*.



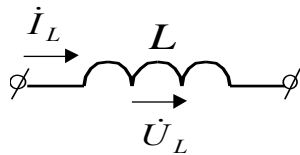
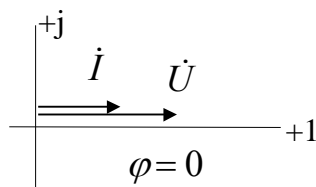
$$\dot{A} = A \angle \varphi = A e^{j\varphi} = A \cos \varphi + j A \sin \varphi = a + jb,$$

где $a = \operatorname{Re}(\dot{A}) = A \cos \varphi$ и $b = \operatorname{Im}(\dot{A}) = A \sin \varphi$ $A = \sqrt{a^2 + b^2}$; $\varphi(fi) = \arctg \frac{b}{a}$.

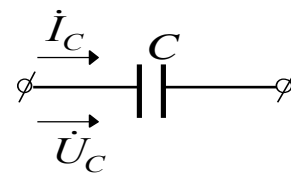
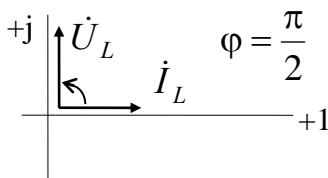
Рассмотрим закон Ома в символической форме записи для элементов цепи гармонического тока



Если $u(t) \rightarrow \dot{U}$,
 $i(t) \rightarrow \dot{I}$, то $\dot{U} = \dot{I}R$. Это
закон Ома в символической
форме.



$u_L = Li'_L \rightarrow$
Закон Ома: $\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = jX_L$.
 $X_L = \omega L$



$u_C = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C dt \rightarrow$
 $\dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}_C =$
 $= -jX_C \dot{I}_C$.
Закон Ома: $\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = -jX_C$.
 $X_C = 1/\omega C$

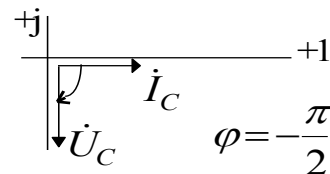


Рисунок 5.5

На рис. 5.5 приведены векторные диаграммы напряжений и токов соответственно для сопротивления, индуктивности и емкости.

Последовательное соединение R, L, C

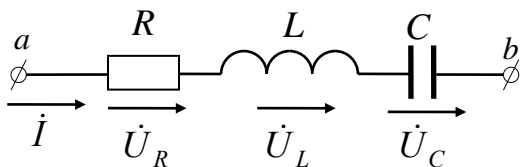


Рисунок 4.11

По II закону Кирхгофа

$$u_{ab}(t) = u_R + u_L + u_C.$$

$$u_R \rightarrow \dot{U}_R = \dot{I}R; \quad u_L \rightarrow \dot{U}_L = \dot{I}jX_L;$$

$$u_C \rightarrow \dot{U}_C = -\dot{I}jX_C.$$

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}(R + jX_L - jX_C) = \dot{I}(R + j(X_L - X_C)) = \dot{I}\underline{Z},$$

где \underline{Z} – комплексное сопротивление цепи.

На основании теоремы Эйлера

$$\dot{U}_{ab} = \dot{I}Z e^{j\varphi} = \dot{I} \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} e^{j \arctg \frac{X_L - X_C}{R}}.$$

Полное сопротивление равно модулю полного комплексного сопротивления

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

аргумент полного комплексного сопротивления равен разности фаз напряжения и то-

ка $\varphi = \psi_u - \psi_i = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$.

Комплексное сопротивление можно представить в виде

$$\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = Z \cos\varphi + jZ \sin\varphi = R + jX,$$

где R – действительная часть комплексного сопротивления, называется *активным сопротивлением*, $R = Z \cos\varphi$;

X – мнимая часть комплексного сопротивления, называется *реактивным сопротивлением*, $X = Z \sin\varphi = X_L - X_C$.

Таким образом, закон Ома в общем виде $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}$, где \underline{Z} может представлять, в част-

ности, следующее: для сопротивления $\underline{Z} = R$, для индуктивности $\underline{Z} = jX_L = X_L e^{j90^\circ}$, для емкости $\underline{Z} = -jX_C = X_C e^{-j90^\circ}$.

Для рассматриваемой цепи построим векторную диаграмму токов и напряжений. Поскольку для всех элементов общим является ток, вектор тока и выберем в качестве исходного вектора, направив его по действительной оси (рис.5.6).

При отсутствии конденсатора или катушки расчётные соотношения упрощаются.

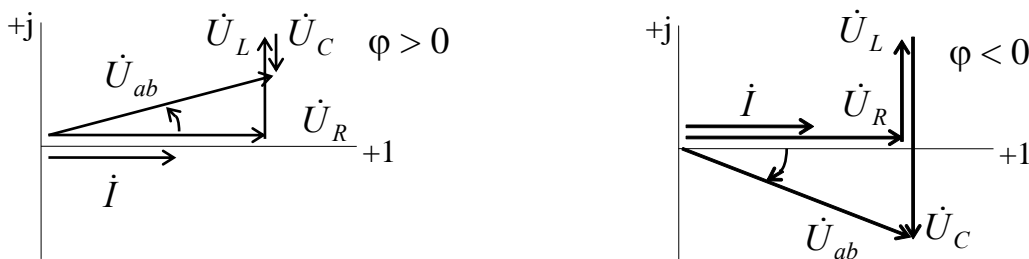


Рисунок 5.6

Возможны три режима работы такой цепи:

- $X_L > X_C$ – индуктивный режим, $\varphi > 0$;
- $X_L = X_C$ – резонанс напряжений, $\varphi = 0$;
- $X_L < X_C$ – емкостный режим, $\varphi < 0$.

Угол φ (разность начальных фаз напряжения и тока) определяется углом поворота вектора тока к вектору напряжения по кратчайшему пути: если поворот определяется против часовой стрелки, то $\varphi > 0$ (опережающий ток), иначе – $\varphi < 0$ (отстающий ток). Как видно из приведенных выше формул, характер цепи определяет большее реактивное сопротивление.

Содержание отчёта:

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- а) цель работы;
- б) результаты моделирования цепи с резистором R (схему цепи, осциллограмму напряжений, действующее значение тока в цепи);
- в) расчёт амплитудного и действующего значения тока и сдвига фаз напряжения и тока в цепи по значениям параметров цепи и по осциллограммам;
 - векторную диаграмму напряжения и тока в цепи;
 - выводы о соотношении амплитуд и фаз в цепи с резистором;

г) результаты моделирования цепи с конденсатором C (схему цепи, осциллограмму напряжений, действующее значение тока в цепи при частоте генератора $f_g = 50$ Гц;

д) расчёт амплитудного и действующего значения тока и сдвига фаз напряжения и тока в цепи по значениям параметров цепи и по осциллограммам;

– векторную диаграмму напряжения и тока в цепи;

– выводы о соотношении амплитуд и фаз в цепи с конденсатором;

е) результаты моделирования цепи с индуктивностью L (схему цепи, осциллограмму напряжений, действующее значение тока в цепи при частоте генератора $f_g = 50$ Гц);

ж) расчёт амплитудного и действующего значения тока и сдвига фаз напряжения и тока в цепи по значениям параметров цепи и по осциллограммам;

– векторную диаграмму напряжения и тока в цепи;

– выводы о соотношении амплитуд и фаз в цепи с индуктивностью;

Лабораторная работа № 6
Резонанс напряжений в последовательной R- L- C цепи

Цель работы: определить параметры конденсатора и катушки в режиме резонанса и определить добротность контура.

Задание на выполнение работы:

1. Определение параметров цепи для режима резонанса напряжений.

По схеме на рис. 6.1 собрать цепь на монтажной плате NTC –01.8/03 в соответствии с фото 6.1 для плат 1, 3, 4, 5, 6.

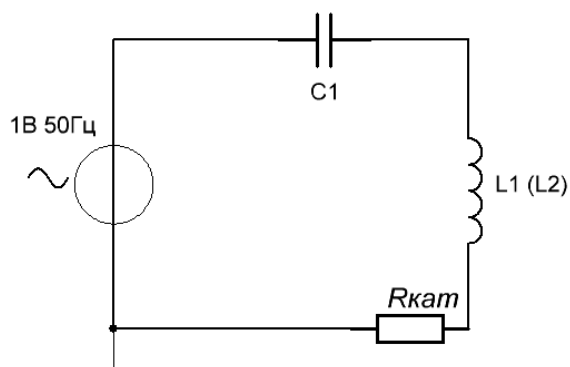


Рисунок 6.1

$R_{кам}$ – сопротивление витков катушки. Для справки (по номерам плат): $R_1 = 45$, $R_3 = 40$, $R_4 = 21$, $R_5 = 31$, $R_6 = 72$ Ом.

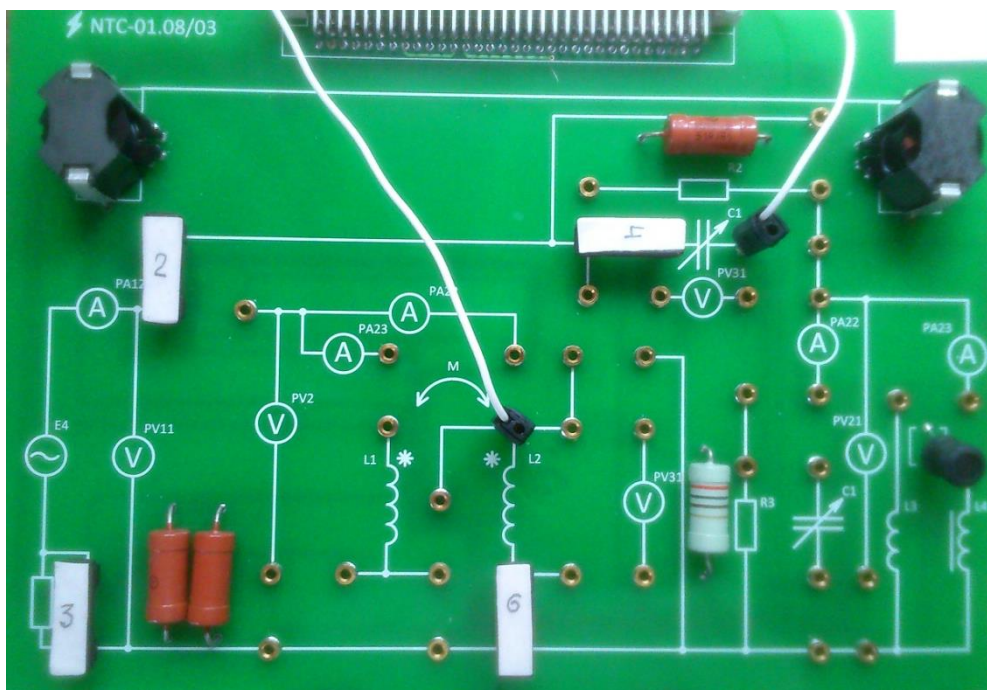


Фото 6.1

Включить питание стенда. Вращением рукоятки E1 стенда установить напряжение источника E4 1В (PV11).

