

В. П. Иваненко, К. К. Ершов, О. А. Кундюков

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА
Выполнение лабораторных работ

Часть 1

Санкт-Петербург
2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Выполнение лабораторных работ

Часть 1

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлениям подготовки:

- 13.03.01 — Теплоэнергетика и теплотехника
- 15.03.02 — Технологические машины и оборудование
- 15.03.04 — Автоматизация технологических процессов
и производств
- 18.03.01 — Химическая технология
- 18.03.02 — Энерго- и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии
и биотехнологии
- 27.03.04 — Управление в технических системах
- 29.03.03 — Технология полиграфического
и упаковочного производства

Составители:
В. П. Иваненко
К. К. Ершов
О. А. Кундюков

Санкт-Петербург
2022

Утверждено
на заседании кафедры АЭиЭ
30.11.2021 г., протокол № 6

Рецензент Н. С. Благодарный

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплин «Электротехника и промышленная электроника», «Электротехника и промышленная электроника в области охраны окружающей среды» и «Электротехника и электроника» по направлениям подготовки: 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Промышленная теплоэнергетика», 15.03.02 – Технологические машины и оборудование, профиль «Машины и аппараты комплексной переработки возобновляемых ресурсов», 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств, профиль «Автоматизация технологических процессов и производств», 18.03.01 – Химическая технология, профиль «Химическая и биотехнология переработки растительного сырья», 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, профиль «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», 27.03.04 – Управление в технических системах, профиль «Системы и средства автоматизации технологических процессов», 29.03.03 – Технология полиграфического и упаковочного производства, профиль «Технология упаковочного производства». Методические указания содержат краткие теоретические сведения и рекомендации по выполнению лабораторных работ в программной среде Circuit Simulator.

Методические указания предназначены для бакалавров очной и заочной форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве методических указаний

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2022 г., поз.5250

Подписано к печати 15.02.2022
Печать офсетная.
Тираж 50 экз.

Формат 60x84/16.
Печ.л. 4.
Изд. № 5250.

Бумага тип № 1.
Уч.-изд. л. 4.
Цена «С».
Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Правила выполнения лабораторных работ.....	5
Лабораторная работа № 1 (Lr1).....	6
Лабораторная работа № 2 (Lr2).....	16
Лабораторная работа № 3 (Lr3).....	25
Лабораторная работа № 4 (Lr4).....	35
Лабораторная работа № 5 (Lr5).....	43
Библиографический список.....	55
Приложение 1.....	56
Приложение 2.....	63

ВВЕДЕНИЕ

Изучение общепрофессиональной дисциплины «Электротехника и электроника» в вузах эффективно лишь тогда, когда наряду с овладением основ теории студенты в условиях проведения лабораторного эксперимента знакомятся на практике с работой электрических цепей и устройств, источниками питания, осциллографом и измерительными приборами.

Основной задачей лабораторного практикума является приобретение студентами практических навыков подготовки и испытания электрических цепей и устройств, в частности, приобретение навыков измерения электрических величин, обработки экспериментальных данных, построения временных и векторных диаграмм электрических величин и характеристик устройств, а также получение экспериментального подтверждения (с приемлемой точностью) теоретических положений, рассмотренных на лекциях.

Наряду с натурными экспериментами в настоящее время широкое распространение получили компьютерное моделирование и анализ схем электронных устройств в таких программных средах, как Electronics Workbench, DesignLab, APLAC, P-Spice, Micro-Logic, LabVIEW, NI Multisim и др.

На этапе начального освоения студентами моделирования электронных устройств наиболее приемлемым средством является, по нашему мнению, программная среда **Circuit Simulator**.

Моделирование электрических схем устройств и визуализация результатов в виде осциллограмм, графиков характеристик, показаний виртуальных приборов способствуют лучшему пониманию принципов функционирования реальных схем управления и контроля технологическими процессами производства. Эксперименты на моделях дополняют и расширяют реальные физические эксперименты, так как позволяют исследовать аварийные режимы, недопустимые при натурных испытаниях устройств, замедлить или ускорить развитие электромагнитных процессов в электрических устройствах, что помогает более глубоко усвоить их сущность.

Хорошая подготовка к лабораторной работе (изучение теоретического материала и выполнение расчетных заданий) – непременное условие эффективности ее выполнения, так как проведение любого эксперимента имеет смысл только в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и характер ожидаемых результатов.

Студенты могут воспользоваться готовыми схемами испытания, выполненными в среде Circuit Simulator и сохранёнными как файл **lrX_X.txt**, или самостоятельно собрать схему устройства на рабочем поле и, согласно индивидуальному заданию, установить параметры и режимы функционирования компонентов схемы.

Результаты выполнения расчетного задания и заданий на эксперимент заносятся в бланк отчета, состоящий из титульного листа (на котором указываются наименование кафедры, название и цель работы, фамилия студента и номер его группы), чертежей схем электрических цепей и устройств, исследуемых в лабораторной работе, таблиц для занесения результатов

измерений и вычисленных параметров. В бланке отчета отводятся места для выполнения расчетов, построения диаграмм, графиков зависимостей электрических величин, для перечня использованных в работе приборов и выводов по работе.

В данных методических указаниях в описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, приведены основные расчетные соотношения между электрическими величинами и индивидуальные задания на моделирование электрических схем устройств, даны рекомендации к оформлению отчета. Описание работ и методические рекомендации к выполнению заданий, продублированные в программном комплексе Circuit Simulator, даны в объеме, достаточном для проведения необходимых вычислений без обращения к другим источникам информации.

Предполагается, что, прежде чем приступить к моделированию схемы электрической цепи или устройства, студент самостоятельно проработал лекционный материал по теме работы, изучил основные теоретические положения и расчетные соотношения, приведенные в описании работы.

Программа Circuit Simulator должна быть установлена до начала выполнения работ на диск персонального компьютера. Краткое описание работы и инструкция по установке симулятора Circuit Simulator даны в Приложении 1 методических указаний. Установка программы Circuit_Simulator_1.2.0 на ПК через интернет приведена в Приложении 2.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Лабораторные работы проводятся на персональном компьютере с использованием программного комплекса Circuit Simulator. Описание и инструкция работы в среде Circuit Simulator даны в Приложении 1.

2. Каждая лабораторная работа состоит из двух частей: расчетной и экспериментальной, выполняемой в виртуальной лаборатории.

3. Прежде чем приступить к моделированию схем устройств, необходимо изучить теоретические сведения по теме лабораторной работы, учебные задания на проведение экспериментов, согласно варианту рассчитать параметры элементов схемы, а в некоторых работах рассчитать схему цепи.

4. При выполнении работ необходимо строго следовать методическим указаниям и выполнять задания по варианту, номер которого соответствует последней цифре номера зачётной книжки студента, 0 – соответствует варианту № 10.

5. Оформленный в электронном виде отчет с выводами по результатам работы и ответами на тестовые задания сохраняется в формате MS Word (при необходимости, может быть распечатан на принтере) и отправляется по системе Moodle для регистрации и оценки.

6. Снимки экрана для отчетов должны быть сделаны на белом фоне, чтобы его установить надо открыть меню *Опции* и нажать пункт *Белый фон*.

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

(Lr1_1.txt, Lr1_2.txt)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с измерительными приборами, источниками питания и осциллографом программной среды Circuit Simulator.

2. Изучить методы и приобрести навыки измерения тока, напряжения, мощности, угла сдвига фаз между синусоидальным напряжением и током, а также сопротивлений резисторов, индуктивностей индуктивных катушек и ёмкостей конденсаторов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Виды и методы измерения электрических величин

В зависимости от способа обработки экспериментальных данных для нахождения результата различают прямые, косвенные, совместные и совокупные измерения.

При *прямом* измерении искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных в результате выполнения измерения; например, измерение амперметром тока в ветви цепи.

При *косвенном* измерении искомое значение величины находят на основании известной зависимости между измеряемой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям; например, определение сопротивления R резистора из уравнения $R = U/I$, в которое подставляют измеренное значение напряжения U на зажимах резистора и протекающего через него постоянного тока I .

Совместные измерения – одновременные измерения нескольких не одноимённых величин для нахождения зависимости между ними; например, определение зависимости сопротивления резистора от температуры по формуле $R_t = R_0(1 + at + bt^2)$ посредством измерения сопротивления резистора R_t при трех различных температурах t . Составив систему из трех уравнений, находят параметры R_0 , a и b зависимости сопротивления резистора от температуры.

Совокупные измерения – одновременные измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, составленных из результатов прямых измерений различных сочетаний этих величин; например, определение сопротивлений резисторов, соединенных треугольником, посредством измерения сопротивлений между различными вершинами треугольника. По результатам трех измерений по известным соотношениям определяют сопротивления резисторов треугольника.

Различают также аналоговые и дискретные измерения. При *аналоговых* измерениях на заданном интервале число измерений электрической величины бесконечно, а при *дискретных* – число измерений конечно.

В зависимости от способа применения меры известной величины, выделяют при измерениях метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой. При *методе непосредственной оценки* значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчётному устройству (индикатору) измерительного прибора; например, измерение напряжения с помощью вольтметра. *Методы сравнения с мерой* – методы, при которых проводится сравнение измеряемой величины и величины, воспроизводимой мерой; например, измерение сопротивления резистора с помощью моста сопротивлений.

Ниже кратко описываются виды и способы измерения электрических величин и параметров компонентов схем электронных устройств с помощью моделей измерительных приборов программной среды интерактивного моделирования и анализа электрических схем Circuit Simulator. Порядок установки параметров пассивных и активных элементов цепей, измерительных приборов и осциллографа приведен в Приложении 2.

2. Измерение тока и напряжения

Мгновенные значения напряжения и тока можно измерить с помощью осциллографа, имитируемого программой Circuit Simulator. Подключение осциллографа к элементам цепи рассмотрено в инструкции по работе в среде Circuit Simulator.

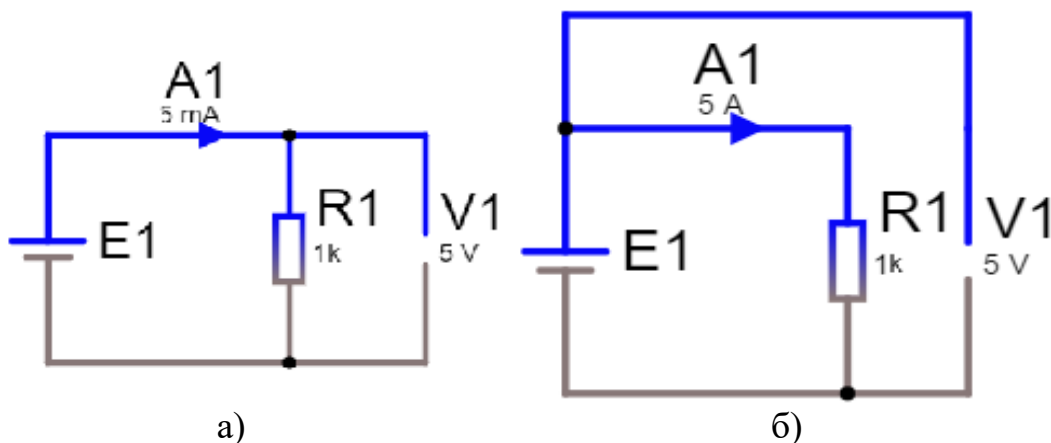


Рис.1.1. Схема подключения амперметра и вольтметра

Измерение *действующих* значений напряжения и тока в ветвях электрической цепи проводится вольтметрами и амперметрами. Амперметр включается *последовательно* с элементами участка цепи, а вольтметр – *параллельно* участку (рис. 1.1, а и б), напряжение на котором необходимо измерить. Модели амперметров и вольтметров среды Circuit Simulator не требуют установки режимов измерений и внутренних сопротивлений.

В реальных цепях для расширения диапазона измерения тока конкретным амперметром применяют *шунт* (тарированный резистор), включаемый параллельно с амперметром. В этом случае значение измеряемого тока равно

показанию амперметра, умноженному на постоянный коэффициент, определяемый по правилу *делителя тока*. При измерении больших переменных токов используют измерительный *трансформатор тока*, первичная обмотка которого включается в ветвь с измеряемым током, а вторичная – замкнута на амперметр. Значение измеряемого тока равно показанию амперметра, умноженному на константу, определяемую коэффициентом трансформации тока измерительного трансформатора.

С целью расширения диапазона измерения напряжения конкретным вольтметром последовательно с его входом включают тарированный резистор. В этом случае значение измеряемого напряжения равно показанию вольтметра, умноженному на коэффициент, определяемый по *правилу делителя напряжения*. При измерении высоких напряжений переменного тока используют измерительный *трансформатор напряжения*, к вторичной обмотке которого подключают вольтметр. Измеряемое напряжение равно показанию вольтметра, умноженному на константу, зависящую от коэффициента трансформации напряжения измерительного трансформатора.

3. Измерение сопротивлений

Для прямого измерения сопротивления резистивного элемента (резистора в том числе) используется омметр Ω среды Circuit Simulator, который не требует установки режимов измерений.

Омметр необходимо подключить к зажимам отдельного резистора (рис. 1.2) или параллельно разомкнутому участку резистивной цепи (без источников энергии). При измерении сопротивления между двумя любыми точками схемы цепи ветви с идеальными источниками тока должны быть разомкнуты, а идеальные источники напряжения заменены короткозамкнутыми участками (проводниками).

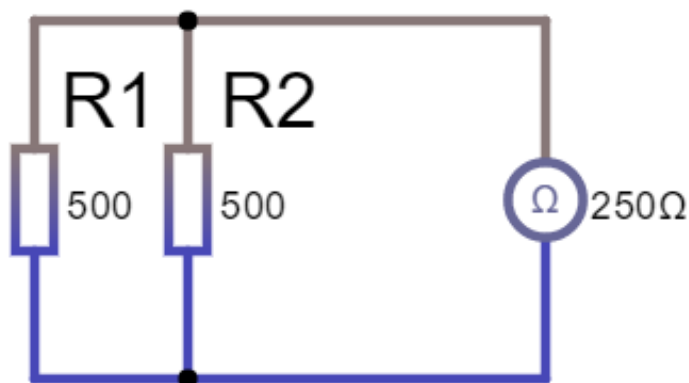


Рис. 1.2. Схема подключения омметра

В практике измерения *сопротивлений* резистивных элементов, кроме прямых и сравнительных методов, широко используется так называемый *метод вольтметра-амперметра*, в основу которого положен закон Ома для цепей постоянного тока (см. рис. 1.1, а и б). Этот метод позволяет получить лишь приближенное значение измеряемого сопротивления $R \approx U/I$. Так, для схемы, изображенной на рис. 1.1, а,

$$R_1 = U/(I - U/R_V),$$

а для схемы, изображенной на рис. 1.1, б,

$$R_2 = (U - R_A I)/I,$$

где R_V и R_A – внутренние сопротивления вольтметра и амперметра соответственно.

Анализ приведенных выражений позволяет сделать выводы: первой схемой (рис. 1.1, а) следует пользоваться при измерении сравнительно малых сопротивлений, когда $R_V \gg R_1$, а второй схемой (рис. 1.1, б) – при измерении больших сопротивлений, когда $R_A \ll R_2$.

4. Измерение угла сдвига фаз

Для измерения угла сдвига фаз φ между синусоидальным напряжением и током в реальной цепи используют:

- измерители разности фаз;
- метод вольтметра-амперметра-ваттметра, при котором угол φ определяют из уравнения $\varphi = \arccos(P/UI)$, где P – показание ваттметра (среднее значение потребляемой мощности), Вт;
- методы, основанные на измерении временного интервала Δt при помощи электронно-лучевого осциллографа.

Временной интервал

$$\Delta t = \varphi/\omega = \varphi/2\pi f$$

пропорционален фазовому сдвигу φ между синусоидальным напряжением и током в неразветвленной цепи (рис. 1.3,) и обратно пропорционален угловой частоте ω напряжения (тока).

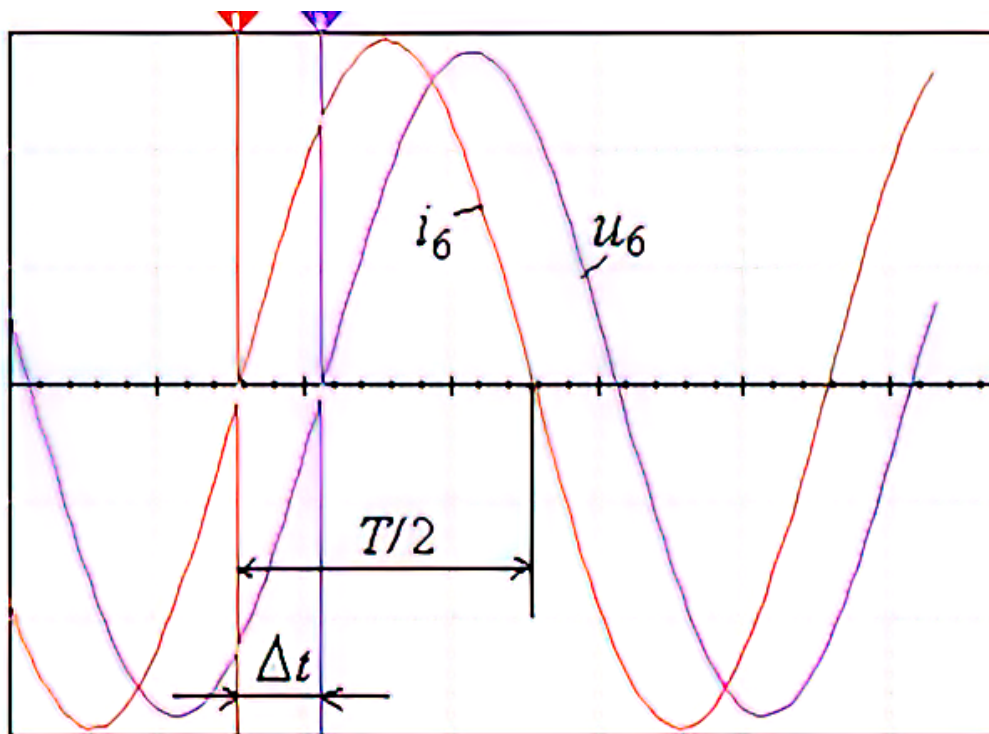


Рис.1.3. График напряжения и тока в неразветвленной цепи

Фазовый угол (в градусах) определяют по формуле

$$\varphi = 360^\circ \Delta t / T,$$

где $T = 1/f$ – период изменения напряжения в секундах (с); f – частота питающего цепи напряжения в герцах (Гц).

Временной интервал $\Delta t = T_2 - T_1$ обычно измеряют между нулевыми значениями осциллограмм напряжения и тока с помощью визирных линий (визиров), расположенных слева и справа от экрана осциллографа (рис. 1.3). Угол φ берется со знаком "плюс", если ток отстаёт по фазе от напряжения (см. рис. 1.3), и со знаком "минус", если ток опережает по фазе напряжение.

Установка развертки осциллограмм (Масштабирование сигнала по оси X) производится в окне, выводимом при нажатии на кнопку «Параметры осциллографа».

В программной среде Circuit Simulator для измерения угла сдвига фаз в цепях переменного тока наряду с осциллографом будем использовать также виртуальный ваттметр. Ваттметр непосредственно измеряет активную мощность P цепи (ветви) в ваттах и её пиковое значение.

ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание 1. Изучить краткую инструкцию (см. Приложение 1) работы с программной средой Circuit Simulator

Запустить симулятор электрических цепей Circuit Simulator.

Открыть файл электрической схемы лабораторной работы **Ir1_1.txt** (рис.1.4, а и б).

После двойного щелчка мышью на изображении элемента или прибора в открывающихся диалоговых окнах:

– **задать** значение ЭДС источника постоянного напряжения $E_1 = N$, (В);

– **установить** значения сопротивлений, Ом:

$$R_1 = N, R_2 = 2N, R_3 = 3N, R_4 = 4N,$$

где N – **последняя цифра номера зачётной книжки студента**, **0** – **соответствует N=10**.

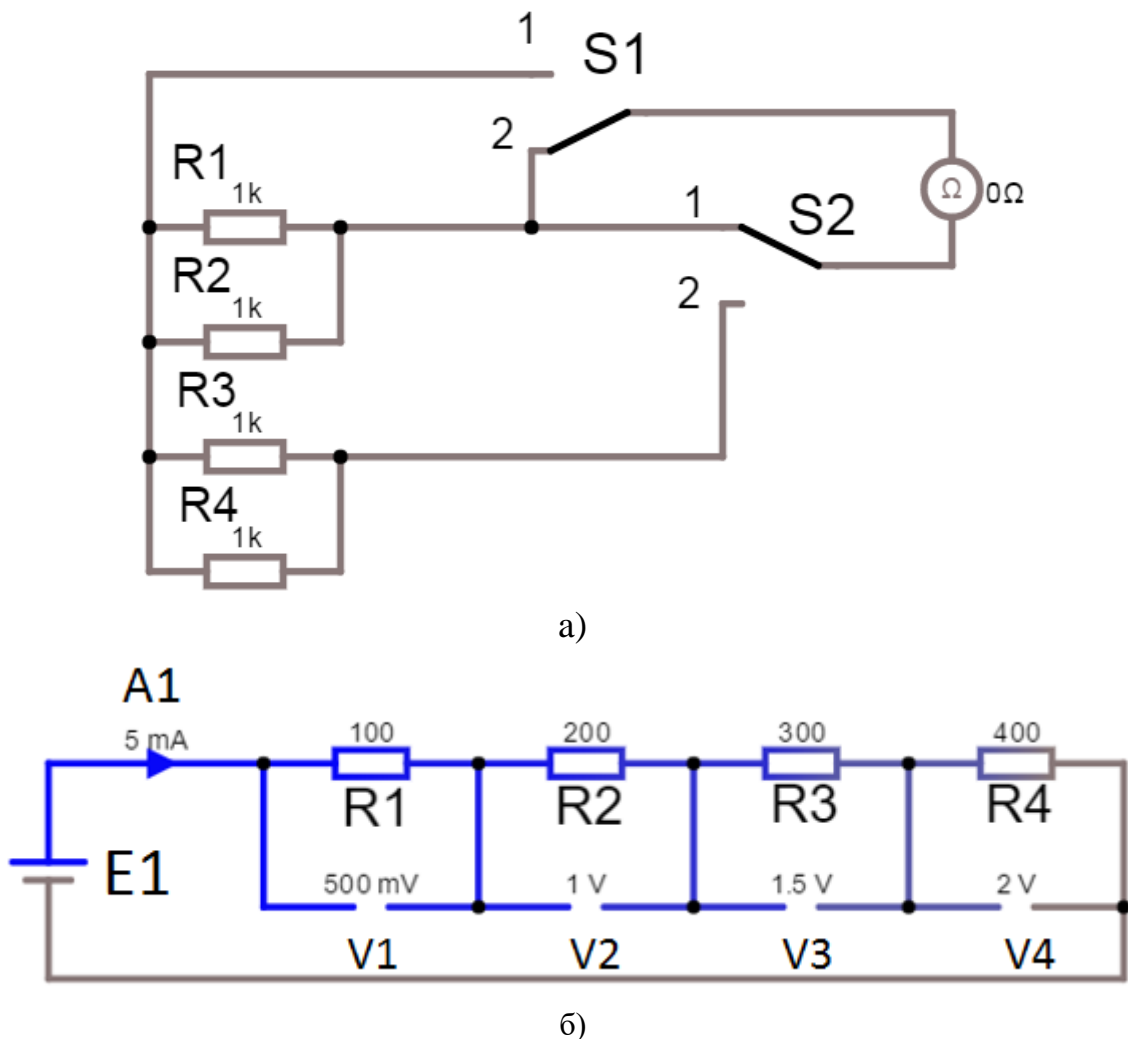


Рис.1.4. Электрические схемы Ir1_1.txt (пример х- варианта).

Задание 2. Измерение сопротивлений

- **Измерить** с помощью омметра Ω (рис. 1.4, а) сопротивление цепи (R12) параллельно включенных резисторов R1 и R2. Для этого: выключатели **S1** и **S2** поставить в положение 1, **нажать/отпустить** кнопку **Start/STOP** симулятора и снять показания омметра Ω .

- **Измерить** с помощью омметра Ω сопротивление цепи (R34) параллельно включенных резисторов R3 и R4. Для этого: выключатель **S1** поставить в положение 1, **S2** поставить в положение 2, **нажать/отпустить** кнопку **Start/STOP** симулятора и снять показания омметра Ω .

- **Измерить** с помощью омметра Ω сопротивление цепи (R1234) последовательно соединённых групп параллельных резисторов R1, R2 и R3, R4. Для этого: **перевести** выключатель **S1** в положение 2, **S2** оставить в положении 2, **нажать/отпустить** кнопку **Start/STOP** симулятора и снять показания омметра Ω .

- **Рассчитать** эквивалентные сопротивления цепей резисторов R12, R34 и R1234 по формулам:

$$R_{12} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2),$$

$$R_{34} = R_3 R_4 / (R_3 + R_4),$$

$$R_{1234} = R_{12} + R_{34}.$$

Значения сопротивлений занести в таблицу 1.1 и сравнить.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Измерено	R_{12} , Ом	R_{34} , Ом	R_{1234} , Ом	U_1 , мВ	U_2 , мВ	U_3 , мВ	U_4 , мВ
			-		I_1 , мА		
Вычислено				R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом

Задание 3. Измерение тока и напряжения

Запустить программу Circuit Simulator (щёлкнуть мышью на кнопке Start/STOP и занести показания амперметра A1 (I_1) и вольтметров V1, ..., V4 (U_1, U_2, U_3, U_4) (рис 1.4, б) в таблицу 1.1.

Рассчитать сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3 и R_4 по закону Ома ($R = U/I$) и занести их значения в таблицу 1.1.

Скопировать и занести в отчёт схемы (рис. 1.4, а и рис. 1.4, б) после измерения параметров.

Задание 4. Измерение индуктивности катушки и ёмкости конденсатора косвенным методом по результатам прямых измерений напряжения, тока и мощности RL - или RC -ветви и косвенного измерения угла сдвига фаз φ_k в цепях синусоидального тока.

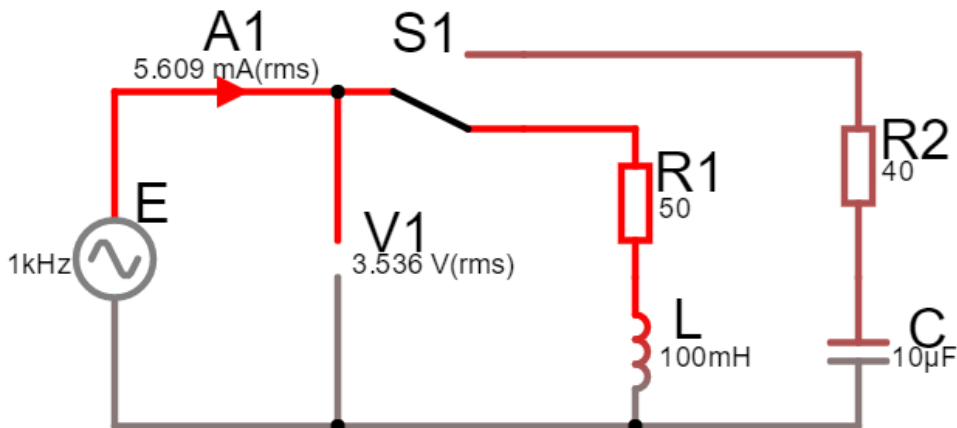


Рис.1.5. Электрическая схема lr1_2.txt (пример х-варианта)

С этой целью открыть файл lr1_2.txt (рис.1.5).

Установить параметры идеального источника синусоидального напряжения

$$e = E_m \sin(\omega t + \Psi_u) = \sqrt{2}E \sin(2\pi f t + \Psi_u):$$

- действующее значение ЭДС $E = 5 + N$, В,

где N – последняя цифра номера зачётной книжки студента, 0 – соответствует $N=10$;

- частоту $f = 1$ кГц;
- начальную фазу напряжения $\Psi_u = 0$;
- сопротивления резистора $R_1 = 25$ Ом (имитирующего активное сопротивление катушки);
- сопротивление резистора $R_2 = 10$ Ом;
- значение индуктивности катушки $L = 5 + N$, мГн;
- значение ёмкости конденсатора $C = 1 + N$, мкФ;

Подключить осциллограф к источнику E (развертка осциллографа – 0,2 мс/дел (200 us/div):

- для визуализации и измерения среднего (average) значения активной мощности P , потребляемой цепью;

- для визуализации сдвига по фазе тока и напряжения;

4.1 Подключить R_1L -ветвь к источнику E (управляемый контакт переключателя S_1 поставить в нижнее положение).