Нарастив ёмкость батареи конденсаторов C_1 , начиная с включения (вверх) минимальной ёмкости 1 мкФ, фиксировать значение тока цепи (РА12). Данные тока и ёмкости записать в таблицу.

Определить максимальное значение тока, соответствующее режиму резонанса.

Построить график зависимости тока цепи от ёмкости конденсатора. Определить ёмкость батареи конденсаторов для режима резонанса по максимуму тока. Рассчитать индуктивность катушки по параметрам резонанса. Рассчитать теоретический ток цепи при резонансе. Рассчитать добротность контура.

2. Наблюдение и запись осциллограммы напряжений конденсатора и катушки в режиме резонанса.

По схеме на рис. 6.2 подключить осциллограф для отображения $u_c(t)$ и $-u_L(t)$ в соответствии с фото 6.2.

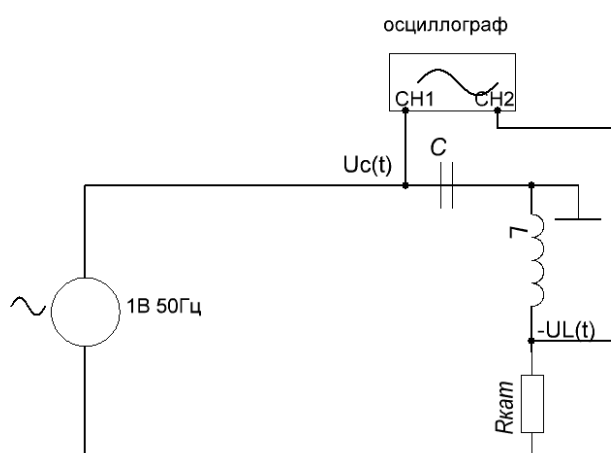


Рисунок 6.2

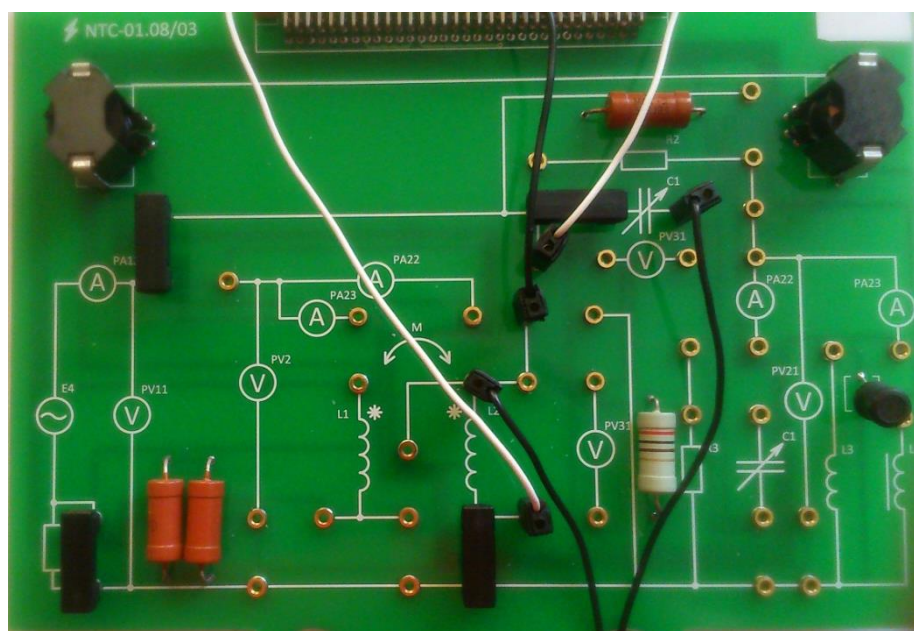


Фото 6.2

Правый белый провод – канал CH1, левый белый провод – канал CH2, чёрный провод наверху – общий каналов осциллографа.

Подключить ёмкость конденсатора для резонанса $C_{рез}$. Включить осциллограф, совместить нулевой уровень синусоид. Записать осциллограмму на флешку.

Получить и записать осциллограммы для $C < C_{рез}$ и $C > C_{рез}$.

Теоретические сведения:

Резонанс напряжений

Резонанс напряжений наблюдается в цепях с последовательным соединением элементов. Рассмотрим режим резонанса напряжений для последовательной RLC-цепи.

Для схемы на рис. 6.3 справедливо

$$\dot{U} = R\dot{I} + j(X_L - X_C)\dot{I} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Изменим частоту генератора или параметры катушки индуктивности или емкости так, чтобы для этой схемы выполнялось $X = X_L - X_C = 0$, тогда

$\dot{U}_L + \dot{U}_C = jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = 0$, напряжение на входе $\dot{U} = R\dot{I} = \dot{U}_R$, т. е. ток и напряжение на входе совпадают по фазе. В цепи – режим резонанса

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = 0.$$

Частота, при которой наблюдается резонанс, ω_0 может быть определена из соотношения

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Ток в цепи в режиме резонанса $I_0 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{R}$, т. е. максимально

возможный при данных параметрах контура.

Полная мощность цепи $S = I_0^2 Z = I_0^2 R = P$, т. е. равна мощности, выделяемой на активном сопротивлении.

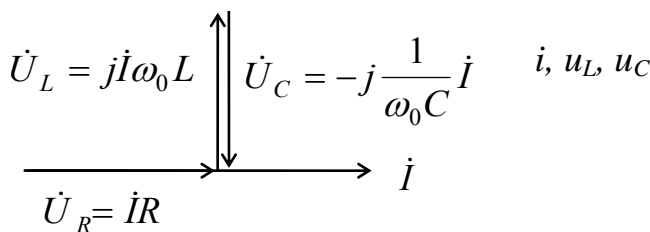


Рисунок 6.4

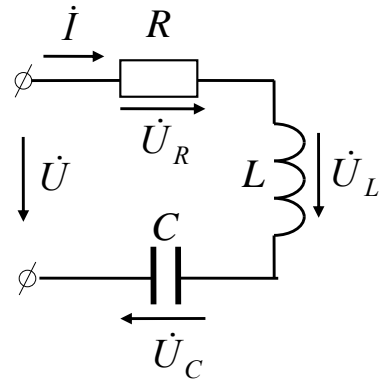


Рисунок 6.3

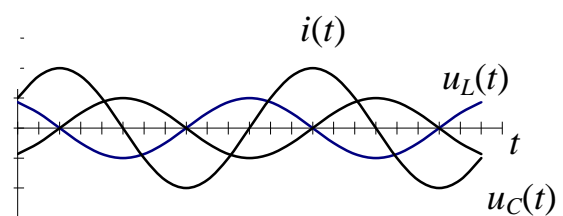


Рисунок 6.5

На рис. 6.4 представлена векторная диаграмма, которая соответствует режиму резонанса. Временная диаграмма тока и напряжений представлена на рис. 6.5 ($\psi_i = 0$).

В каждый момент времени $U_L - U_C = 0$. Учитывая, что $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, получаем

$$\begin{aligned}\omega_0 L &= \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \\ &= \frac{\sqrt{LC}}{C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho\end{aligned}$$

где ρ – *характеристическое, или волновое, сопротивление* резонансного контура, измеряемое в Омах.

Отношение напряжения на реактивных элементах (U_L и U_C) к напряжению на входе в режиме резонанса называют *добротностью* контура:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_0 L I_0}{R I_0} = \frac{I_0}{\omega_0 C I_0 R} = \frac{\rho}{R}.$$

Чем больше $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ и чем меньше активное сопротивление в цепи, тем выше

напряжение на реактивных элементах по сравнению с напряжением на входе контура.

Содержание отчёта.

Отчёт по лабораторной работе должен содержать:

- а) цель работы;
- б) схему цепи, параметры элементов цепи, результаты исследования параметров для определения резонанса;
- в) расчёт всех параметров в соответствии с заданием;
- г) осциллограммы для трёх режимов работы цепи;
- д) выводы о соответствии экспериментальных и теоретических параметров.

Лабораторная работа № 7
Исследование трёхфазной цепи «звезда – звезда»

Цель работы: изучить влияние режима нагрузки фаз и нейтрального провода на параметры трёхфазной цепи при соединении фаз генератора и нагрузки по схеме «звезда – звезда».

Задание на выполнение работы:

1. Исследовать влияние нагрузки на параметры трёхфазной цепи без нейтрального провода.

По схеме рис. 7.1 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/04 согласно фото 7.1.

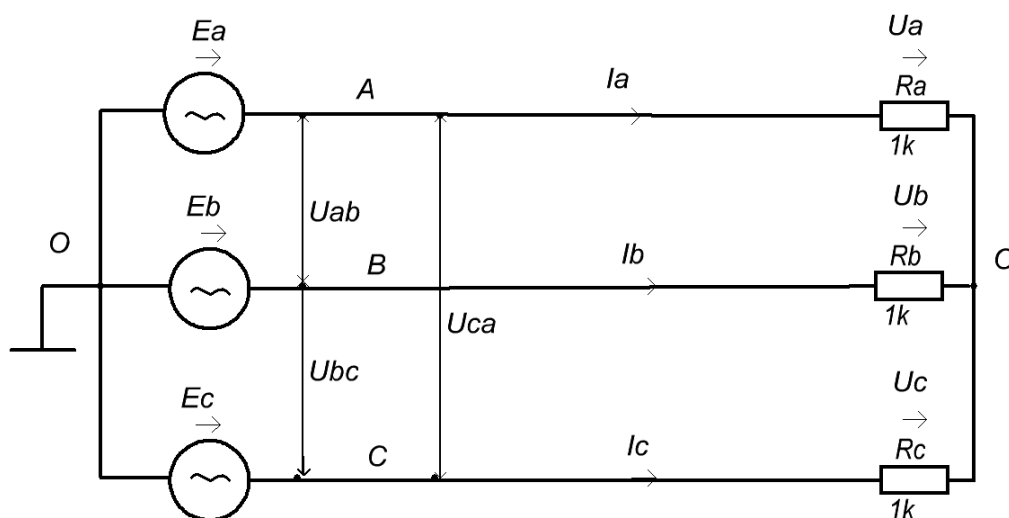


Рисунок 7.1 – Схема 3-фазной цепи «звезда – звезда» без нейтрального провода

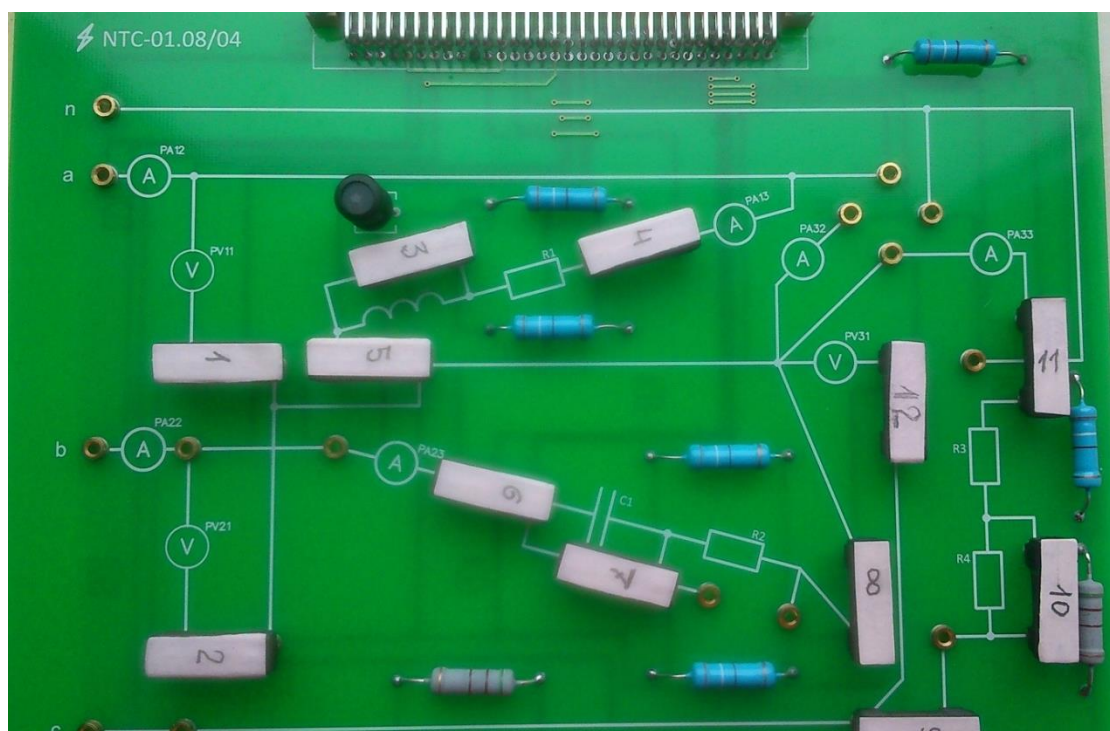


Фото 7.1

Параметры цепи: $R_1 = R_2 = R_3 = 194 \text{ Ом}$; $R_4 = 250 \text{ Ом}$; $C_1 = 128 \text{ мкФ}$. $E_a = E_b = E_c = 13,5 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$.

Измерьте линейные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} с помощью мультиметра. Зафиксируйте фазные напряжения и токи в цепи без нейтрального провода для симметричного режима в соответствующей строке таблицы 7.1.

Таблица 7.1 – «Звезда – звезда» без нейтрального провода

Режим работы	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_a PV11	U_b PV21	U_c PV31	I_a PA13	I_b PA23	I_c PA32
Симметричный режим нагрузки									
Несимметричный режим									
Реактивная нагрузка фазы									
Обрыв фазы									

Для установления несимметричного режима выключите питание стенда и измените сопротивление нагрузки в фазе с), удалив перемычку (10) (Фото 7.2).

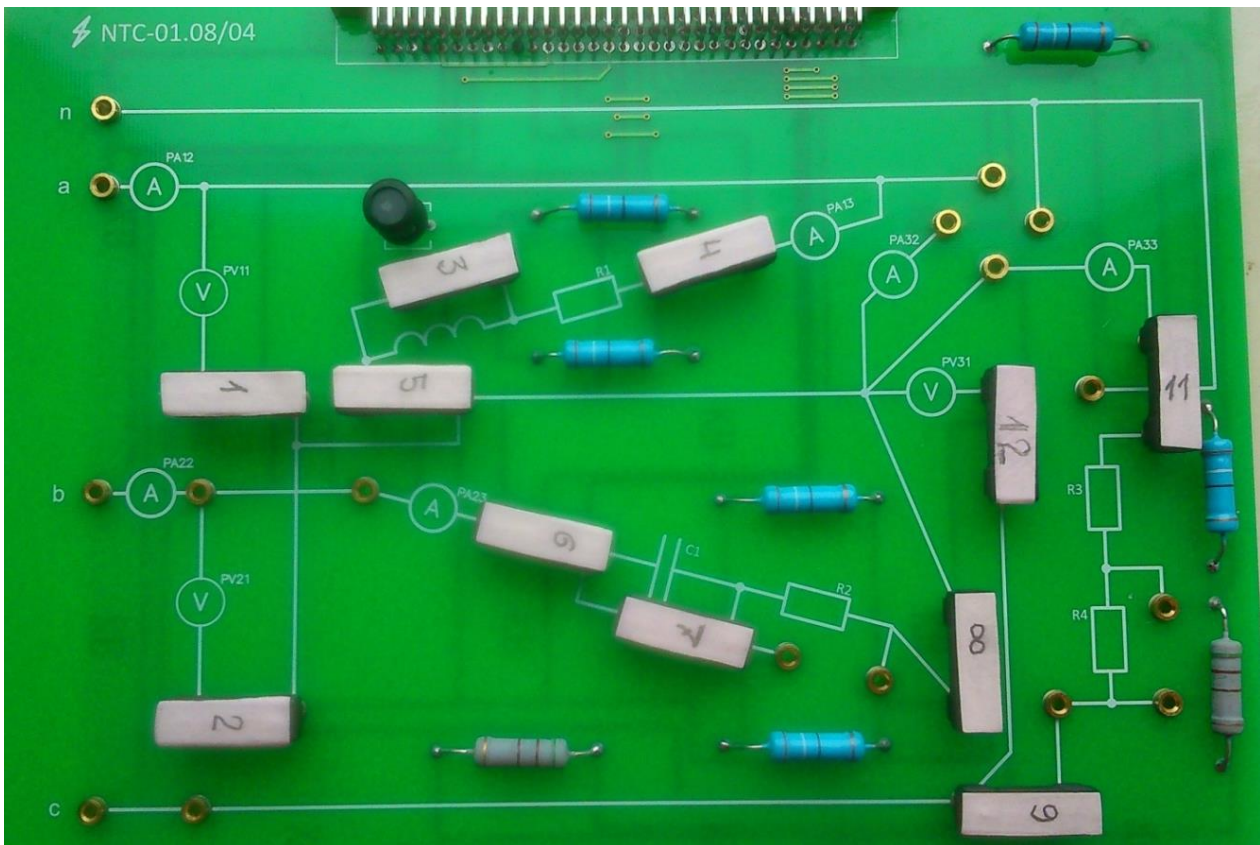


Фото 7.2

Включите питание и занесите показания приборов в таблицу 7.1.

Для установления режима с реактивной нагрузкой замените резистор в фазе в) конденсатором с ёмкостью $C = 128 \text{ мкФ}$ (фото 7.3).

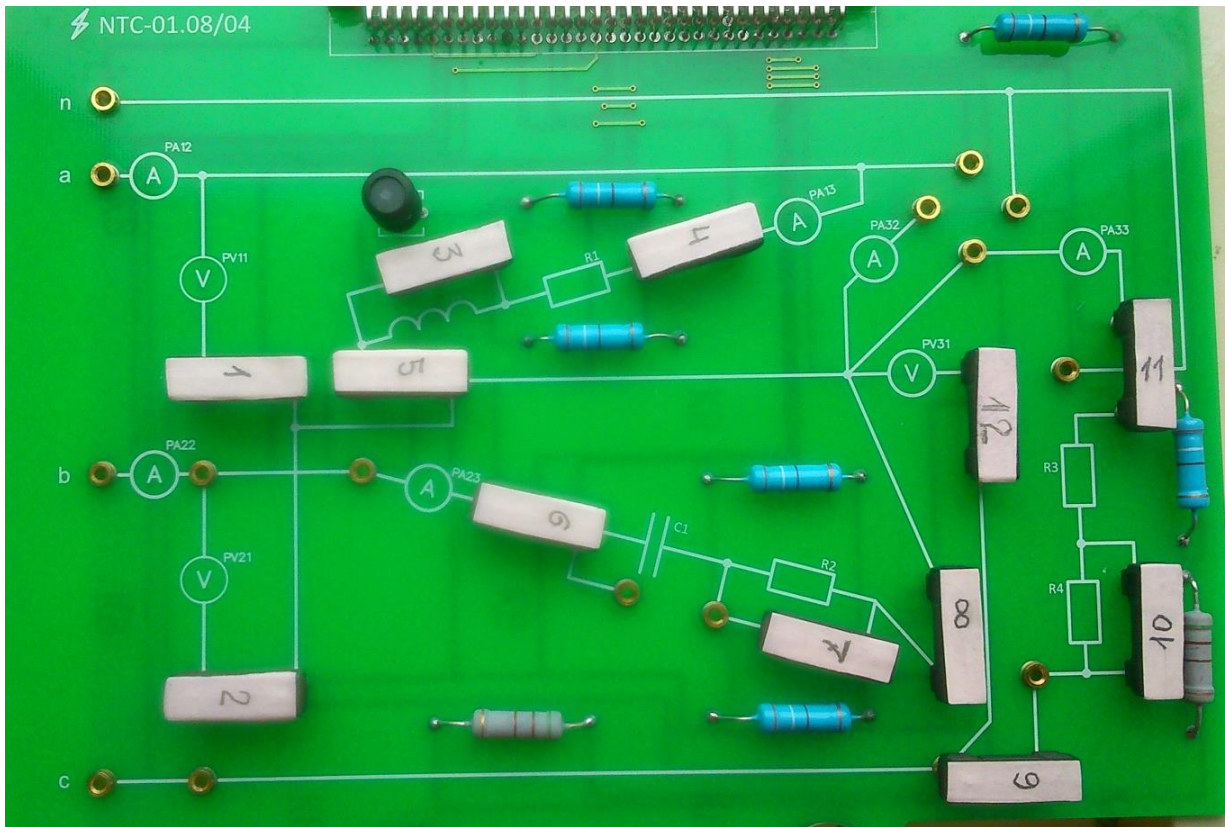


Фото 7.3

Режим обрыва фазы устанавливается в фазе с) удалением перемычки (9) (фото 7.4).