Запустить программу Circuit Simulator (щёлкнуть мышью на кнопке START/STOP), **снять** показания приборов и **занести** их в таблицу 1.2.

Убедиться, что ток i_1 в R_1L -ветви *отстаёт* по фазе от напряжения u на угол $\varphi_1 = \arctg(X_L/R_1) = \arccos(P_1/UI_1)$, где P_1 – показание ваттметра.

Скопировать и **занести** на страницу отчёта смоделированную схему (см. рис. 1.5) и осциллограмму мощности, амперметра и вольтметра (рис. 1.6).

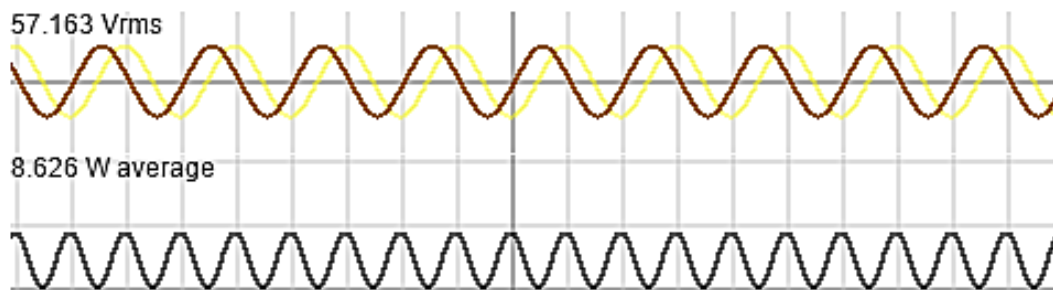


Рис. 1.6. Осциллограммы, x-вариант

4.2 Подключить R_2C -ветвь с помощью переключателя S_1 к источнику E . Показания приборов **занести** в таблицу 1.2.

Убедиться (анализируя расположение осциллограмм на экране осциллографа), что ток i_2 в R_2C -ветви *опережает* по фазе напряжение u на угол

$$\varphi_2 = \arctg(-X_C/R_2) = -\arccos(P_2/UI_2),$$

где P_2 – показание ваттметра.

Скопировать и **занести** на страницу отчёта смоделированную схему (см. рис. 1.7) и осциллограммы с показаниями ваттметра, амперметра и вольтметра (рис. 1.8).

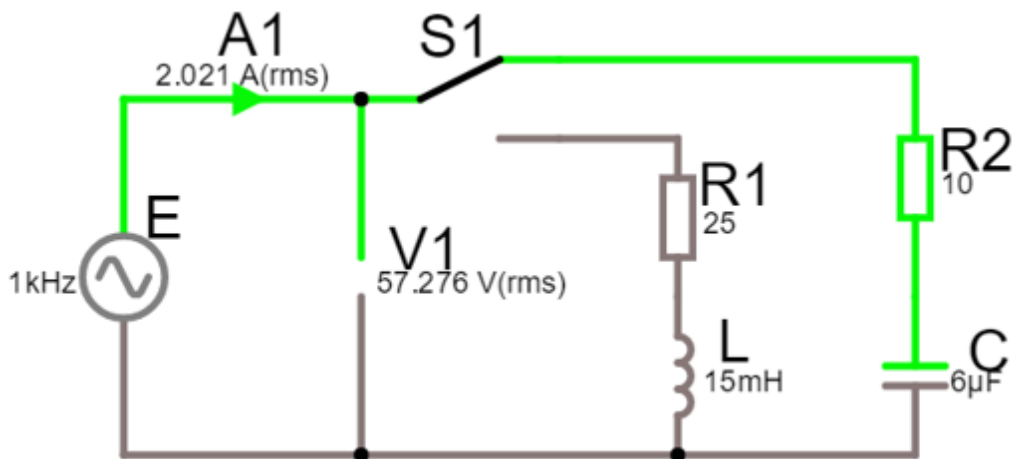


Рис.1.7. Электрическая схема lr1_2.txt, х- вариант

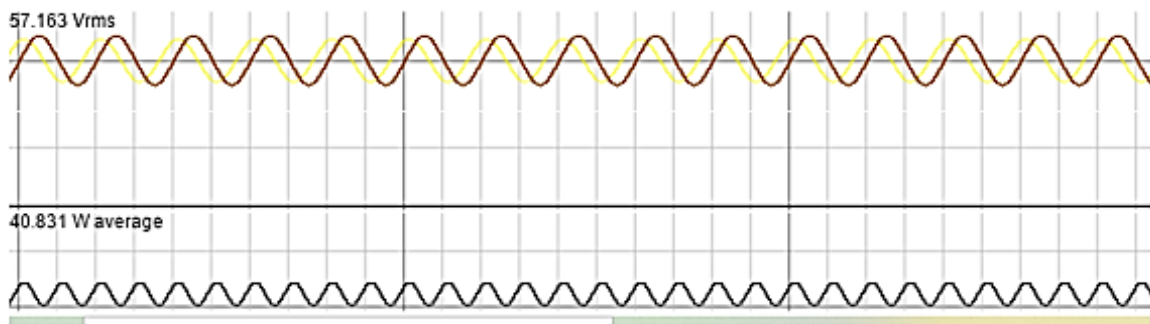


Рис. 1.8. Осциллограммы, х-вариант.

Рассчитать полное $Z = U/I$, активное $R = Z\cos\varphi$ и реактивное $X = Z\sin\varphi$ сопротивления R_1L - и R_2C -ветви и занести их в таблицу 1.2.

Так как индуктивное сопротивление катушки $X_L = \omega L = 2\pi fL$, Ом, а ёмкостное сопротивление конденсатора $X_C = 1/\omega C = 1/2\pi fC$, Ом, то:

- индуктивность катушки, включенной в R_1L -ветвь:

$$L = X_L/\omega = X_L/2\pi f, \text{ Гн или } L = 10^3 X_L/2\pi f, \text{ мГн};$$

- ёмкость конденсатора, включенного в R_2C -ветвь:

$$C = 1/(\omega X_C) = 1/(2\pi f \cdot X_C), \text{ Ф или } C = 10^6/(2\pi f \cdot X_C), \text{ мкФ}.$$

Таблица 1.2 – Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Ветвь	Установлено		Измерено				Вычислено					
	E , В	f , кГц	U , В	I , мА	P , Вт	Δt , С	Z , Ом	φ , гр	R , Ом	X , Ом	L , мГн	C , мкФ
R_1L												
R_2C												

Вычисленные значения индуктивности L катушки и ёмкости C конденсатора **занести** в таблицу 1.2. **Сравнить** полученные значения R , L и C с установленными их значениями в схеме цепи.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень приборов, использованных в экспериментах, с их краткими характеристиками.
3. Электрические схемы измерения сопротивлений резисторов, индуктивности катушки и ёмкости конденсатора, и осциллограммы напряжения и тока.
4. Таблицы результатов измерений и расчётов.
5. Расчётные формулы.
6. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 2

НЕРАЗВЕТВЛЁННЫЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА (Lr2.txt)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Практическое ознакомление с установившимися режимами в последовательных RL -, RC - и RLC -цепях синусоидального тока.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Реактивные сопротивления x_l и x_c и угол сдвига фаз φ

Уравнения электрического равновесия напряжений и токов цепи синусоидального тока можно записать в аналитической форме и представить графически в виде векторных диаграмм.

При анализе цепей синусоидального тока необходимо иметь в виду следующее:

- реактивное *индуктивное* сопротивление X_L индуктивной катушки и реактивное *ёмкостное* X_C сопротивление конденсатора зависят от частоты f источника синусоидального напряжения $u = U_m \sin(2\pi ft + \Psi_u)$, т. е.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \text{ и } X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi f C),$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота напряжения, рад/с; $f = 1/T$ – циклическая частота, Гц; T – период синусоидального напряжения, с; Ψ_u – его начальная фаза, рад или град;

- в ветвях с реактивными элементами L и C между напряжением и током возникает *фазовый сдвиг* $\varphi = \Psi_u - \Psi_i$, где Ψ_i – начальная фаза тока (рис. 2.1). Угол φ (в рад или град) – алгебраическая величина, изменяющаяся в диапазоне от -90° ($-\pi/2$ рад) до $+90^\circ$ ($+\pi/2$ рад). Знак и величина угла зависят от типа и величины параметров, последовательно соединённых элементов R , L и C ветви и частоты f напряжения.

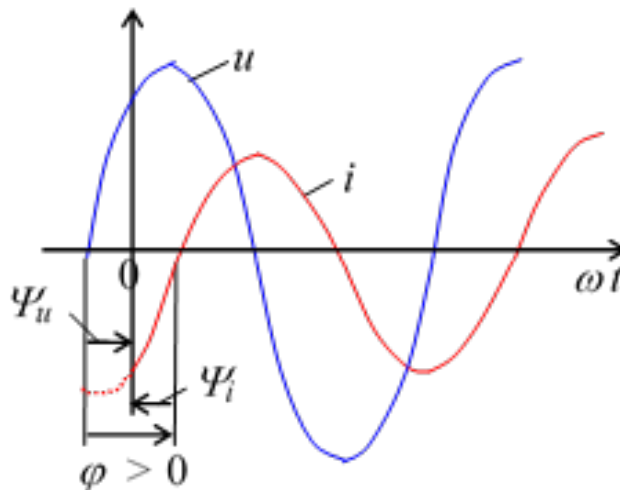


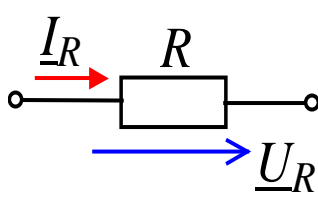
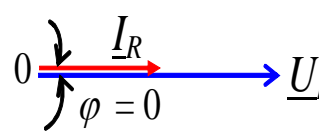
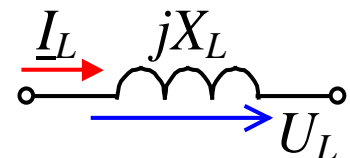
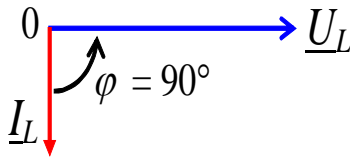
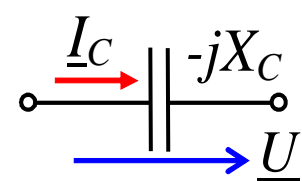
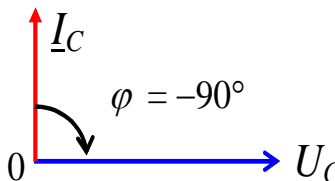
Рис. 2.1. К понятию сдвига фаз

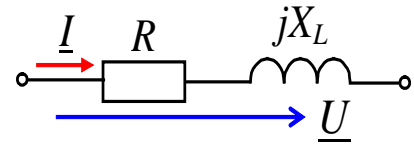
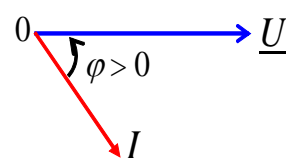
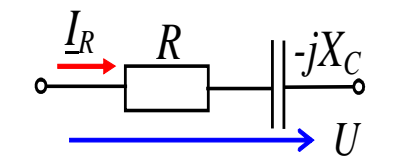
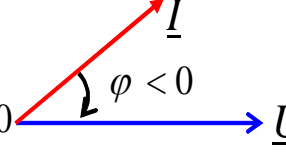
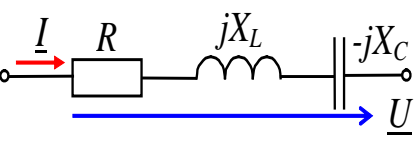
2. Векторные диаграммы напряжений и тока в RL -, RC - и RLC -ветвях

В таблице 2.1 представлены типовые ветви схемы цепи синусоидального тока, векторные диаграммы напряжений и токов ветвей и углы сдвига фаз φ между их векторами. Анализ векторных диаграмм показывает, что *резистивный* элемент R является частотно-независимым элементом: ток и напряжение на его зажимах *совпадают по фазе* (форма тока i_R повторяет форму напряжения u_R), поэтому при определении (по осциллограммам) угла сдвига фаз между напряжением и током в ветвях цепи в качестве датчика тока обычно используют резистор с сопротивлением R_0 , напряжение $u_{R0} = R_0 i$ с зажимов которого подаётся на один из входов осциллографа.

В *индуктивном* элементе ток *отстаёт по фазе* от напряжения на 90° , а в *ёмкостном* – его *опережает* на 90° . В RL -, RC - и RLC -ветвях углы сдвига фаз зависят от значений параметров элементов ветвей и определяются, в общем случае, по формуле $\varphi = \arctg(X_L - X_C)/R$.

Таблица 2.1 – Типовые элементы схем цепи синусоидального тока

Номер ветви	Элементы ветви	Векторная диаграмма	Угол $\varphi = \Psi_u - \Psi_i$
1			$\varphi = 0$
2			$\varphi = 90^\circ (\pi/2)$
3			$\varphi = -90^\circ (-\pi/2)$

Номер ветви	Элементы ветви	Векторная диаграмма	Угол $\varphi = \Psi_u - \Psi_i$
4			$\varphi = \arctg(X_L/R)$
5			$\varphi = \arctg(-X_C/R)$
6		<p>a) $X_L > X_C$; см. ветвь 4; б) $X_L < X_C$; см. ветвь 5; в) $X_L = X_C$; см. ветвь 1</p>	$\varphi = \arctg[(X_L - X_C)/R]$

3. Измерение угла φ

Значение угла сдвига фаз φ в ветвях схемы цепи определяют косвенным методом, измеряя временные интервалы на осциллограммах, т. е.

$$|\varphi| = 360^\circ \Delta t/T,$$

где Δt – временной интервал между нулевыми значениями синусоид напряжения и ток; угол φ берется со знаком "плюс", если ток *отстаёт по фазе* от напряжения (см. рис. 2.2), и со знаком "минус", если ток *опережает по фазе* напряжение.