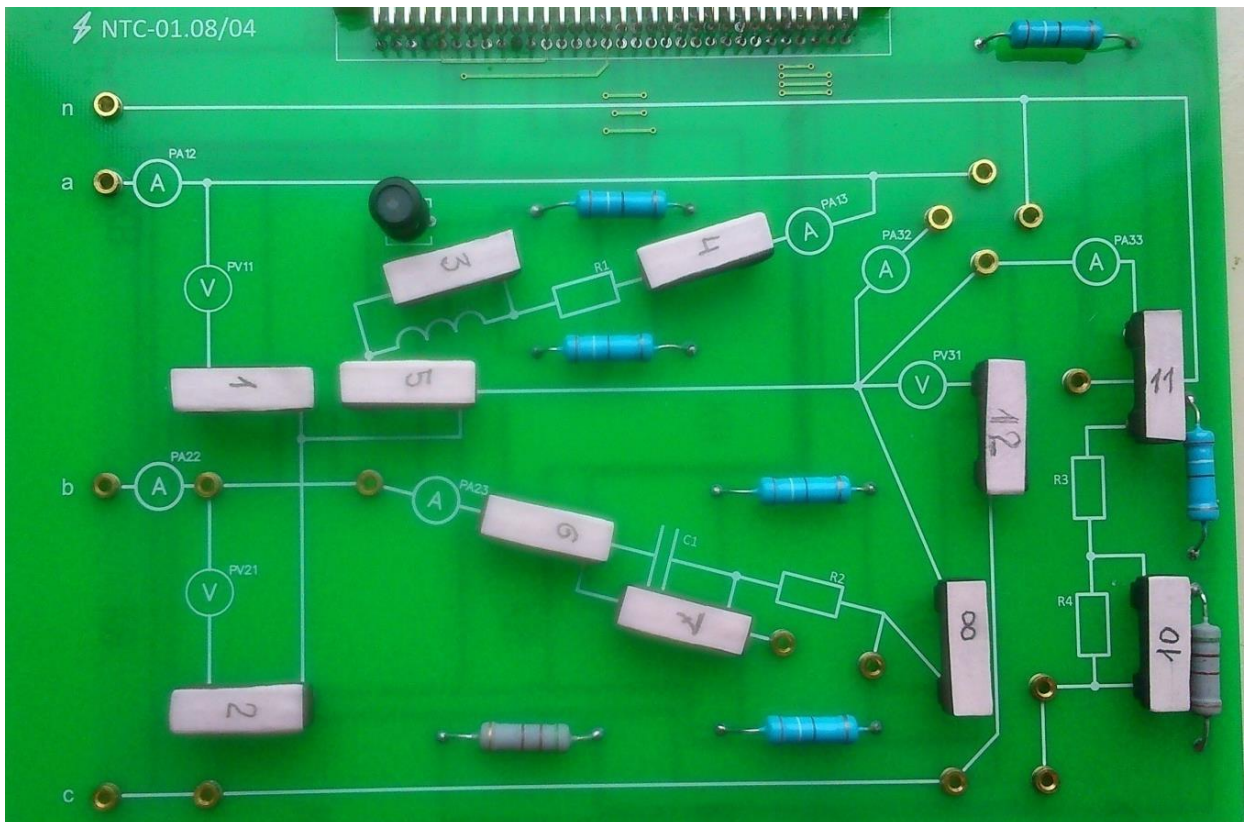


Фото 7.4

2. Исследовать влияние нагрузки и нейтрального провода на параметры трёхфазной цепи при соединении фаз генератора и нагрузки по схеме «звезда – звезда».

По схеме рис. 7.2 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/04 в соответствии с фото 7.5. Параметры элементов аналогичны цепи без нейтрального провода в п.1 задания.

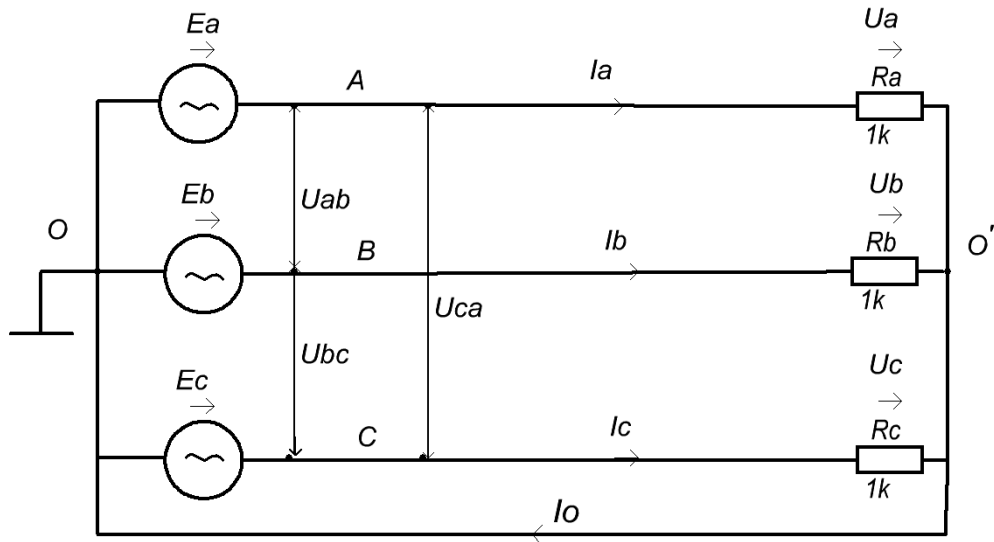


Рисунок 7.2 – Схема 3-фазной цепи «звезда – звезда» с нейтральным проводом

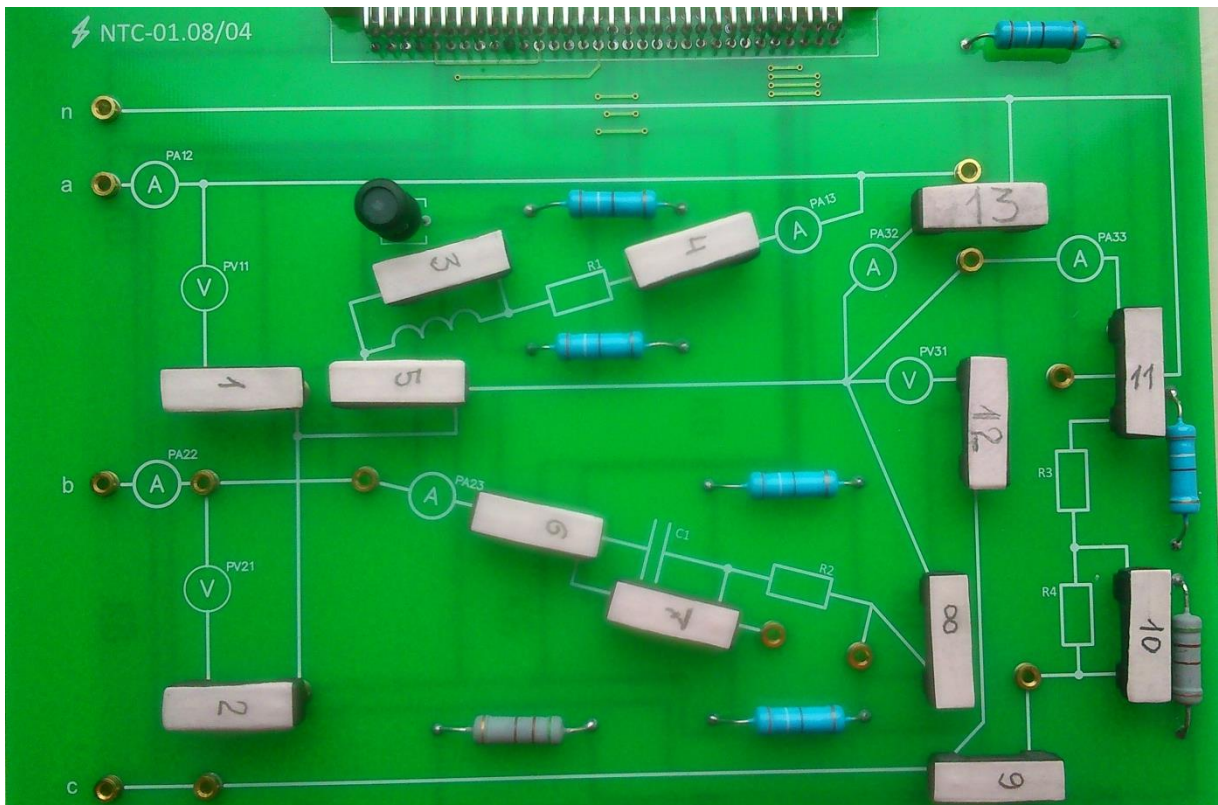


Фото 7.5

Измерьте линейные напряжения U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} с помощью мультиметра, а фазные напряжения и токи в цепи с нулевым проводом для симметричного режима – по показаниям приборов. Результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 7.2 – «Звезда – звезда» с нейтральным проводом

Режим работы	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_a PV11	U_b PV21	U_c PV31	I_a PA13	I_b PA23	I_c PA32
Симметричный режим нагрузки									
Несимметричный режим									
Реактивная нагрузка фазы									
Обрыв фазы									

Режимы несимметричной, реактивной нагрузок и обрыв фазы устанавливаются аналогично п.1 задания.

Теоретические сведения:

Под *трехфазной целью (системой)* понимают совокупность трехфазного источника (генератора), нагрузки и соединительных проводов.

При вращении проводника в равномерном магнитном поле в нем наводится ЭДС

$$e = E_m \sin(\omega t + \alpha). \quad (7.1)$$

Закрепим жестко на одной оси три одинаковые катушки (обмотки), смещенные относительно друг друга в пространстве на $\frac{2\pi}{3}$ (120°) и начнем их вращать в равномерном магнитном поле с угловой скоростью ω (рис. 7.3).

При этом в катушке А будет наводиться

$$e_A = E_m \sin(\omega t). \quad (7.2)$$

Такие же значения ЭДС возникнут в катушках В и С, но соответственно через 120° и 240° после начала вращения, т. е.

$$\begin{aligned} e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (7.3)$$

Совокупность трех катушек (обмоток), вращающихся на одной оси с угловой скоростью ω , в которых наводятся ЭДС, равные по модулю и сдвинутые друг от друга на угол 120° , называют *симметричным трехфазным генератором*. Каждая катушка генератора – это *фаза генератора*. В генераторе на рис. 7.3 фаза В «следует» за фазой А, фаза С – за фазой В, как показано на рис. 7.4.

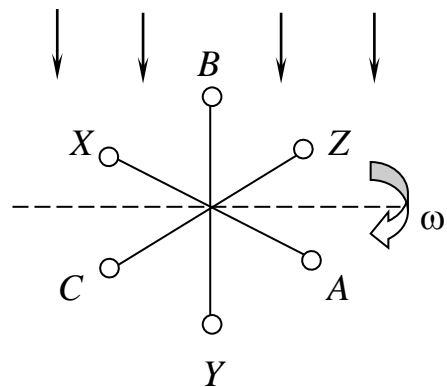


Рисунок 7.3

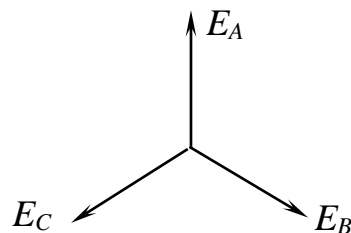


Рисунок 7.4

Перейдем от мгновенных значений ЭДС к их комплексам:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t) \rightarrow \dot{E}_A, \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \rightarrow \dot{E}_B = \dot{E}_A e^{-j120^\circ}, \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 240^\circ) \rightarrow \dot{E}_C = \dot{E}_A e^{-j240^\circ}, \end{aligned} \quad (7.4)$$

Сумме мгновенных ЭДС соответствует сумма комплексов этих ЭДС.

$$e_A + e_B + e_C \rightarrow \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = \dot{E}_A = 0. \quad (7.5)$$

График изменения мгновенных значений ЭДС при $\psi = 90^\circ$ представлен на рис. 7.5. В каждое мгновение алгебраическая сумма ЭДС равна нулю.