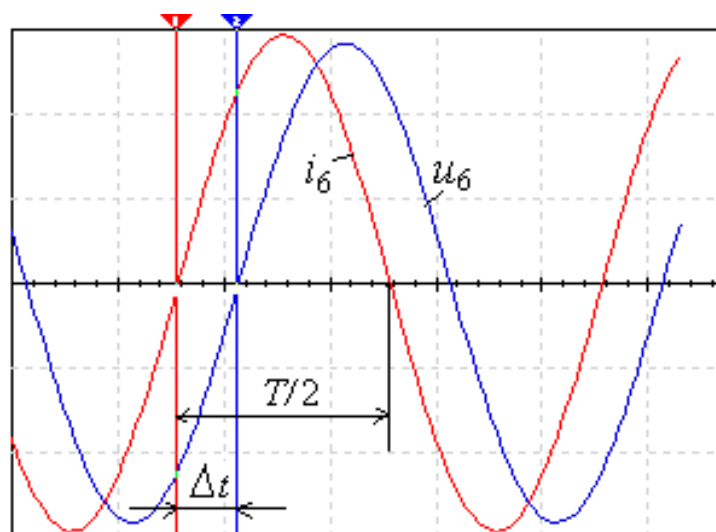


Рис. 2.2. Определение интервала времени Δt

В среде Circuit Simulator имеется виртуальный ваттметр, который измеряет активную мощность $P = UI\cos\varphi$, потребляемую приёмником, где U и I – напряжение и ток потребителя энергии. Тогда модуль угла сдвига фаз между напряжением и током

$$\varphi = \arccos(P/UI).$$

Знак угла φ определяют косвенным методом, например, подключая параллельно нагрузке конденсатор: если при этом коэффициент мощности $\cos\varphi$ увеличился (угол φ уменьшился), то угол φ имеет знак "+", и наоборот.

ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание 1.

Рассчитать индуктивное сопротивление X_L катушки и ёмкостное сопротивление X_C конденсатора при частотах, указанных в таблице 2.2, и **занести** полученные значения сопротивлений в таблице 2.2.

Значения индуктивности катушки и ёмкости конденсатора **определить** по формулам:

$$L = 300 - 2,5N, \text{ мГн},$$

$$C = 5 + 3N, \text{ мкф},$$

где N – последняя цифра номера зачётной книжки студента, 0 – соответствует $N=10$.

Таблица 2.2 – Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Сопротивление X		при частоте f , Гц						
		30	40	50	60	80	100	120
Рассчитано	X_L , Ом							
Измерено	U , В							
	I , А							
	X_L , Ом							
Рассчитано	X_C , Ом							
Измерено	U , В							
	I , А							
	X_C , Ом							

Построить (на одном рисунке) графики $X_L(f)$ и $X_C(f)$, (см. рис. 2.3).

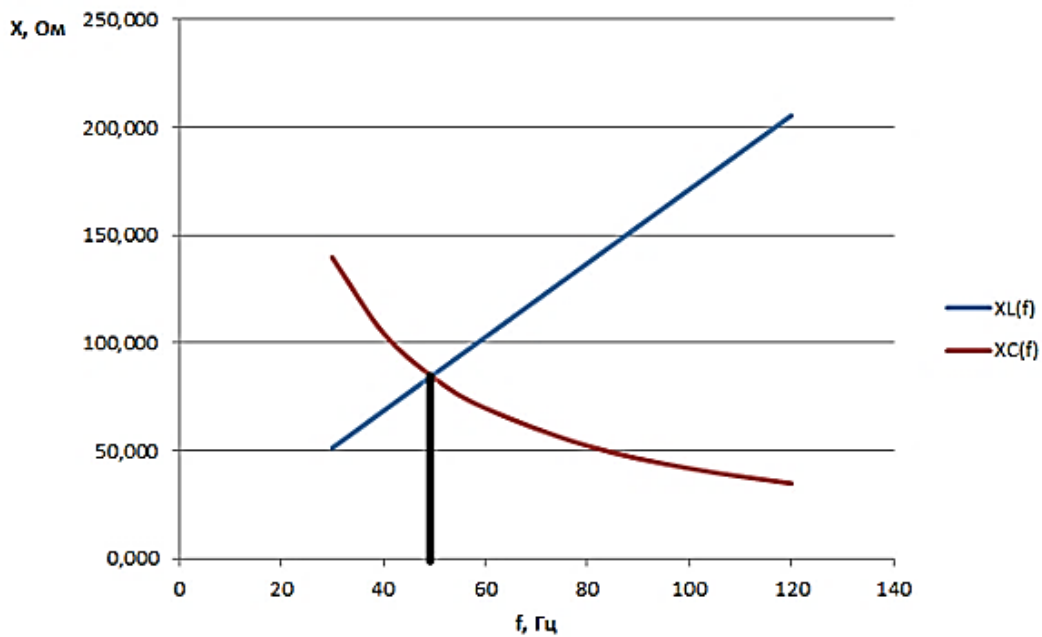


Рис. 2.3. Графики зависимости $X_L(f)$ и $X_C(f)$ при $f=50$ Гц (пример х-варианта)

Отметить координаты точки пересечения графиков – возможного режима резонанса напряжений при последовательном соединении катушки и конденсатора между собой и с источником синусоидального напряжения.

Задание 2.

Запустить симулятор Circuit Simulator.

Открыть файл **lr2.txt** электрической схемы цепи синусоидального тока (рис. 2.4)

Установить:

– параметры пассивных элементов:

$$R_1 = R_4 = R_5 = R_6 = \text{int}(600/N) + 100, \text{ Ом};$$

$$L_2 = L_4 = L_6 = 300 - 2,5N, \text{ мГн};$$

$$C_3 = C_5 = C_6 = 5 + 3N, \text{ мкФ};$$

– параметры идеального источника синусоидального напряжения e_1 :

$$\text{ЭДС } E = 10 \text{ В (действующее значение)}, f = 50 \text{ Гц}; \psi_u = 0;$$

– длительность развертки осциллографа – 2 мс/дел (2 ms/div).

Скопировать схему электрической цепи синусоидального тока (рис. 2.4) на страницу отчёта.

Задание 3.

Провести измерение токов, напряжений и углов сдвига фаз между ними в ветвях, содержащих соответственно резистивный **R1**, индуктивный **L2** и емкостный **C3** элементы.

С этой целью:

3.1. Подключить резистор **R1** к источнику синусоидального напряжения **E1**, **запустить** программу моделирования схемы (щёлкнуть мышью на Start/STOP) и убедиться (анализируя осциллограммы на экране осциллографа), что угол сдвига фаз между напряжением и током $\varphi = 0$. Ток $I_1 = U/R_1$;

Скопировать в отчёт осциллограммы $u_R(t)$ и $i_R(t)$ при $f = 50$ Гц (рис. 2.5).

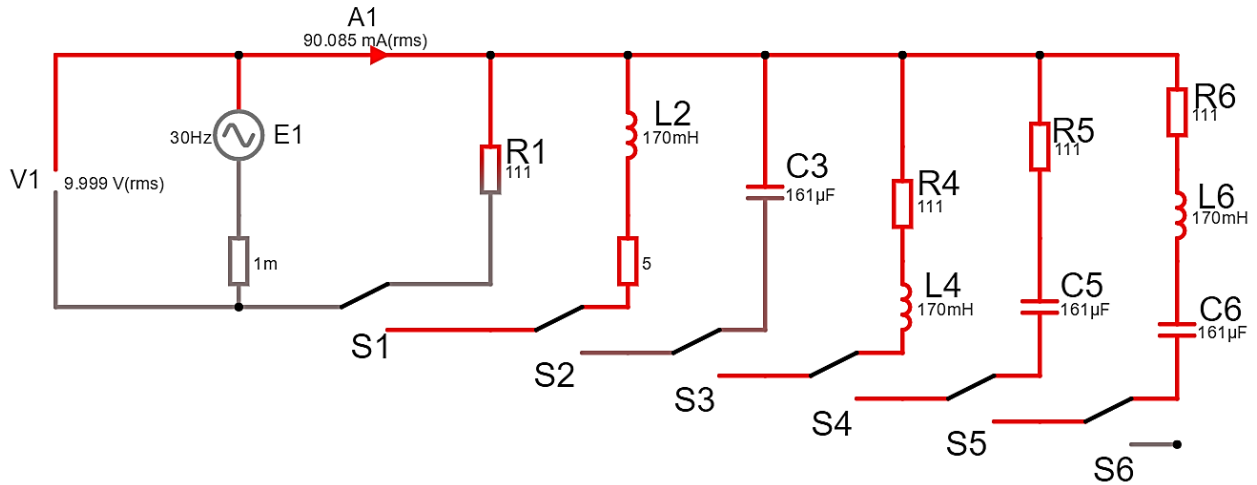


Рис. 2.4. Электрическая схема **lr2.txt** задания 3.1 (пример х-варианта)

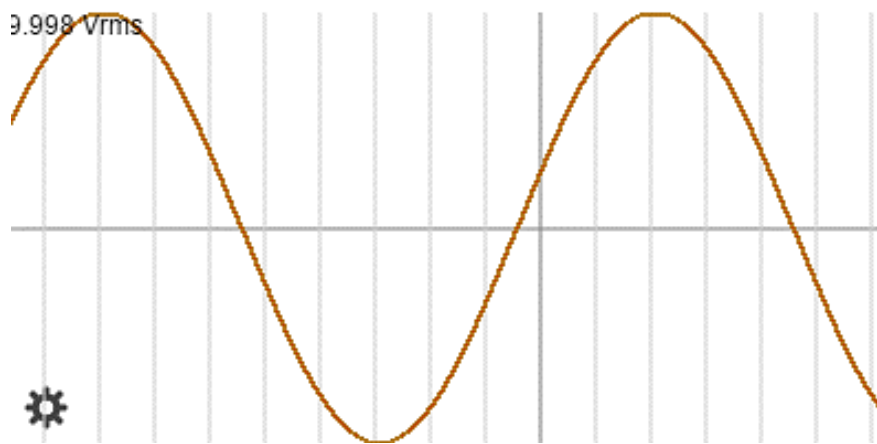


Рис. 2.5. Осциллограммы $u_R(t)$ и $i_R(t)$ при $f = 50$ Гц задания 3.1 (пример х-варианта)

3.2. Отключить резистор **R1** и **подключить** катушку **L2** к источнику **E1** (нажать выключатель **S1**).

Изменяя ступенчато частоту напряжения f (30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 Гц), записать показания вольтметра **V1** и амперметра **A1** в таблицу 2.2.

Рассчитать сопротивление $X_{L2}(f) = U_L/I_L$, данные занести в таблицу 2.2. **Сравнить** полученные значения со значениями, найденными при выполнении задания 1.

Убедиться (анализируя осциллограммы), что ток i_L отстает по фазе от напряжения u_L .

Скопировать в отчёт схему задания 3.2 (рис. 2.6), осциллограммы $u_L(t)$ и $i_L(t)$ при $f = 50$ Гц (рис. 2.7).

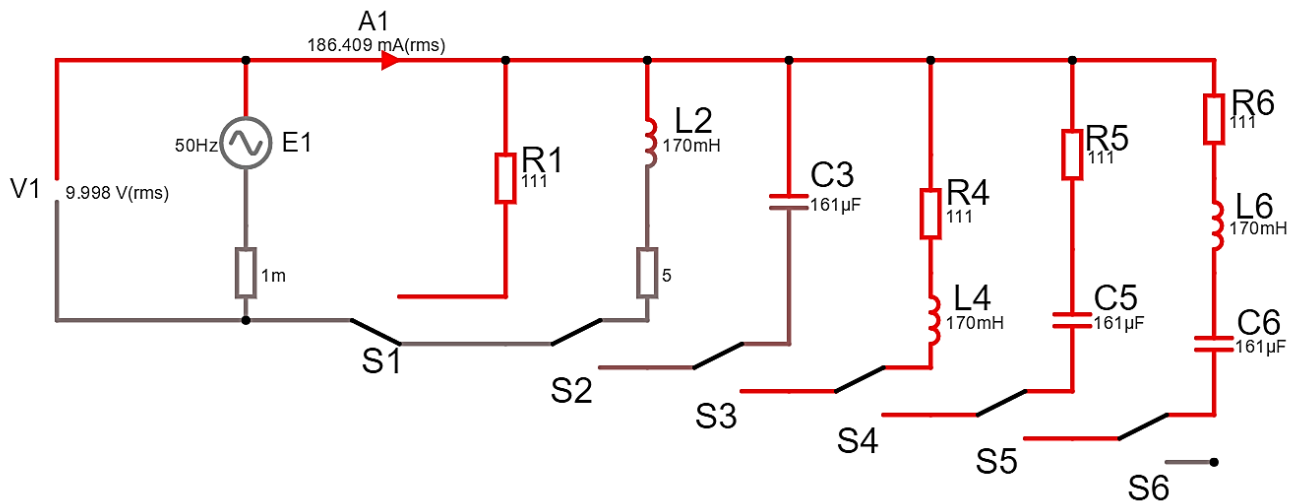


Рис. 2.6. Электрическая схема **lr2.txt** задания 3.2 (пример х-варианта)

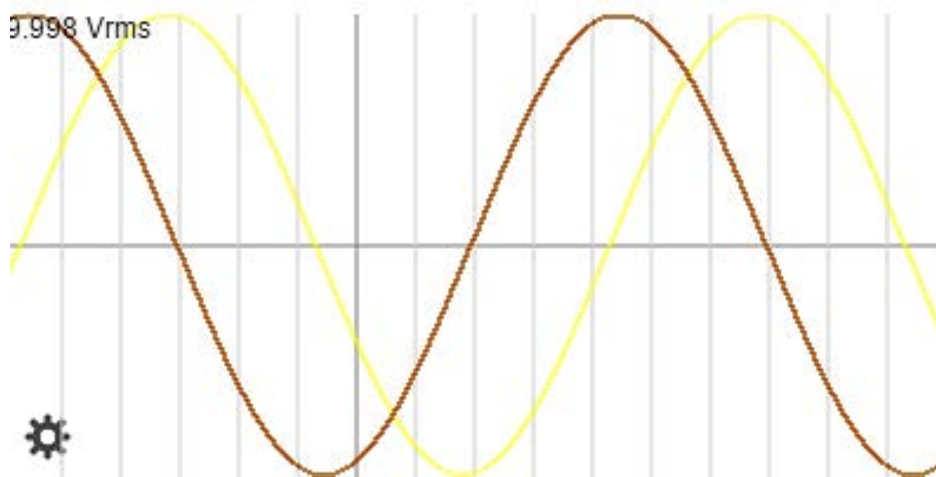


Рис. 2.7 Осциллограммы $u_L(t)$ и $i_L(t)$ при $f = 50$ Гц (пример х-варианта)

3.3. Повторить предыдущее задание относительно конденсатора **C3**, предварительно отключив от источника ветвь с элементом **L2** (посредством выключателя **S2**) и подключив с помощью выключателя **S3** к источнику **E1** ветвь с конденсатором **C3** (рис. 2.8). Показания вольтметра **V1** и амперметра **A1** занесите в таблицу 2.2.