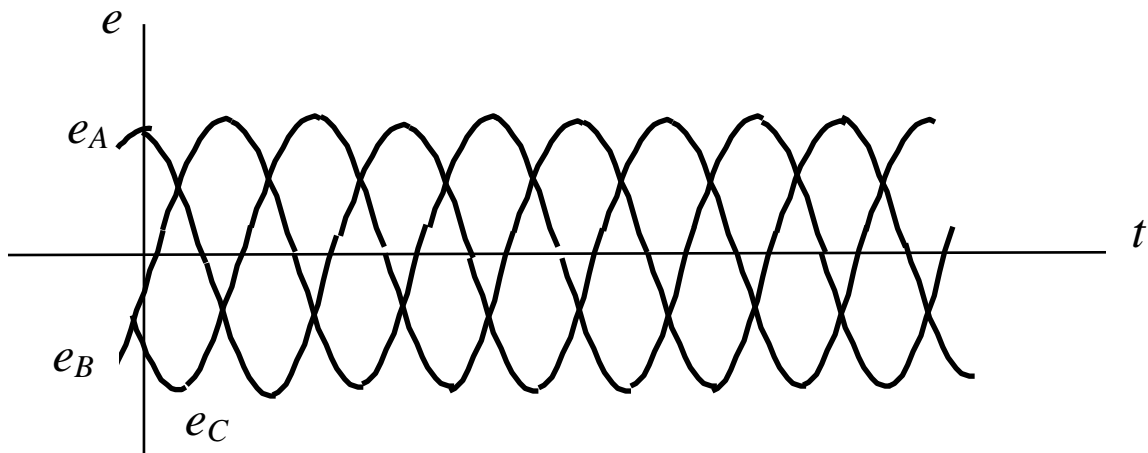


Рисунок 7.5

Крайним точкам катушек (обмоток) дают название *конец* и *начало*. Начала катушек обозначают *A, B, C*, концы соответственно *X, Y, Z* (рис. 7.6, а).

Фазные обмотки трехфазного генератора могут быть изображены в виде источников ЭДС $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ (рис. 7.6, б).

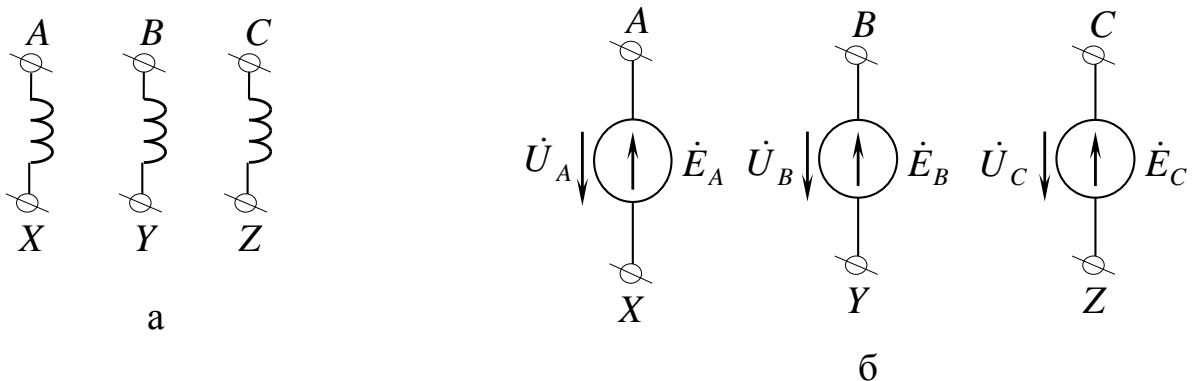


Рисунок 7.6

Соединения в звезду и треугольник, фазные и линейные величины.

В трехфазных цепях применяют два вида соединений генераторных обмоток – в звезду и треугольник (рис. 7.7).

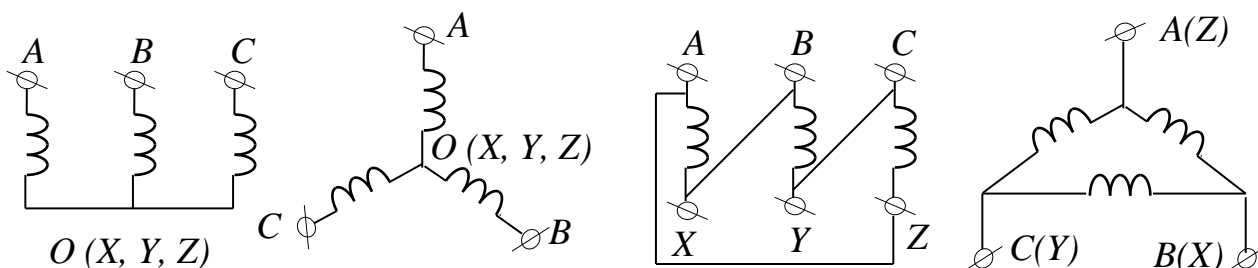


Рисунок 7.7

При соединении в звезду все концы фазных обмоток соединяют в один узел, называемый *нейтральной* или *нулевой точкой*, и обозначают, как правило, буквой *O*. При соединении в треугольник обмотки генератора соединяют так, чтобы начало одной соединялось с концом другой. ЭДС в катушках в этом случае обозначают соответственно \dot{E}_{BA} , \dot{E}_{CB} , \dot{E}_{AC} . Если генератор не подключен к нагрузке, то по его обмоткам не протекают токи, т.к. сумма ЭДС равна нулю.

В звезду и треугольник включают и сопротивления нагрузки так, как показано на рис. 7.8.

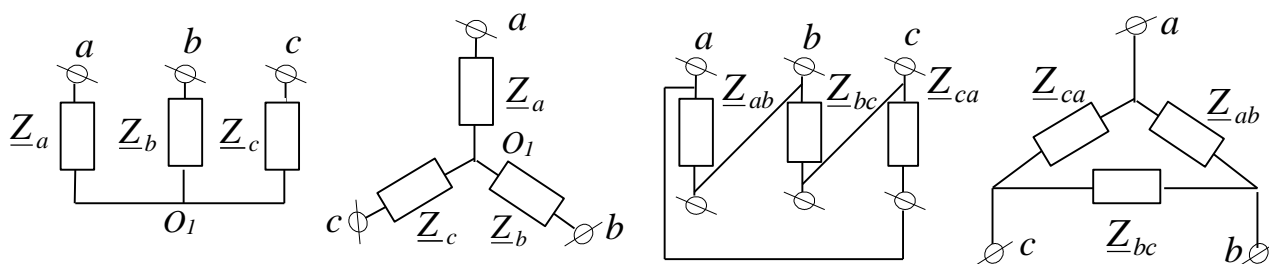


Рисунок 7.8

Фазные сопротивления $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c, \underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$, соединенные в треугольник или в звезду, называют *фазами нагрузки*.

Соединительные провода между началами фаз нагрузки и началами фаз генератора называют *линейными проводами*. Провод, соединяющий нулевые точки генератора и нагрузки, называют *нулевым* или *нейтральным проводом*.

Направление токов в линейных проводах принято выбирать от генератора к нагрузке, а в нулевом – от нагрузки к генератору. На рис.7.9 $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}, \dot{U}_{ca}, \dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ – *линейные* напряжения и токи, $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ – *фазные* напряжения.

Линейные напряжения (напряжения между линейными проводами) – это разность соответствующих фазных напряжений

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b, \quad \dot{U}_{bc} = \dot{U}_b - \dot{U}_c, \quad \dot{U}_{ca} = \dot{U}_c - \dot{U}_a. \quad (7.6)$$

Таким образом, фазные напряжения генератора – это напряжения на выходе обмоток генератора $\dot{U}_{AO}, \dot{U}_{BO}, \dot{U}_{CO}$, а напряжения фаз нагрузки – это напряжения на соот-

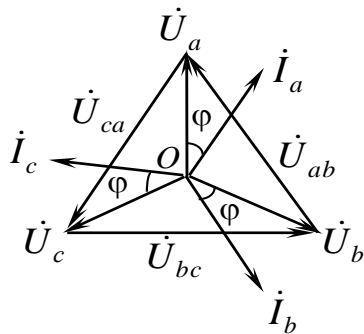


Рисунок 7.9

ветствующих сопротивлений $\dot{U}_{aO_1}, \dot{U}_{bO_1}, \dot{U}_{cO_1}$. Фазные токи – это токи, протекающие в фазах генератора или нагрузки.

Совокупность соответствующей фазы генератора, соединительного провода и фазы нагрузки называют *фазой трехфазной цепи*. (Не путать с начальной фазой гармонической функции).

Выражение фазных напряжений трехфазной системы звезда – звезда без нейтрального провода через линейное напряжение

В схеме на рис. 7.1 в общем случае $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$. Токи в фазах определяются из соотношений

$$\dot{I}_a = \underline{Y}_a \dot{U}_a; \quad \dot{I}_b = \underline{Y}_b \dot{U}_b; \quad \dot{I}_c = \underline{Y}_c \dot{U}_c. \quad (7.7)$$

По первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \underline{Y}_a \dot{U}_a + \underline{Y}_b \dot{U}_b + \underline{Y}_c \dot{U}_c = 0. \quad (7.8)$$

$$\dot{U}_a = \frac{\underline{Y}_b \dot{U}_{ab} - \underline{Y}_c \dot{U}_{ca}}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}$$

(7.9)

$$\dot{U}_b = \frac{\underline{Y}_c \dot{U}_{bc} - \underline{Y}_a \dot{U}_{ab}}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}, \quad \dot{U}_c = \frac{\underline{Y}_a \dot{U}_{ca} - \underline{Y}_b \dot{U}_{bc}}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}.$$

Содержание отчёта

Отчёт о выполнении лабораторной работы должен содержать:

- а) цель работы;
- б) задание и результаты исследований цепи без нейтрального провода, включающие схему цепи, а так же:
 - таблицу результатов измерений напряжений и токов в различных режимах;
 - расчёт фазных напряжений по формулам (13) с использованием программ расчётов с комплексными переменными;
 - выводы о влиянии режима нагрузки на фазные напряжения с числовым обоснованием;
- в) задание и результаты исследований цепи с нейтральным проводом, включающие:
 - схемы цепи в четырёх режимах;
 - таблицу результатов измерений напряжений и токов в различных режимах;
 - выводы о влиянии режима нагрузки на фазные напряжения с числовым обоснованием;
 - выводы о роли нейтрального провода в трёхфазных цепях.

Лабораторная работа № 8

Исследование переходных процессов в цепях первого порядка

Цель работы: изучить переходные процессы в цепях первого порядка с генератором прямоугольных импульсов.

Задание на выполнение работы:

1. Определение характеристик переходных процессов по кривой напряжения на резисторе в RL цепи.

По схеме на рис. 8.1 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/05 в соответствии с фото 8.1.