Рассчитать сопротивление конденсатора $X_{C3}(f) = U_C/I_C$ (табл. 2.2) и **сравнить** полученные значения со значениями, найденными при выполнении задания 1.

Убедиться (анализируя осциллограммы), что ток i_C опережает по фазе напряжение u_C на угол $\varphi = 90^\circ$.

Скопировать на страницу отчёта осциллограммы $u_C(t)$ и $i_C(t)$ при $f = 50$ Гц.

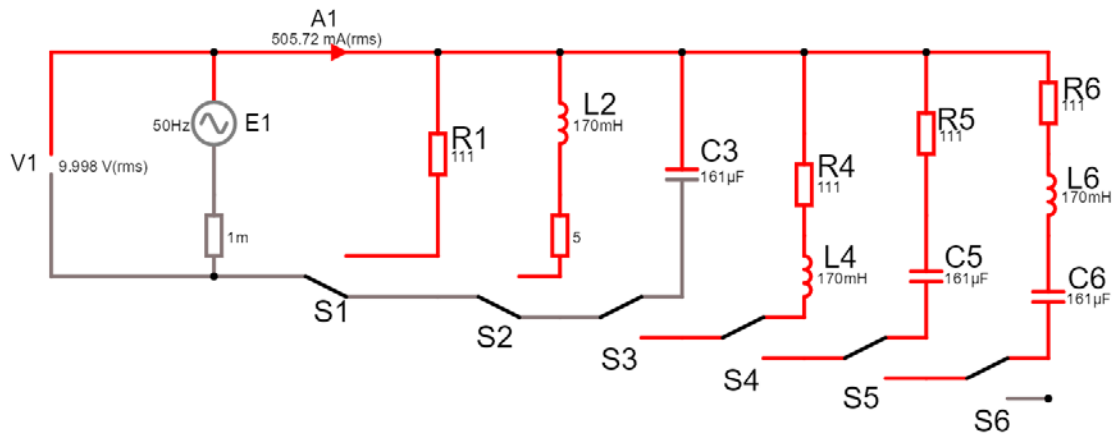


Рис. 2.8. Электрическая схема **lr2.txt** задания 3.3 (пример х- варианта)



Рис. 2.9. Осциллограммы $u_C(t)$ и $i_C(t)$ при $f = 50$ Гц (пример х-варианта)

Задание 4.

Провести измерения токов, напряжений и углов сдвига фаз между ними в ветвях, содержащих соответственно RL -, RC - и RLC -элементы.

С этой целью:

4.1. Установить частоту $f = 50$ Гц источника напряжения E_1 и **подключить** к нему ветвь R_4L_4 , предварительно отключив ветвь с конденсатором C_3 . Показания приборов вольтметра V_1 и амперметра A_1 **занести** в таблицу 2.3. Угол φ **определить** косвенным методом, воспользовавшись осциллограммами напряжения и тока ветви, или из показания ваттметра. Для удобства измерений **изменяйте** чувствительность каналов и длительность развёртки осциллографа.

Рассчитать полное Z_4 , активное R_4 и реактивное X_{L4} сопротивления ветви R_4L_4 и занести их значения в таблицу 2.3.

Убедиться, что ток i в RL -ветви отстаёт по фазе от напряжения u на угол $\varphi_4 = \arctg(X_{L4}/R_4)$;

Скопировать на страницу отчёта схему электрической цепи, осциллограммы напряжения, тока и показания ваттметра RL -ветви.

Таблица 2.3 – Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Ветвь	Измерено			Рассчитано		
	U , В	I , А	φ , град	$Z = U/I$, Ом	$R = Z\cos\varphi$, Ом	$X = Z\sin\varphi$, Ом
R_4L_4						
R_5C_5						
$R_6L_6C_6$						

4.2. Установить частоту $f = 50$ Гц источника напряжения E_1 и **подключить** к нему ветвь R_5C_5 , предварительно отключив от источника E_1 четвёртую ветвь. Показания приборов вольтметра **V1** и амперметра **A1** занести в табл. 2.3. Угол φ **определить** косвенным методом, воспользовавшись осциллограммами напряжения и тока ветви, или из показания ваттметра. Для удобства измерений **изменяйте** чувствительность каналов и длительность развёртки осциллографа.

Рассчитать полное Z_5 , активное R_5 и реактивное X_{C5} сопротивления ветви R_5C_5 и занести их значения в табл. 2.3.

Убедиться, что ток i в RC -ветви опережает по фазе напряжения u на угол $\varphi_5 = \arctg(-X_C/R_5)$.

Скопировать на страницу отчёта схему электрической цепи, осциллограммы напряжения, тока и показания ваттметра RC -ветви.

4.3. Установить частоту $f = 50$ Гц источника напряжения E_1 и **подключить** к нему выключателем S_6 ветвь R_6, L_6, C_6 , предварительно отключив от источника R_5C_5 ветвь. Показания приборов вольтметра **V1** и амперметра **A1** занести в таблицу 2.3. Угол φ **определить** косвенным методом, воспользовавшись осцилло-граммами напряжения и тока ветви, или из показания ваттметра. Для удобства измерений **изменяйте** чувствительность каналов и длительность развёртки осциллографа.

Убедиться, что в RLC -ветви угол сдвига фаз φ_6 между напряжением и током зависит от величины реактивного сопротивления

$$X_6 = X_{L6} - X_{C6}.$$

Если при частоте $f = 50$ Гц, угол $\varphi_6 = \arctg(X_{L6} - X_{C6})/R_6 > 0$, то, уменьшив частоту до 20-30 Гц, угол φ_6 изменит свой знак, и наоборот, если при $f = 50$ Гц, угол $\varphi_6 < 0$, то, увеличив частоту f до 100...120 Гц, ток будет отставать по фазе от напряжения, при этом угол $\varphi_6 > 0$.

Скопировать на страницу отчёта осциллограммы напряжения, тока и показания ваттметра RLC -ветви;

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические смоделированные схемы цепей.
3. Расчётные формулы, *временные диаграммы* напряжений, токов и мощностей ветвей электрических цепей, *векторные диаграммы* напряжений и токов.
4. Таблицы с расчётными и экспериментальными данными.
5. Графики $X_L(f)$ и $X_C(f)$.
6. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 3

РЕЗОНАНСЫ В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

(Lr3.txt)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование явления резонанса в последовательном и параллельном колебательных контурах и определение параметров колебательных контуров.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Общие положения

Под *резонансом* понимают такой режим работы электрической цепи, при котором её входное сопротивление имеет чисто резистивный характер и, следовательно, сдвиг фаз между напряжением u и током i на её входе равен нулю ($\varphi = 0$).

Цепи, в которых возникают резонансные явления, называют *резонансными цепями* или *колебательными контурами*. Простейший колебательный контур содержит один индуктивный L и один ёмкостный C элементы, соединенные между собой и источником синусоидального напряжения последовательно (*последовательный колебательный контур*) или параллельно (*параллельный колебательный контур*).

Различают две основные разновидности резонансных режимов: резонанс напряжений и резонанс токов.

2. Резонанс напряжений

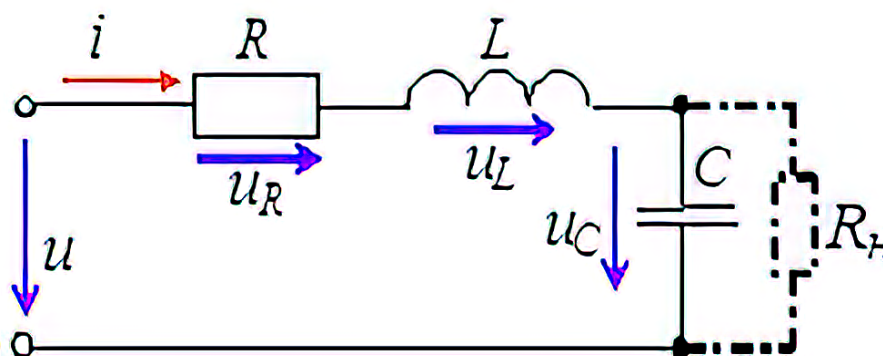


Рис. 3.1. Последовательный колебательный контур

Резонанс напряжений (РН) возникает в последовательном колебательном контуре (рис. 3.1). В схему замещения цепи, кроме индуктивного L и ёмкостного C элементов, включен также элемент R , учитывающий все виды активных потерь в контуре (в катушке, в конденсаторе, во внутреннем сопротивлении источника питания, в соединительных проводах).

Условием наступления РН в схеме (рис. 3.1) является равенство нулю реактивного сопротивления на входе цепи:

$$X_{PH} = X_{L(PH)} - X_{C(PH)} = 0 \text{ или} \\ \omega_{PH}L = 1/(\omega_{PH}C),$$

откуда угловая (в рад/с) и циклическая (в Гц) резонансные частоты контура

$$\omega_{PH} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ и } f_{PH} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Характеристическое (волновое) сопротивление ρ (в Ом) последовательного колебательного контура равно его индуктивному или ёмкостному сопротивлению при резонансе:

$$\rho = X_{L(PH)} = \omega_{PH}L = \frac{1}{\sqrt{LC}}L = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Добротностью Q контура называют отношение характеристического сопротивления ρ контура к активному сопротивлению R при резонансе:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{X_{L(PH)}}{R} = \frac{X_{C(PH)}}{R}.$$

Чем больше ρ и меньше R , тем добротнее контур, тем будут уже частотные характеристики тока и напряжений на элементах контура. В радиотехнических контурах добротность $Q = 100 - 1000$; в электрических цепях добротность обычно не превышает 3 – 5.

Добротность показывает, во сколько раз напряжение на зажимах конденсатора U_C или индуктивное напряжение U_L катушки при резонансе больше напряжения питания контура U :

$$Q = \frac{(U_C)_{PH}}{U} = \frac{(U_L)_{PH}}{U} = \frac{\rho}{R}$$

Ток I при РН имеет максимальное значение, т. к.

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_{L(PH)} - X_{C(PH)})^2}} = \frac{U}{R} = I_{max}.$$

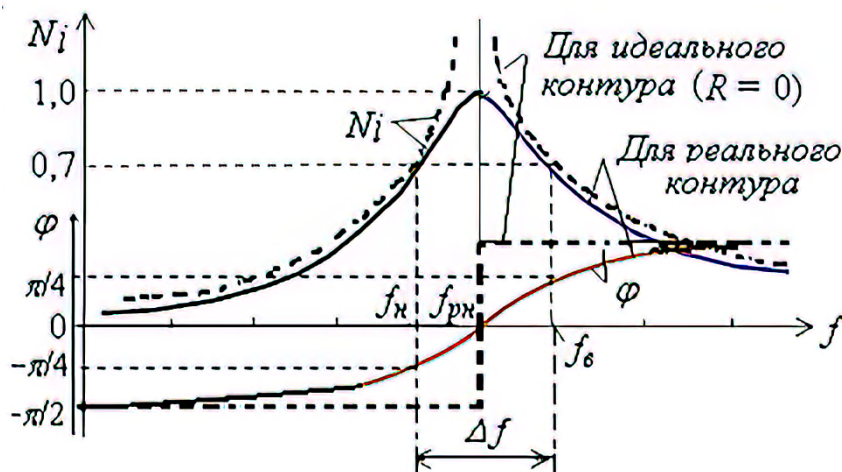


Рис. 3.2. Амплитудно-частотная характеристика тока $N_i(f) = I(f)/I_{max}$ и фазо-частотная характеристика $\varphi(f)$ контура

Нормированная амплитудно-частотная характеристика тока $N_i(f) = I(f)/I_{max}$ и фазо-частотная характеристика $\varphi(f)$ на входе контура при $Q > 1$ представлены на рисунке 3.2.

Характерной особенностью режима РН является превышение напряжениями U_L и U_C входного напряжения U контура, первопричиной которого является ЭДС самоиндукции $e_L = -Ldi/dt = -U_L$.

Векторные диаграммы напряжений на элементах контура до режима резонанса (а), при режиме резонанса (б) и после режима РН (в) представлены на рисунке 3.3. Отметим, что векторы напряжений на индуктивном \underline{U}_L и ёмкостном \underline{U}_C элементах при РН больше вектора входного напряжения \underline{U} в Q раз, а угол сдвига фаз на входе цепи $\varphi = 0$ (рис. 3.3, б), т. е. цепь при резонансе носит чисто активный характер. До резонанса ($f < f_{PH}$, угол $\varphi < 0$) цепь носит активно-ёмкостный характер (рис. 3.3, а), а после резонанса ($f > f_{PH}$, угол $\varphi > 0$) – активно-индуктивный характер (рис. 3.3, в).

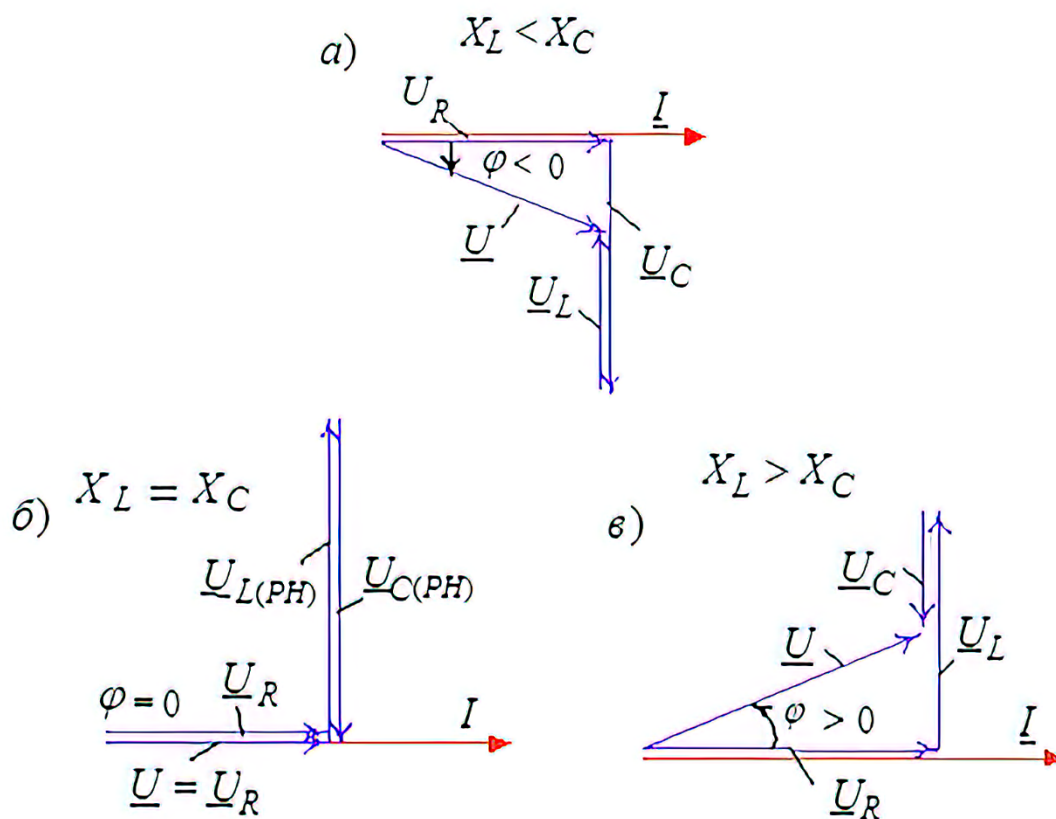


Рис. 3.3. Векторные диаграммы напряжений на элементах контура

Важнейшей характеристикой контура является его *полоса пропускания* (рис. 3.2):

$$\Delta f = f_e - f_n \text{ или } \Delta\omega = \omega_e - \omega_n,$$

под которой понимают диапазон частот, в пределах которого значение нормированного тока $N_i(f) = I(f)/I_{max}$ равно или больше $1/\sqrt{2} \approx 0,707$. На границах полосы пропускания, т. е. на частотах f_e и f_n (или ω_e и ω_n), называемых верхней

и нижней частотами среза, нормированный ток $N_i = I_{max} / \sqrt{2}$, активная мощность $P = 0,5P_{max}$, а угол $\varphi = \pm 45^\circ$.

Приближённо полосу пропускания контура определяют по формуле

$$\Delta f \approx f_{PH} / Q \text{ или } \Delta \omega \approx \omega_{PH} / Q,$$

откуда следует, что чем больше добротность, тем уже полоса пропускания контура (рис. 3.4).

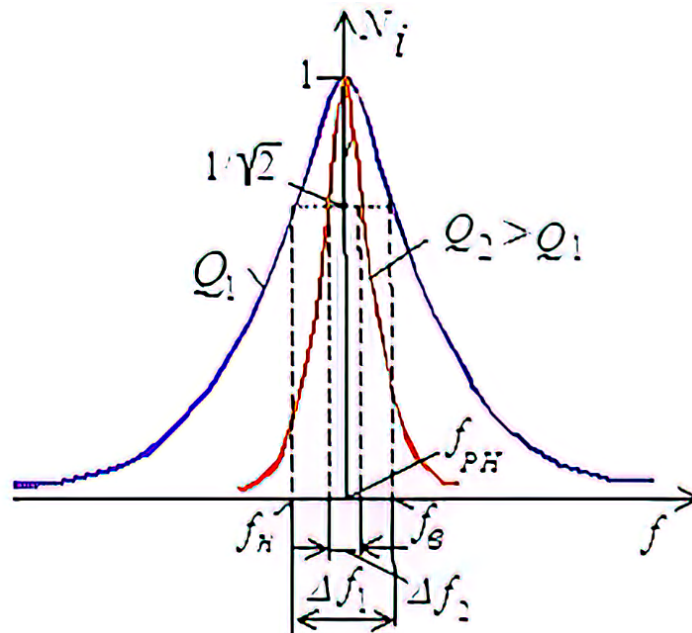


Рис. 3.4. Амплитудно-частотная характеристика контура

На практике параллельно конденсатору подключают приёмник, сопротивление которого порядка $R_H = 10, \dots, 100$ кОм. При небольших значениях R_H полоса пропускания Δf увеличивается, а добротность контура снижается и равна:

$$Q_H = \frac{\rho}{R + \rho^2 / R_H}.$$

3. Резонанс токов

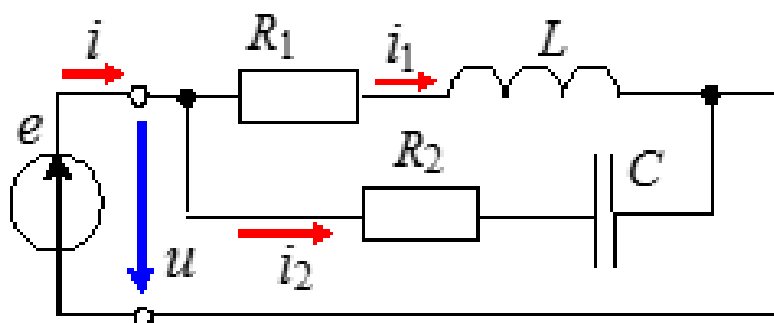


Рис. 3.5. Параллельный колебательный контур

Резонанс токов (РТ) возникает в параллельном колебательном контуре (рис. 3.5), условием которого является равенство нулю входной реактивной проводимости $b_{PT} = b_{L(PT)} - b_{C(PT)} = 0$ или

$$b_{L(PT)} = \frac{\omega_{PT} L}{R_1^2 + (\omega_{PT} L)^2} =$$

$$= b_{C(PT)} = \frac{1/(\omega_{PT} C)}{R_2^2 + 1/(\omega_{PT} C)^2}, \quad \text{откуда резонансная угловая частота,}$$

$$\omega_{PT} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}},$$

где $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансная частота контура без потерь ($R_1 = R_2 = 0$);

$\rho = \sqrt{L/C}$ – характеристическое сопротивление контура.

Резонансные свойства цепи с двумя ветвями $R_1 L$ и $R_2 C$ (см. рис. 3.5) удобно изучать применительно к её эквивалентной схеме замещения с тремя параллельно соединёнными ветвями с параметрами g , b_L и b_C (рис. 3.6, а), равными:

$$g = g_1 + g_2 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} + \frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2}; \quad b_L = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2}; \quad b_C = \frac{1/(\omega C)}{R_2^2 + 1/(\omega C)^2}.$$

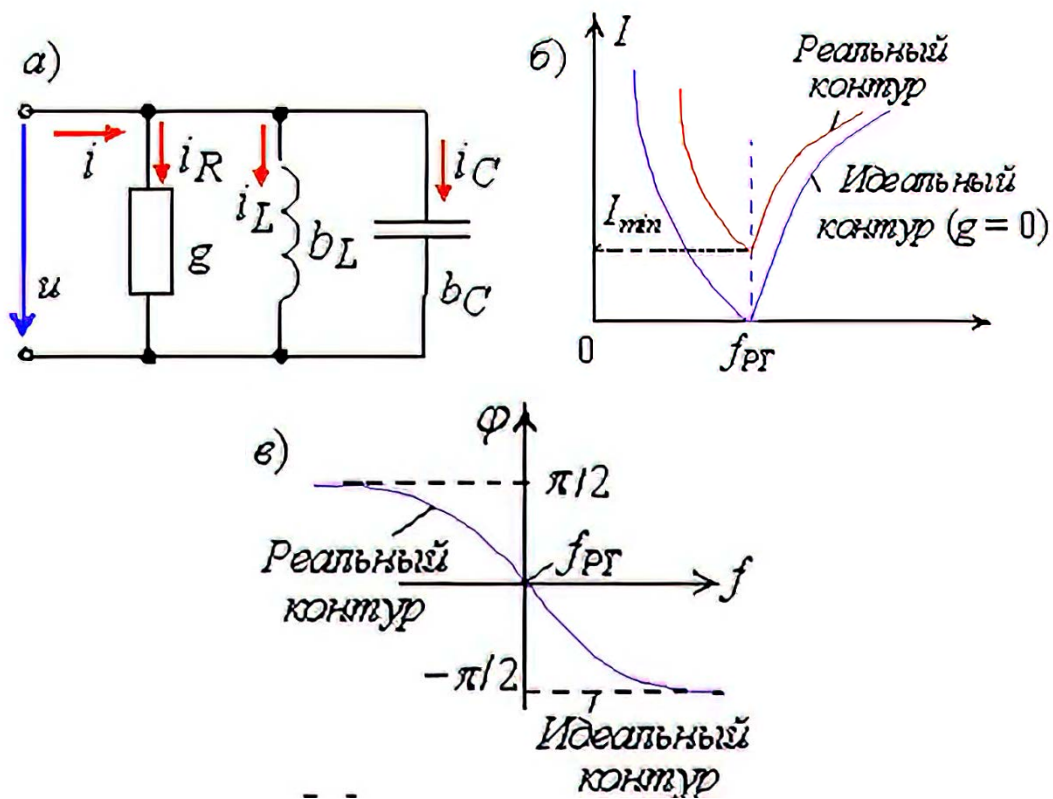


Рис. 3.6. Параллельный колебательный контур:
а) эквивалентная схема замещения, б) амплитудно-частотная характеристика, в) фазо-частотная характеристика

Добротность параллельного колебательного контура определяется:

$$Q = \frac{b_{C(PT)}}{g_{PT}} = \frac{b_{L(PT)}}{g_{PT}}.$$

Добротность Q равна также отношению тока I_C в ветви с конденсатором (при $R_2 = 0$, см. рис. 3.5) при режиме РТ и тока I_{PT} на зажимах контура, т. е.

$$Q = \frac{I_{C(PT)}}{I_{PT}}.$$

Ток I при РТ имеет минимальное значение:

$$I_{PT} = \frac{U}{Z_{PT}} = UY_{PT} = U\sqrt{g_{PT}^2 + (b_{L(PT)} - b_{C(PT)})^2} = Ug_{PT} = I_{min},$$

так как полная проводимость контура в этом режиме $Y_{PT} = g_{(PT)} = Y_{min}$, а сопротивление контура $Z_{PT} = 1/Y_{PT} = Z_{max}$.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) тока $I(f)$ и фазо-частотная характеристика (ФЧХ) $\varphi(f)$ реального и идеального контуров приведены на рисунке 3.6, б и в.

Векторные диаграммы токов ветвей и тока на входе реального (а) и идеального (в) колебательных контуров для режима РТ представлены на рисунке 3.7, б и г; ток I_1 в первой ветви отстаёт от напряжения по фазе на угол φ_1 , а ток I_2 во второй ветви его опережает по фазе на угол φ_2 (рис. 3.7, б).

При режиме РТ ток I на входе контура, как правило, меньше токов I_1 и I_2 ветвей, а для идеального контура ток $I_{PT} = 0$ (рис. 3.7, г). При подключении приёмника R_n параллельно конденсатору (при $R_2 = 0$, см. рис. 3.7, а) добротность нагруженного контура снижается тем сильнее, чем меньше R_n :

$$Q_n = \frac{Q}{1 + R_{PT}/R_n}, \text{ где } R_{PT} \approx \frac{\omega_{PT}^2 L^2}{R_1} = \frac{\rho^2}{R_1} = \rho Q.$$

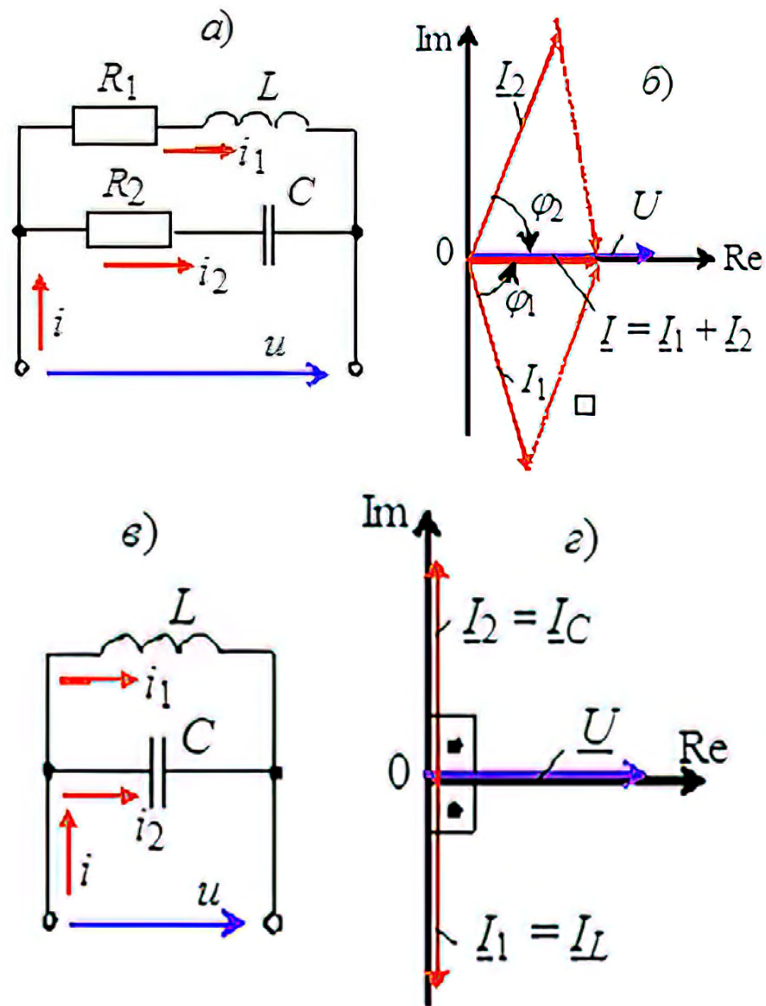


Рис. 3.7. Векторные диаграммы

Приближённо полосу пропускания контура определяют по формуле:

$$\Delta f \approx \frac{f_{PT}}{Q} \text{ или } \Delta \omega \approx \frac{\omega_{PT}}{Q}.$$

ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание 1.

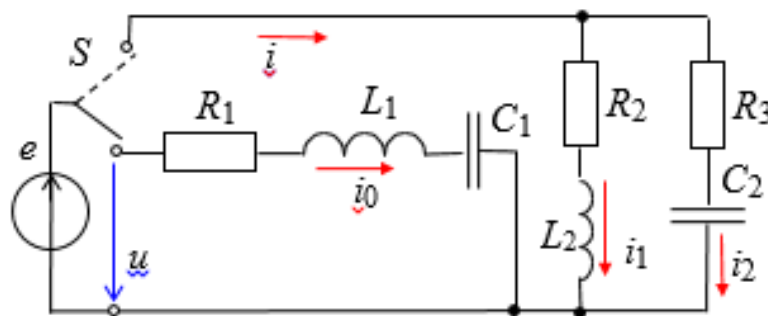


Рис. 3.8. Электрическая схема контура R, L и C.