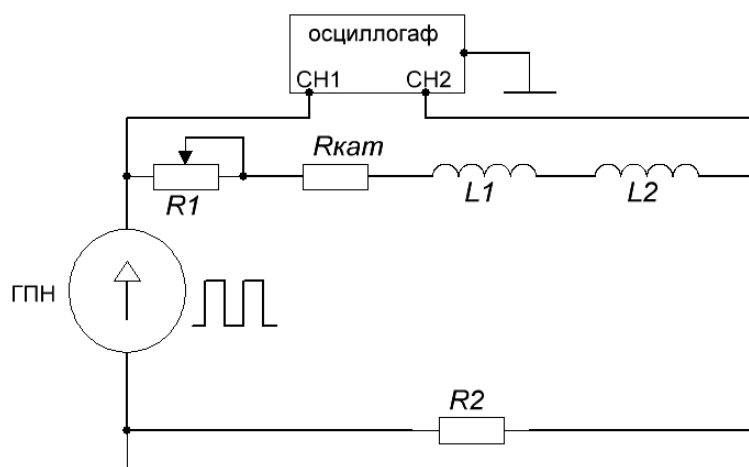


Рисунок 8.1

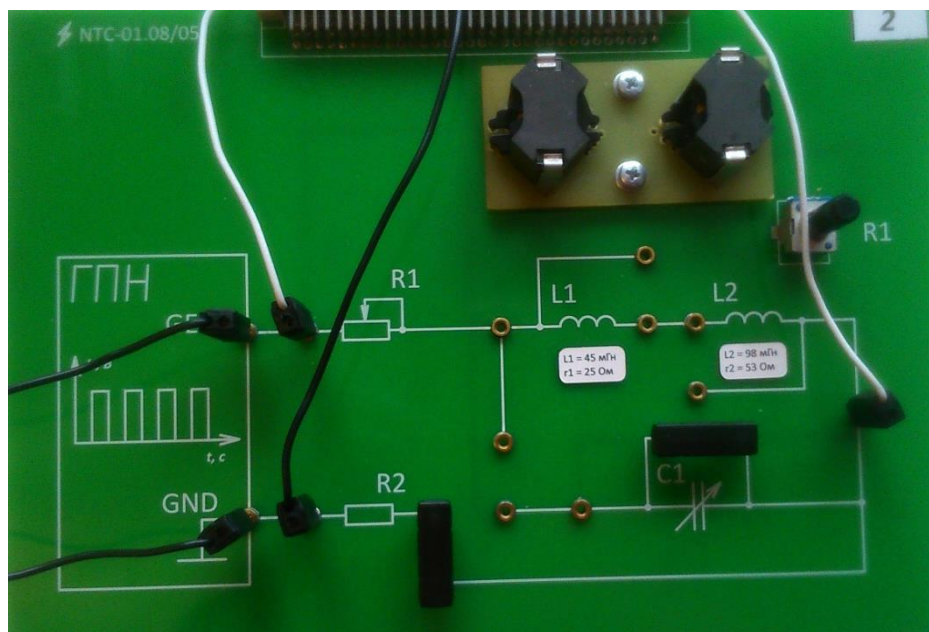


Фото 8.1

На фото провода слева – от генератора, провода вверху слева направо – канал CH1, общий и канал CH2 осциллографа.

Параметры цепи: частота генератора прямоугольных импульсов 50 Гц;
 $R_1=0$ Ом, движок потенциометра повернут до упора вправо; $R_2=27$ Ом; индуктивности по номерам плат $L_{11}=56$, $L_{21}=106$, $L_{12}=45$, $L_{22}=98$, $L_{13}=64$, $L_{23}=36$, $L_{14}=45$, $L_{24}=35$, $L_{15}=99$, $L_{25}=32$, $L_{16}=87$, $L_{26}=31$ мГн;
 где в L_{ij} i – номер катушки, j – номер платы;
 сопротивления катушек индуктивности $R_{кат}$ по номерам плат
 $R_{к11}=25$, $R_{к21}=43$, $R_{к12}=25$, $R_{к22}=53$, $R_{к13}=27$, $R_{к23}=36$, $R_{к14}=33$, $R_{к124}=35$, $R_{к15}=41$,
 $R_{к25}=32$, $R_{к16}=39$, $R_{к26}=31$ Ом; где в R_{kij} i – номер катушки,
 j – номер платы.
 Настройки генератора на фото 8.2



Фото 8.2

Включить питание стенда и осциллографа, после появления осциллограммы настроить развёртки по амплитуде и времени. Настройки развёрток осциллографа на фото 8.3



Фото 8.3

При появлении на дисплее осциллограммы синусоид канала CH1 и CH2 вставить в гнездо осциллографа USB-флешку и войти в режим записи осциллограммы в формате BMP в соответствии с меню.

Storage	Меню	Установки	Комментарии
Storage	Storage	Waveform	Сохранить или вызвать осциллограмму.
Storage		Setup	Сохранить или вызвать настройки прибора.
Waveform		8-Bitmap	Создать или удалить файл формата bmp 8 бит.
Internal		24-Bitmap	Создать или удалить файл формата bmp 24 бита.
External		PNG	Создать или удалить файл формата PNG.
		CSV	Создать или удалить файл формата CSV
Disk Mana.		Factory	Восстановить заводские установки
	Internal		Войти в меню операций с внутренней памятью (см. Таблицу 2-22)
	External		Войти в меню операций с внешней памятью (см. Таблицу 2-23)
	Disk Mana.		Войти в меню управления диском (см. Таблицу 2-24)

Зашунтировать перемычкой катушку L2. Получить и записать осциллограмму переходного процесса. Удалить перемычку, подключить L2.

Повернуть движок потенциометра R1 до упора влево, установив $R1 = 1,065 \text{ кОм}$. Получить и записать осциллограмму переходного процесса для цепи с индуктивностью в соответствии с фото 8.4.

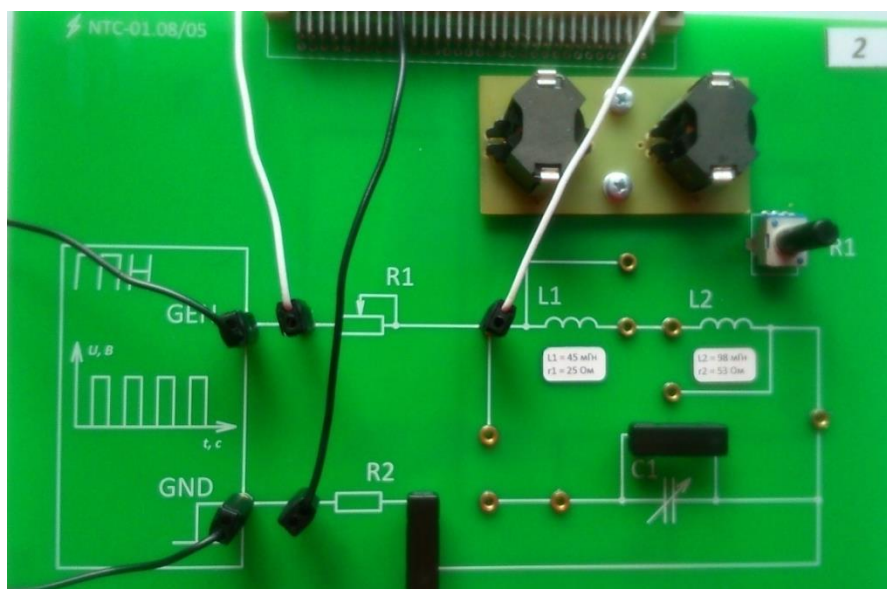


Фото 8.4

2. Определение характеристик переходного процесса по кривой напряжения на резисторе в RC цепи.

По схеме рис. 8.2 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/05 в соответствии с фото 8.5.

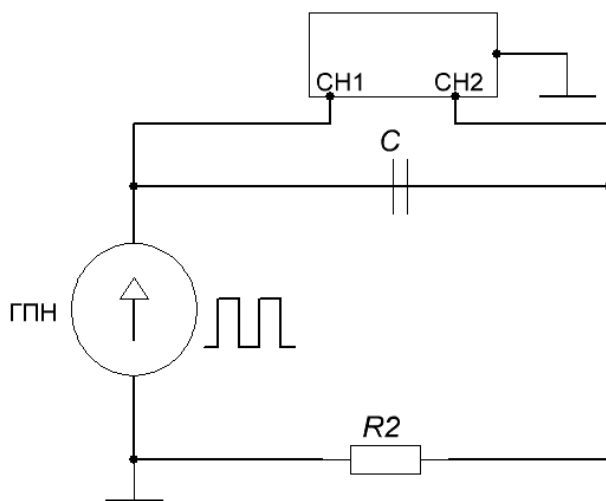


Рисунок 8.2

Ёмкость конденсатора $C = N$ мкФ, где N – номер бригады.

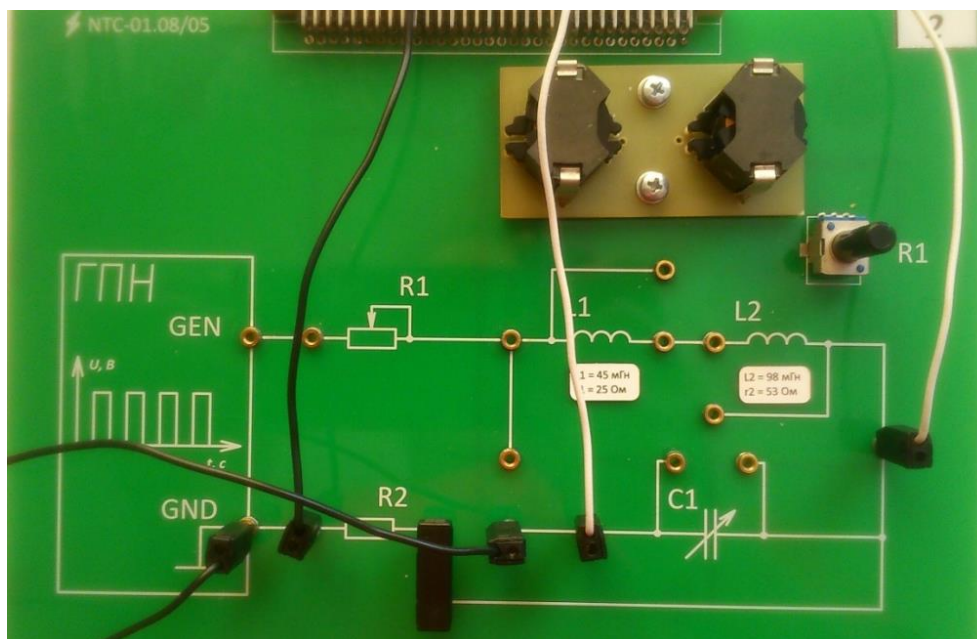


Фото 8.5

На фото провода слева – от генератора, провода сверху слева направо – общий, канал CH1 и канал CH2 осциллографа.

Включить питание стенда и осциллографа, записать осциллограмму на флешку.