Определить в соответствии с вариантом параметры элементов схем контуров (рис. 3.8) с округлением до десятичного знака:

$$E = \text{int}(10/\sqrt[4]{N}), \text{ В};$$

$$e = \sqrt{2}E \sin(2\pi f t); f = (30, \dots, 120) \text{ Гц},$$

где N – последняя цифра номера зачётной книжки студента, 0 – соответствует $N=10$;

$$R_1 = \text{int}(10/\sqrt{N}), \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_3 = 0,2 \text{ Ом};$$

$$L_1 = \text{int}(100/\sqrt{N}), \text{ мГн};$$

$$C_1 = C_2 = 100 + 10N, \text{ мкФ};$$

$$L_2 = 25/\sqrt{N}, \text{ мГн};$$

Занести значения параметров в таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Параметры контура

Вариант $N = \dots$	
$R_1 L_1 C_1$ -контур	$R_2 L_2 R_3 C_2$ -контур
$E = \dots, \text{ В}$	$E = \dots, \text{ В}$
$R_1 = \dots, \text{ Ом}$	$R_2 = R_3 = \dots, \text{ Ом}$
$L_1 = \dots, \text{ мГн}$	$L_2 = \dots, \text{ мГн}$
$C_1 = \dots, \text{ мкФ}$	$C_2 = \dots, \text{ мкФ}$

Рассчитать напряжения на элементах схемы, токи ветвей и углы сдвига фаз φ_k ветвей и токи на входе колебательных контуров при резонансных частотах:

$$f_{PH} = 1/2\pi\sqrt{L_1 C_1}, f_{PT} = (1/2\pi\sqrt{L_2 C_2})\sqrt{(L_2/C_2 - R_2^2)/(L_2/C_2 - R_3^2)}$$

и занести их значения в таблицу 3.2.

Задание 2.

По данным таблицы 3.2 **построить** векторные диаграммы напряжений и токов схем замещения контуров в режиме резонанса.

Убедиться, что угол φ между вектором напряжения $\underline{U} = \underline{E}$ и вектором тока \underline{I}_0 в последовательном колебательном контуре и угол φ между вектором \underline{U} и вектором тока \underline{I} в параллельном колебательном контуре близки к нулю.

Таблица 3.2– Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Положение ключа S	Ток, напряжение, угол φ	Рассчитано		Измерено											
		Частота		Частота f , Гц											
		f_{PH} , Гц	f_{PT} , Гц	30	40	50	60	70	80	90	110	130	140	f_p	
Нижнее	I_0 , А														
	U_R , В														
	U_L , В														
	U_C , В														
Верхнее	I_1 , А														
	I_2 , А														
	I , А														
	φ_1 , град			Примечание. $\varphi_1 = \arctg(X_{L2} / R_2)$; $\varphi_2 = -\arctg(X_{C2} / R_3)$.											
	φ_2 , град														

Задание 3.

Рассчитать параметры колебательных контуров:

- добротность $Q_{PH} = U_C / U$ последовательного контура и добротность $Q_{PT} = I_2 \sin \varphi_2 / I$ параллельного контура;

- характеристическое сопротивление $\rho = U_C / I_0$ и характеристическую проводимость $1 / \rho \approx I_C / U = I_2 \sin \varphi_2 / U$ контуров;

- полосу пропускания $\Delta f_{PH} \approx f_{PH} / Q_{PH}$ последовательного контура и полосу пропускания $\Delta f_{PT} \approx f_{PT} / Q_{PT}$ параллельного контура.

Задание 4.

Запустить среду Circuit Simulator и **открыть** файл **Lr3.txt**. (рис. 3.9).

Установить параметры элементов схемы (см. табл. 3.1).

В нижнем положении переключателя **S** формируется последовательный колебательный контур, а в верхнем – параллельный. С помощью осциллографа, включенном на входе цепи, наблюдать за характером изменения потребляемой контуром активной мощности P и угла сдвига фаз φ при изменении частоты f входного напряжения u .

Скопировать смоделированную схему и осциллограммы с показаниями ваттметра, амперметра и вольтметра для последовательного и параллельного контуров.

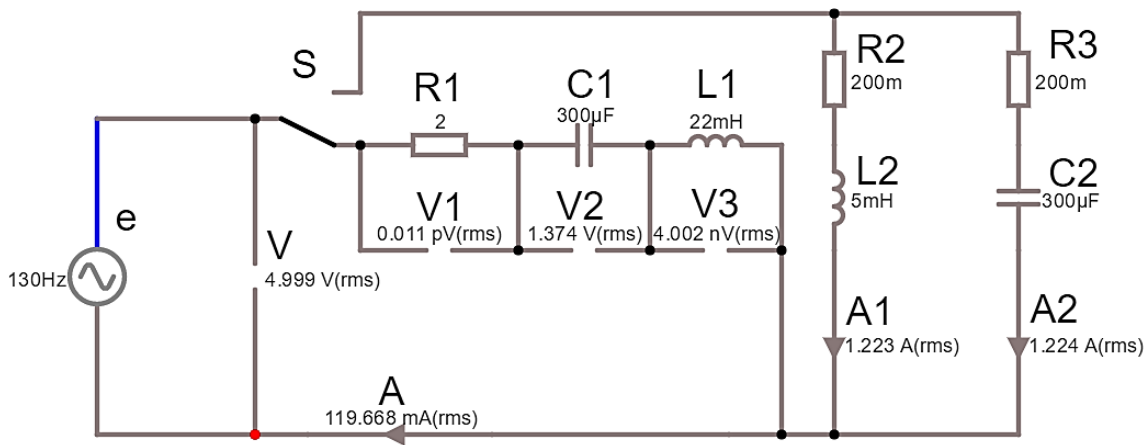


Рис. 3.9. Электрическая схема- файл **Lr3.txt** (пример х- варианта)

Модуль угла $|\varphi| = \arccos(P/UI)$, а знак φ определять по расположению осциллограмм напряжения u и тока i на экране осциллографа: если ток i опережает по фазе напряжение u , то угол φ берётся со знаком "минус", а если ток i отстаёт по фазе от напряжения u , то угол φ имеет знак "плюс".

Ступенчато изменяя частоту ЭДС источника e от 30 Гц до 140 Гц, **снимать** показания приборов и **вносить** их в таблицу 3.2.

Задание 5.

Используя данные эксперимента, **построить** графики амплитудно-частотных характеристик токов и напряжений: на одном рисунке разместить графики $I_0(f)$; $U_R(f)$; $U_L(f)$; $U_C(f)$, а на втором – графики $I(f)$; $I_1(f)$ и $I_2(f)$.

Отметить на графиках координаты точек напряжений и токов при резонансных режимах. На первом рисунке провести пунктирную горизонтальную линию, соответствующую масштабу входного напряжения U .

Сформулировать в отчёте выводы о влиянии частоты входного напряжения на характер изменения резонансных кривых последовательного и параллельного колебательных контуров.

По данным таблицы 3.2 для *чётных вариантов* **построить** векторные диаграммы напряжений и тока последовательного контура при частотах 30 Гц и 90 Гц, а для *нечётных вариантов* – векторные диаграммы токов и напряжения параллельного контура при частотах 90 Гц и 120 Гц.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические расчётные схемы и копия схемы цепи, смоделированной в программной среде Circuit Simulator.
3. Расчётные формулы и значения параметров колебательных контуров, векторные диаграммы напряжений и токов, графики резонансных кривых.
4. Таблицы с расчётными и экспериментальными данными.
5. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 4

ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

(Lr4_1.txt, Lr4_2.txt)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Опытная проверка соотношений, связывающих напряжения и токи трёхфазных цепей при соединении приёмников звездой и треугольником.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Схемы соединения фаз источника и приемника

Трёхфазная цепь – это совокупность трёхфазной системы ЭДС, трёхфазной нагрузки и соединительных проводов.

Трёхфазную систему ЭДС (напряжений) получают с помощью синхронного трёхфазного генератора, в обмотках которого при вращении ротора индуктируются три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, равные по амплитуде и сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол 120° :

$$e_A = E_m \sin \omega t, \quad \underline{E}_A = E_m / \sqrt{2} e^{j0^\circ} = E_\phi;$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad \underline{E}_B = E_\phi e^{-j120^\circ};$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ), \quad \underline{E}_C = E_\phi e^{j120^\circ}$$

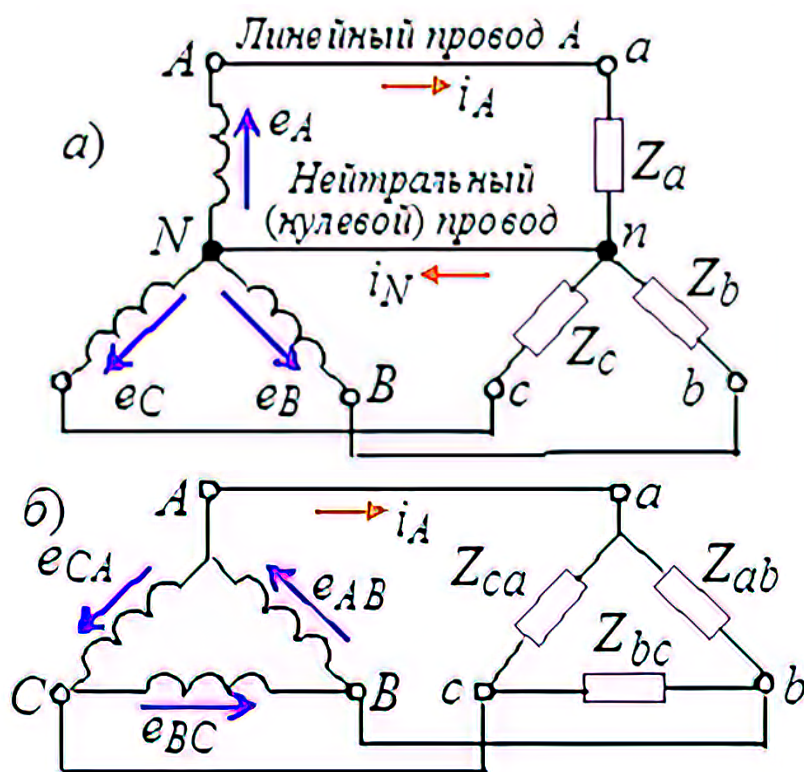


Рис. 4.1. Схемы соединения обмоток генератора и приёмника

Обмотки статора генератора соединяют по схеме звезда (рис. 4.1, а, слева) или треугольник (рис. 4.1, б, слева). Фазы трёхфазного приёмника (нагрузки) также соединяют по схеме звезда или треугольник (рис. 4.1, а и б, справа).

2. Соединение фаз приёмника звездой

На рисунке 4.2, а изображена трёхфазная цепь, у которой источник и приёмник соединены звездой с нейтральным (нулевым) проводом (четырёхпроводная система). Фазные напряжения приёмника в схеме звезда-звезда с нейтральным проводом равны фазным напряжениям источника:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A; \underline{U}_b = \underline{U}_B \text{ и } \underline{U}_c = \underline{U}_C,$$

а так называемое *напряжение смещения нейтрали* между точками n и N при нулевом сопротивлении нейтрального провода равно нулю ($\underline{U}_{nN} = 0$).

В четырёхпроводной системе обеспечивается независимый режим работы фаз приёмника (кроме короткого замыкания в фазе, которое недопустимо): в случае изменения сопротивления одной фазы (в том числе при её обрыве) напряжения и токи двух других фаз не изменяются.

При этом соблюдается соотношение между линейными и фазными напряжениями: $U_\phi = U_\ell / \sqrt{3}$, т. е. *фазные напряжения в $\sqrt{3}$ раза меньше линейных*. В осветительных системах линейное напряжение $U_\ell = 380$ В, а фазное $U_\phi = U_\ell / \sqrt{3} = 220$ В (реже $U_\ell = 220$ В, а $U_\phi = U_\ell / \sqrt{3} = 127$ В).

При *неравномерной* нагрузке ($\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$, например, $\underline{Z}_a = -jX_a$, $\underline{Z}_b = R_b - jX_b$ и $\underline{Z}_c = R_c - jX_c$), фазные и линейные токи (для каждой фазы) $I_\phi = U_\phi / Z_\phi = I_\ell$, а ток в нейтральном проводе (рис. 4.2, б).

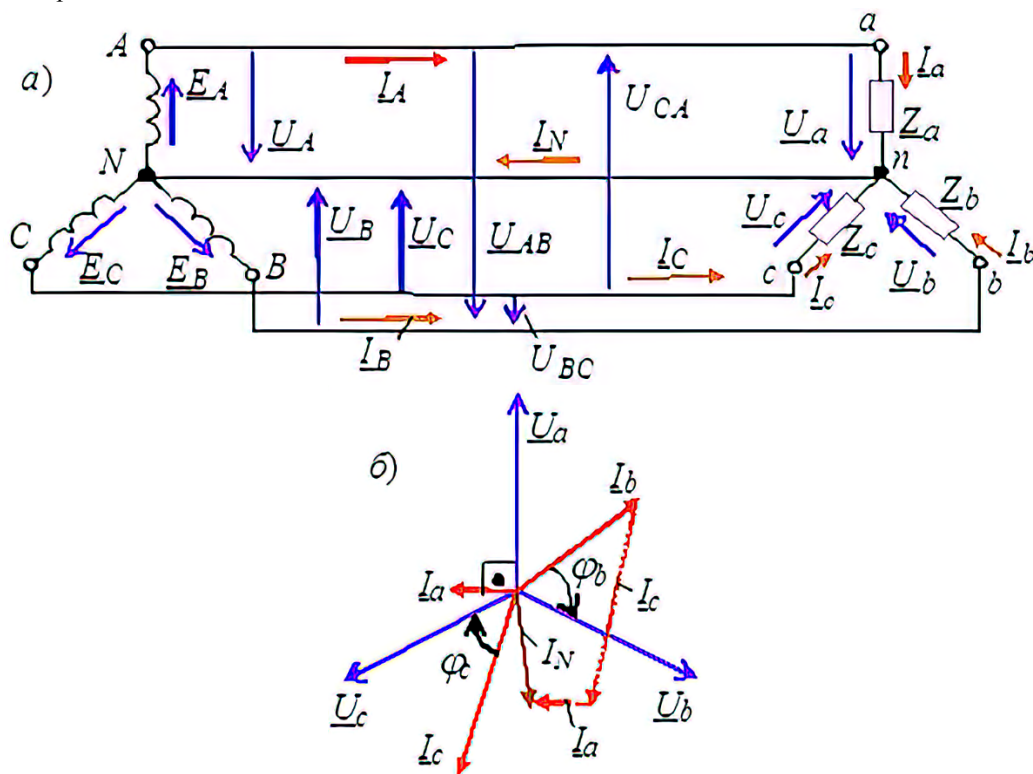


Рис. 4.2. Трёхфазная цепь:

а) соединение фаз генератора и приёмника звездой, б) векторная диаграмма

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c.$$

В случае *равномерной* нагрузки ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi$) модули фазных токов одинаковы и равны соответствующим линейным токам $I_\phi = I_l = U_\phi / Z_\phi$.