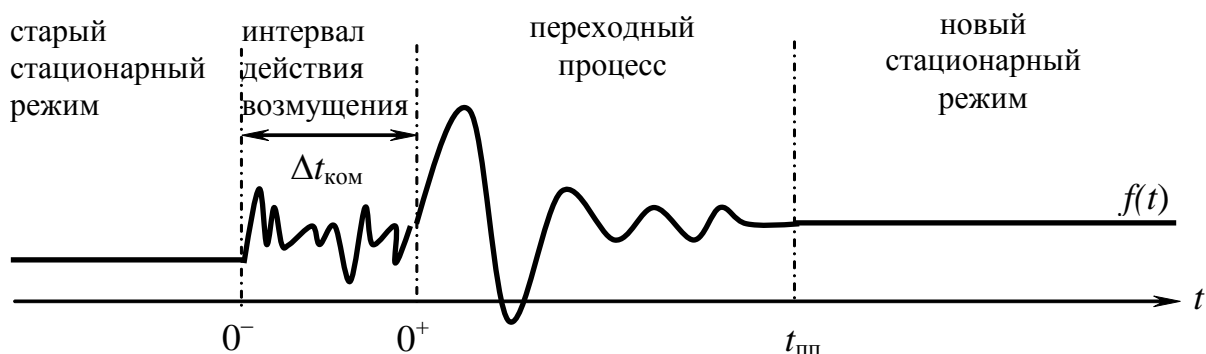
Теоретические сведения

Говоря о работе электрической цепи, следует различать *установившиеся* или *стационарные* режимы и *переходные* или *динамические* режимы. Установившееся или стационарное состояние электрической цепи характеризуется вполне определённой карти-

ной распределения токов, напряжений и электромагнитной энергии между элементами. Стационарные режимы в электрических цепях могут нарушаться в результате действия так называемых *возмущений*. Происходящие при этом изменения структуры цепи называют *коммутацией*.

Режим коммутации можно имитировать подачей прямоугольных импульсов от генератора. При этом моменты скачкообразного изменения напряжения генератора от нуля до U_{\max} и от U_{\max} до нуля соответствуют коммутации источника напряжения в цепь.

В результате коммутации образуется новая цепь, которую по истечении некоторого промежутка времени можно будет рассматривать так же как стационарную, характеризующуюся другим распределением токов, напряжений и электромагнитной энергии, нежели в исходной цепи. Переход из одного стационарного состояния в другое происходит не мгновенно, а с течением времени, что обусловлено наличием в цепи накопителей энергии (индуктивностей катушек и ёмкостей конденсаторов). Магнитная энергия катушек и электрическая энергия конденсаторов скачком измениться не могут. Процессы, сопровождающие этот переход, называются *переходными*.



Строго говоря, цепь снова приобретает характер стационарной через неограниченно большое время, после действия возмущения ($t \rightarrow \infty$). Однако с достаточной для практических цепей степенью точности можно считать, что стационарное состояние наступает через некоторое конечное время, называемое *временем переходного процесса* ($t_{пп}$). Значение исследуемой функции (тока или напряжения) $f(t)$ не всегда одинаково в начале и в конце интервала возмущения. При устремлении этого интервала к 0 функция $f(t)$ может изменяться скачкообразно. Таким образом, её значение до и после (или как принято определять в математике — слева и справа) момента возмущения t_0 могут не совпадать. Это влечёт за собой необходимость различать моменты 0^+ и 0^- .

Из законов физики следуют *правила сохранения*, называемые также *законами коммутации*, исключающие возможность скачкообразного изменения напряжения на ёмкости и тока в индуктивности в момент возмущения:

$$u_C(0^-) = u_C(0^+),$$

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

Начальные значения величин, сохраняющиеся неизменными в момент времени $t = 0$, называются *независимыми начальными условиями*. Таковыми являются токи индуктивностей и напряжения на ёмкостях, подчиняющиеся правилам коммутации. Токи и напря-

жения сопротивлений, токи ёмкостей и напряжения на индуктивностях в момент коммутации могут изменяться скачком.

Классический метод расчета переходных процессов основан на составлении и последующем решении (интегрировании) дифференциальных уравнений, составленных по законам Кирхгофа и связывающих искомые токи и напряжения послекоммутационной цепи и заданные воздействующие источники электрической энергии.

Решение находится в виде суммы частного решения неоднородного дифференциального уравнения и общего решения однородного дифференциального уравнения:

$$x(t) = x_{\text{пр}}(t) + x_{\text{св}}(t).$$

Свободную составляющую $x_{\text{св}}(t)$ переходного процесса ищут в виде

$$x_{\text{св}} = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t},$$

где n – порядок цепи, совпадающий с порядком дифференциального уравнения;

p_k – корни характеристического уравнения (собственные числа цепи);

A_k – постоянные интегрирования.

В искомом решении $x(t) = x_{\text{пр}} + \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}$ надо уметь определять величины $x_{\text{пр}}(t)$,

n , p_k , A_k , где $x_{\text{пр}}(t)$ – принуждённая составляющая, n – порядок цепи, p_k – корни характеристического уравнения, A_k – постоянные интегрирования.

Подключение RL-цепи к источнику постоянного напряжения

1. Запишем правило коммутации для цепи на рис. 8.3

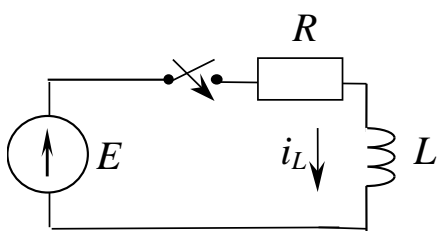


Рисунок 8.3

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

2. Получим дифференциальное уравнение цепи

$$Ri_L + u_L = E,$$

$$Ri_L + Li'_L = E,$$

характеристическое уравнение

$$Lp + R = 0.$$

Корень характеристического уравнения и постоянная времени соответственно

соответственно

$$p = -\frac{R}{L}, \quad \tau = \frac{L}{R}.$$

Время переходного процесса можно оценить $t_{\text{пр}} = 3 \tau$.

3. Полное решение имеет вид:

$$i_L(t) = i_{L\text{пр}} + i_{L\text{св}} = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

4. Подставив в $i_L(t)$ $t = 0^+$, на основании правила коммутации определим постоянную интегрирования

$$A = -\frac{E}{R}.$$

Таким образом,

$$i_L(t) = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right).$$

Напряжение на индуктивности

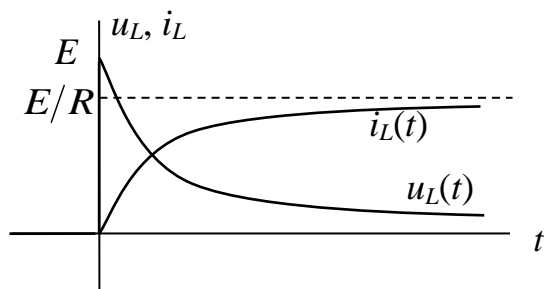


Рисунок 8.4

$$u_L(t) = Li'_L = L \left(-\frac{E}{R} \right) \left(-\frac{R}{L} \right) e^{-\frac{R}{L}t} = E e^{-\frac{R}{L}t}. \text{ Графики изменения } u_L(t), i_L(t) \text{ приведены}$$

на рис. 8.4.

Подключение RC-цепи к источнику постоянного напряжения

1. Запишем правило коммутации для цепи на рис. 8.5 $u_C(0^-) = u_C(0^+) = 0$.

2. Получим дифференциальное уравнение цепи

$$u_R + u_C = E,$$

$$i_C R + u_C = E, \quad i_C = C \frac{du_C}{dt},$$

$$Cu'_C R + u_C = E.$$

Характеристическое уравнение цепи

$$pCR + 1 = 0,$$

корень которого

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

Постоянная времени $\tau = \frac{1}{|p|} = RC$. Время переходного процесса можно оценить

$$t_{\text{пр}} = 3 \tau.$$

3. Запишем полное решение

$$u_C(t) = u_{C\text{пр}} + u_{C\text{св}} = E + A e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

4. Подставив в полное решение $t = 0^+$, определим постоянную интегрирования на основании правил коммутации $A = -E$.

Таким образом, окончательный результат имеет вид

$$u_C(t) = E \left(1 - e^{-\frac{1}{RC}t} \right).$$

Ток в цепи

$$i_C(t) = Cu'_C = -E \left(-\frac{1}{RC} \right) C e^{-\frac{1}{RC}t} = \frac{E}{R} e^{-\frac{1}{RC}t}.$$

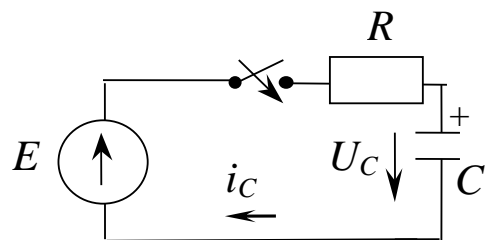


Рисунок 8.5

Графики изменения $u_C(t)$ и $i_C(t)$ представлены на рис.8.6.

Значение тока, содержащее лишь свободную составляющую, максимально в начальный момент времени, когда оно скачком достигает значение E/R , и все напряжение источника приложено к резистору. По мере зарядки конденсатора напряжение на нем повышается, что ведет к соответственному уменьшению тока в цепи.

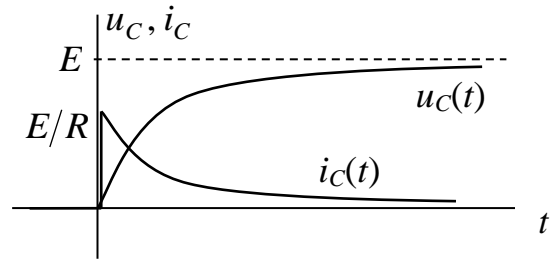


Рисунок 8.6

Содержание отчёта

Отчёт о выполнении лабораторной работы должен содержать:

а) цель работы;

б) схему первой цепи с индуктивностями, значения параметров элементов цепи, распечатку осциллограммы, теоретический расчёт параметров кривой переходного процесса для переходного процесса в цепи с индуктивностью по значениям параметров элементов электрической цепи, оценку времени переходного процесса и принуждённого значения по осциллограмме и сравнение с теоретическим расчётом;

в) расчёты и построения аналогично п. б) для двух других цепей с индуктивностью и цепи с конденсатором;

г) выводы о погрешностях в оценке параметров.

Лабораторная работа № 9

Исследование переходных процессов в цепях второго порядка

Цель работы: изучить переходные процессы в RLC – цепи с генератором прямоугольных импульсов.

Задание на выполнение работы:

изучение переходных процессов по кривой напряжения на конденсаторе в RLC цепи.

По схеме на рис. 9.1 собрать цепь на монтажной плате NTC – 01.8/05 в соответствии с фото 9.1.

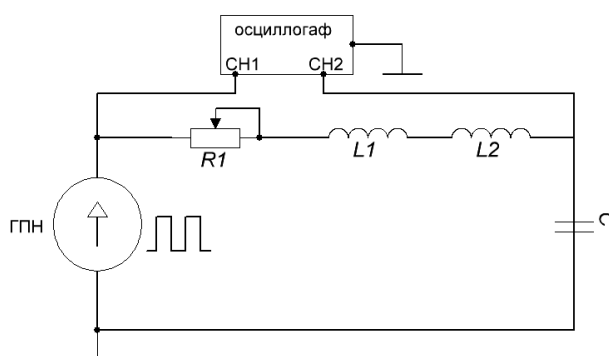


Рисунок 9.1

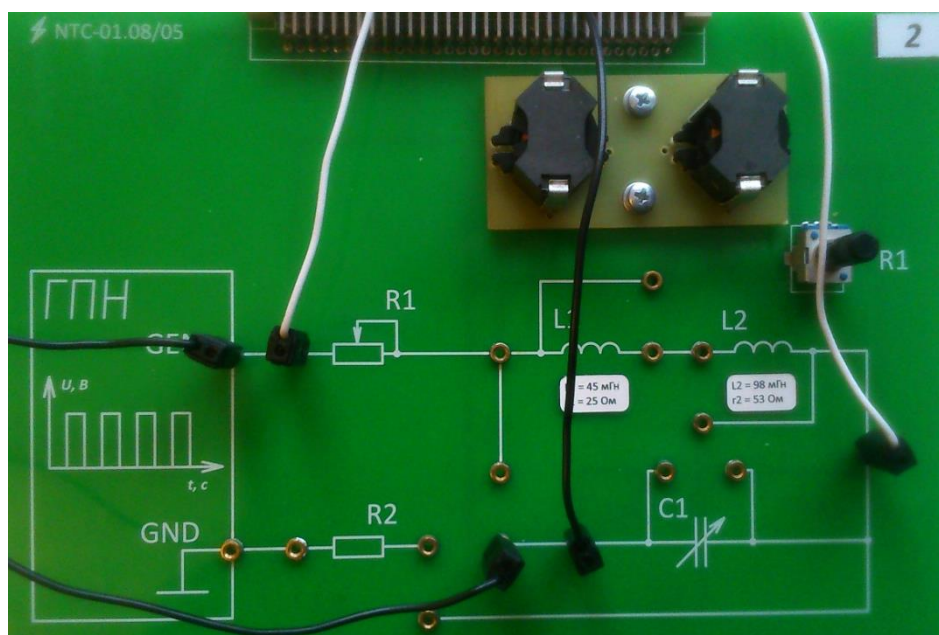


Фото 9.1

На фото 9.1 провода слева – от генератора, провода сверху слева направо – канал CH1, общий и канал CH2 осциллографа.

Параметры цепи: частота генератора прямоугольных импульсов 50 Гц;

$R1 = R_{\text{кат}}$ (по номеру платы), движок потенциометра повернут до упора вправо; $C = 1$ мкФ; индуктивности по номерам плат $L_{11} = 56$, $L_{21} = 106$,

$L_{12} = 45, L_{22} = 98, L_{13} = 64, L_{23} = 36, L_{14} = 45, L_{24} = 35, L_{15} = 99, L_{25} = 32, L_{16} = 87, L_{26} = 31$ мГн;
 где в L_{ij} i – номер катушки, j – номер платы;
 сопротивления катушек индуктивности по номерам плат
 $R_{к11} = 25, R_{к21} = 43, R_{к12} = 25, R_{к22} = 53, R_{к13} = 27, R_{к23} = 36, R_{к14} = 33, R_{к124} = 35, R_{к15} = 41,$
 $R_{к25} = 32, R_{к16} = 39, R_{к26} = 31$ Ом; где в $R_{кij}$ i – номер катушки,
 j – номер платы.

Настройки генератора на фото 9.2



Фото 9.2

Включить питание стенда и осциллографа, после появления осциллограммы настроить развёртки по амплитуде и времени .

Настройки развёрток осциллографа на фото 9.3



Фото 9.3

При появлении на дисплее осциллограммы синусоид канала CH1 и CH2 вставить в гнездо осциллографа USB-флешку и войти в режим записи осциллограммы в формате BMP в соответствии с меню.

Storage
Storage
Waveform
Internal
External
Disk Mana.

Меню	Установки	Комментарии
Storage	Waveform	Сохранить или вызвать осциллограмму.
	Setup	Сохранить или вызвать настройки прибора.
	8-Bitmap	Создать или удалить файл формата bmp 8 бит.
	24-Bitmap	Создать или удалить файл формата bmp 24 бита.
	PNG	Создать или удалить файл формата PNG.
	CSV	Создать или удалить файл формата CSV
	Factory	Восстановить заводские установки
Internal		Войти в меню операций с внутренней памятью (см. Таблицу 2-22)
External		Войти в меню операций с внешней памятью (см. Таблицу 2-23)
Disk Mana.		Войти в меню управления диском (см. Таблицу 2-24)

Вращая движок потенциометра R1 влево, уменьшить колебательность переходного процесса на половину амплитуды колебаний. Записать осциллограмму переходного процесса. Отсоединив провод генератора, измерить сопротивление R1.

Повернуть движок потенциометра R1 до упора влево, установив $R1 = 1,06 \text{ кОм} + R_{\text{кат}}$. Получить и записать осциллограмму переходного процесса для этой цепи.

Теоретические сведения

Включение контура из конденсатора, резистора, катушки на постоянное напряжение

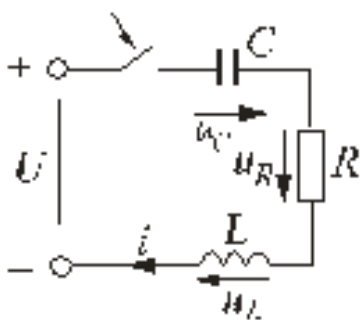


Рисунок 9.2

Рассмотрим электромагнитные процессы, возникающие после замыкания ключа в цепи, изображенной на рис. 9.2, в предположении, что конденсатор был предварительно не заряжен, т. е. $u_C(0_-) = 0$.

Составление характеристического уравнения. Определение собственных частот цепи.

По второму закону Кирхгофа ($t \geq 0$)

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

Учитывая, что $i = C \frac{du_C}{dt}$, получаем дифференциальное уравнение второго порядка

для свободной составляющей напряжения

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = 0.$$

Характеристическое уравнение при этом имеет вид

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0.$$

Характер электромагнитных процессов в контуре зависит от соотношения параметров R, L, C , входящих в выражение для корней характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

В зависимости от знака подкоренного выражения корни могут быть вещественными или комплексно-сопряженными. Они определяют характер свободных составляющих переходных токов и напряжений.

Колебательный процесс

Включение рассматриваемого контура на постоянное напряжение может сопровождаться колебательным переходным процессом. При соотношении параметров контура из конденсатора, катушки и резистора $R < R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$, где $R_{кр}$ – критическое сопротивление цепи, корни характеристического уравнения комплексные сопряженные:

$$p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega,$$

где $\alpha = R / (2L)$ – коэффициент затухания свободной составляющей;

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = 2\pi/T_0 \text{ – угловая частота собственных колебаний контура;}$$

T_0 – период собственных колебаний.

Поскольку $\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то можно ввести обозначения

$$\sin \psi = \frac{\omega_0}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} = \omega_0 \sqrt{LC}, \quad \cos \psi = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} = \alpha \sqrt{LC}, \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{\omega_0}{\alpha}.$$

Свободная составляющая переходного напряжения при комплексно-сопряженных корнях

$$u_{св} = A e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi),$$

$$u_C = U - \frac{U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi);$$

$$i = \frac{U}{\omega_0 L} e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t;$$

$$u_L = \frac{U}{\omega_0 \sqrt{LC}} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t - \psi).$$

Зависимости напряжения u_C и тока i в переходном процессе показаны на рис. 9.3.

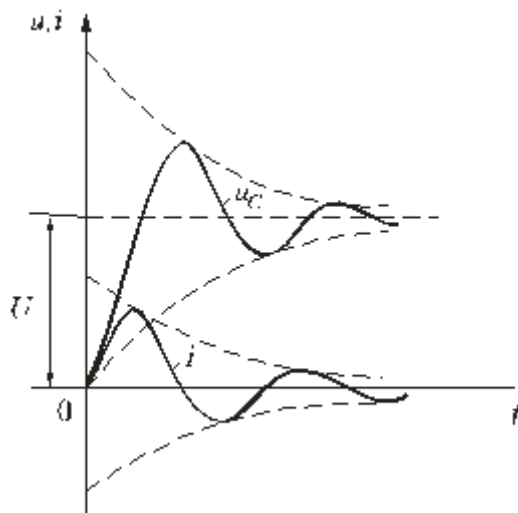


Рисунок 9.3

Они представляют собой затухающие синусоиды. Скорость затухания колебаний оценивают декрементом колебаний. Декремент колебания – это постоянная, зависящая от параметров R, L, C и равная отношению амплитуд переходных параметров, отстающих друг от друга на период колебания T_0 , например:

$$\Delta = \frac{u_C(t)}{u_C(t+T_0)} = \frac{U_{Cm} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \psi)}{U_{Cm} e^{-\alpha(t+T_0)} \sin[\omega_0(t+T_0) + \psi]} = e^{\alpha T_0}.$$

Часто пользуются логарифмическим декрементом затухания

$$\nu = \ln \Delta = \ln \frac{u_C(t)}{u_C(t+T_0)} = \alpha T_0.$$

Апериодический процесс

Характеристическое уравнение имеет два вещественных корня. Установившаяся составляющая тока равна нулю. Установившееся напряжение на конденсаторе $u_{Cy} = U$. Следовательно, начальное значение свободной составляющей напряжения на конденсаторе $u_{Cсв}(0_+) = u_C(0_+) - u_{Cy}(0_-)$.

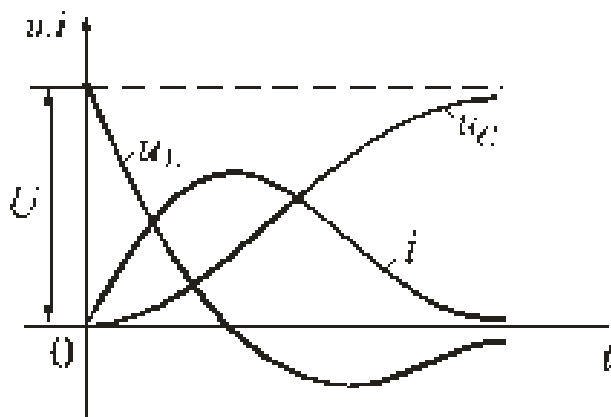


Рисунок 9.4

Если $u_{Cсв}(0_+) = -U$, то переходное напряжение на конденсаторе, ток и напряжение на катушке определяются по формулам:

$$u_C = U + \frac{U}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t});$$

$$i = \frac{U}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); u_L = \frac{U}{p_1 - p_2} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}).$$

Кривые $u_C(t)$, $u_L(t)$ и $i(t)$ приведены на рис. 9.4.

Содержание отчёта:

Отчёт о выполнении лабораторной работы должен содержать:

- а) цель работы;
- б) схему цепи, значения параметров элементов цепи, распечатку осциллограммы, теоретический расчёт параметров кривой переходного процесса по значениям параметров элементов электрической цепи, оценку характеристик переходного процесса по осциллограмме и сравнение с теоретическим расчётом;
- в) расчёты и построения аналогично п. б) для двух других цепей с различными значениями сопротивления резистора;
- г) выводы о погрешностях в оценке параметров.

Учебное издание

Составители:

*Прокопеня Олег Николаевич
Ярошевич Анатолий Васильевич*

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам
по теории электрических цепей

для студентов технических специальностей

Ответственный за выпуск: Прокопеня О.Н.

Редактор: Боровикова Е.А.

Компьютерная вёрстка: Соколюк А.П.

Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 21.01.2019 г. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Arial Narrow». Усл. печ. л. 4,19. Уч. изд. л. 4,50. Заказ № 1631. Тираж 21 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.