На векторной диаграмме векторы токов составляют симметричную звёзду (как и векторы фазных напряжений), поэтому сумма комплексов фазных токов

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0,$$

т. е. *ток в нейтральном проводе равен нулю* и нейтральный провод можно убрать. В результате получим *трёхпроводную* систему включения приёмника с генератором по схеме звезда-звезда (Y-Y).

При *неравномерной* нагрузке и в случае отсутствия нейтрального провода (трёхпроводная система Y-Y без нуля) имеет место зависимый режим работы фаз приёмника: при изменении сопротивления одной фазы изменяются все фазные напряжения. Между точками n и N (см. рис. 4.2, а) появится *напряжение смещения нейтрали*

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_a + \underline{E}_B \underline{Y}_b + \underline{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

где $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a$; $\underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b$; $\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c$ – проводимости фаз нагрузки.

Напряжения фаз приёмника находят из соотношений:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} \text{ и } \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}.$$

В результате получается несимметричная звезда фазных напряжений приёмника (“перекос” фаз), причем в одной фазе, например, в фазе a , напряжение \underline{U}_a может возрасти и значительно превысит фазное напряжение \underline{U}_A генератора (что в большинстве случаев недопустимо), а в других фазах – уменьшится. Значительная несимметрия фазных напряжений приёмника образуется при разных по характеру сопротивлениях нагрузки, например, при

$$\underline{Z}_a = R_A, \underline{Z}_b = jX_L \text{ и } \underline{Z}_c = -jX_C.$$

По этой причине в *осветительных системах* запрещается устанавливать предохранители и выключатели в нейтральном проводе.

Комплексы токов фаз приёмника:

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a / \underline{Z}_a; \underline{I}_b = \underline{U}_b / \underline{Z}_b; \underline{I}_c = \underline{U}_c / \underline{Z}_c,$$

а их сумма равна нулю, т. е.

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0.$$

3. Соединение фаз приемника треугольником

На рисунке 4.3 изображена трёхфазная цепь, у которой источник и приёмник соединены по схеме *треугольник-треугольник*.

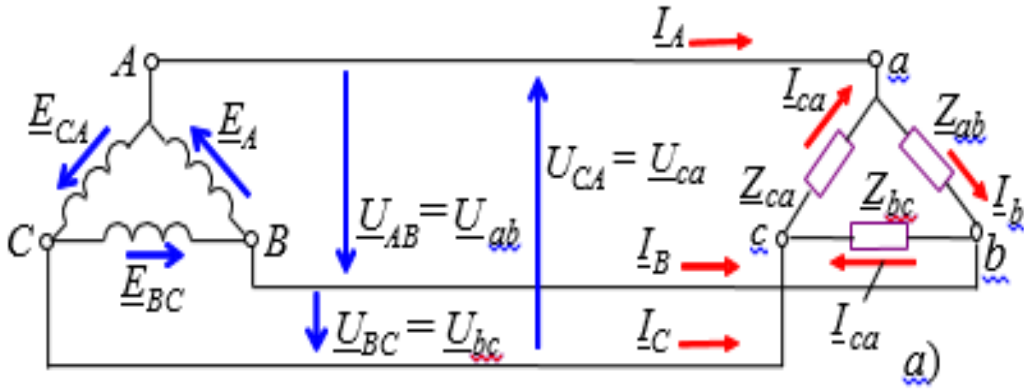


Рис. 4.3. Трёхфазная цепь – соединение фаз приёмника треугольником

Режим работы фаз является независимым (кроме короткого замыкания в фазе, которое недопустимо), так как фазные напряжения приёмника определяются линейными напряжениями источника и равны им, т. е. $U_\phi = U_\Delta$, а фазные токи при *неравномерной* нагрузке:

$$\underline{I}_{ab} = \underline{U}_{ab} / \underline{Z}_{ab}; \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{bc} / \underline{Z}_{bc}; \underline{I}_{ca} = \underline{U}_{ca} / \underline{Z}_{ca}.$$

Линейные токи определяют по формулам:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_B = \underline{I}_b - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_C = \underline{I}_c - \underline{I}_{bc},$$

причём сумма комплексов линейных токов

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

Векторная диаграмма напряжений и токов для случая *неравномерной* нагрузки ($\underline{Z}_{ab} = jX_{ab}$, $\underline{Z}_{bc} = R_{bc}$, $\underline{Z}_{ca} = R_{ca} - jX_{ca}$) представлена на рисунке 4.4, б.

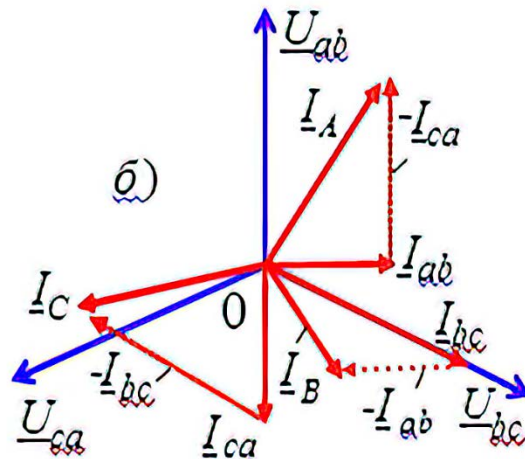


Рис. 4.4. Векторная диаграмма

При *равномерной* нагрузке ($\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\phi$) фазные токи приёмника

$$I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi = U_\Delta / Z_\phi.$$

На векторной диаграмме как фазные, так и линейные токи составляют симметричные звёзды, причём

$$\underline{I}_{ab} + \underline{I}_{bc} + \underline{I}_{ca} = 0 \text{ и } \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0,$$

а соотношение между ними

$$I_{\phi} = I_L / \sqrt{3} \text{ или } I_L = \sqrt{3} I_{\phi}.$$

ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Задание 1.

Запустить среду Circuit Simulator.

Открыть файл **lr4_1.txt** для исследования трёхфазной цепи в различных режимах её работы при соединении источника и приёмника по схеме звезда-звезда (рис. 4.5).

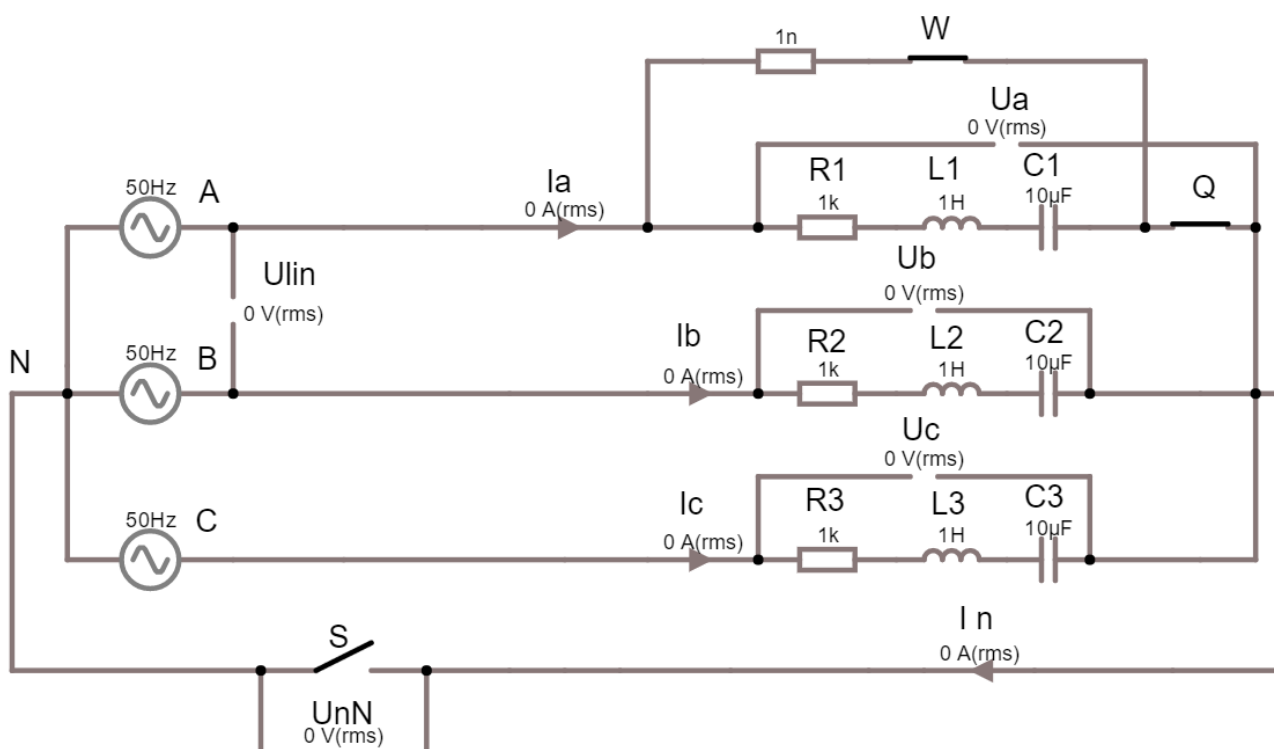


Рис. 4.5. Файл **lr4_1.txt** (пример х-варианта)

Обозначения и назначение вольтметров и амперметров на схеме:

- **Ulin** – вольтметр для измерения линейного напряжения генератора;
- **Ua, Ub** и **Uc** – вольтметры для измерения фазных напряжений приёмника;
- **UnN** – вольтметр для измерения напряжения смещения нейтрали;
- **Ia, Ib** и **Ic** – амперметры для измерения фазных токов приёмника;
- **In** – амперметр для измерения тока в нейтральном проводе.

Ключи **Q**, **S** и **W** определяют вид трёхфазной цепи приёмника (четырёхпроводная и трёхпроводная) и режим работы (обрыв и короткое замыкание фазы *a*).

Установить параметры элементов схемы:

- ЭДС фаз источника трёхфазного напряжения $E_{\phi i} = 220 \text{ В}$;

- частота $f = 50$ Гц;

- значения сопротивлений фаз приёмника (нагрузки):

$\underline{Z}_{\phi i} = Z_a = Z_b = Z_c = R + jX_L = (20 + N) + j30$, Ом – для чётных вариантов N ,

$\underline{Z}_{\phi i} = Z_a = Z_b = Z_c = R - jX_C = (20 + N) - j30$, Ом – для нечётных вариантов N ;

- параметры нагрузки:

$R_i = 20 + N$, Ом;

$L_i = 30/2\pi f$, Гн;

$C_i = 1/2\pi f \cdot 30$, мкФ;

где i – фаза приёмника;

N – последняя цифра номера зачётной книжки студента, 0 – соответствует $N=10$;

Запустить программу моделирования Circuit Simulator (**нажать/отпустить** кнопку **Start/STOP** симулятора).

Снять показания измерительных приборов для четырёхпроводной и трёхпроводной схем при равномерной и неравномерной нагрузках, а также при обрыве и коротком замыкании фазы a , данные занести в табл. 4.1.

Положение ключей **Q**, **S** и **W** и сопротивления фаз $\underline{Z}_{\phi i}$ указаны в таблице 4.1;

Задание 2.

Построить по данным экспериментов векторную диаграмму фазных напряжений и токов (в масштабе) потребителей четырёхпроводной цепи при неравномерной нагрузке. Фазные углы $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ **определить** по формуле

$$\varphi_{\phi} = \pm \arctg (X_{\phi} / R_{\phi}).$$

Сравнить величину построенного вектора тока \underline{I}_N с его экспериментальным значением, а также определить соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при равномерной нагрузке.

Построить векторные диаграммы фазных напряжений и токов приёмника, соединённого звездой без нейтрального провода, при неравномерной нагрузке, а также при режимах ХХ и КЗ в фазе a .

Сравнить значения напряжения U_{nN} с полученными в экспериментах значениями, а также **проверить** равенство нулю суммы токов: $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0$.

Скопировать схемы трёхфазных цепей в отчёт.

Таблица 4.1 – Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Вид цепи	Нагрузка	Измерено								
		$U_{л, В}$	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$U_{nN}, В$	$I_a, А$	$I_b, А$	$I_c, А$	$I_N, А$
Четырёхпроводная	Равномерная (ключи S и Q замкнуты, W – разомкнут): $\underline{Z}_{\phi} = R \pm jX$									
	Неравномерная (ключи S и Q замкнуты, W – разомкнут): $\underline{Z}_a = R; \underline{Z}_b = \pm jX; \underline{Z}_c = R \pm jX$									

Вид цепи	Нагрузка	Измерено								
		$U_L, \text{В}$	$U_a, \text{В}$	$U_b, \text{В}$	$U_c, \text{В}$	$U_{nN}, \text{В}$	$I_a, \text{А}$	$I_b, \text{А}$	$I_c, \text{А}$	$I_N, \text{А}$
Трёх-проводная	Равномерная (ключ Q замкнут, S и W – разомкнуты): $Z_{\phi} = R \pm jX$									–
	Неравномерная (ключ Q замкнут, S и W – разомкнуты): $Z_a = R; Z_b = \pm jX; Z_c = R \pm jX$									–
	Неравномерная (ключи S, Q и W разомкнуты): обрыв фазы a ($Z_a = \infty$ (XX)); $Z_b = \pm jX; Z_c = R \pm jX$									–
	Неравномерная (ключи W и Q замкнуты, S – разомкнут): $Z_a = 0$ (КЗ фазы a); $Z_b = \pm jX; Z_c = R \pm jX$									–

Примечание. При построении векторной диаграммы измеренных напряжений приёмника, соединённого звездой без нейтрального провода, координаты точки n (конец вектора \underline{U}_{nN} в комплексной плоскости) находят методом засечек: из вершин равнобедренного треугольника линейных напряжений (например, A и B) откладывают измеренные величины U_a и U_b . Полученную точку n соединяют с вершиной C (получают вектор \underline{U}_c). Положительные направления полученных фазных напряжений $\underline{U}_a, \underline{U}_b$ и \underline{U}_c приёмника – от точки n к вершинам A, B и C треугольника. Далее вычерчивают векторы фазных токов с учётом характера нагрузки фаз.

Задание 3.

Открыть файл **lr4_2.txt** для исследования трёхфазной цепи в различных режимах её работы при соединении источника и приёмника по схеме звезда-треугольник (рис. 4.6).

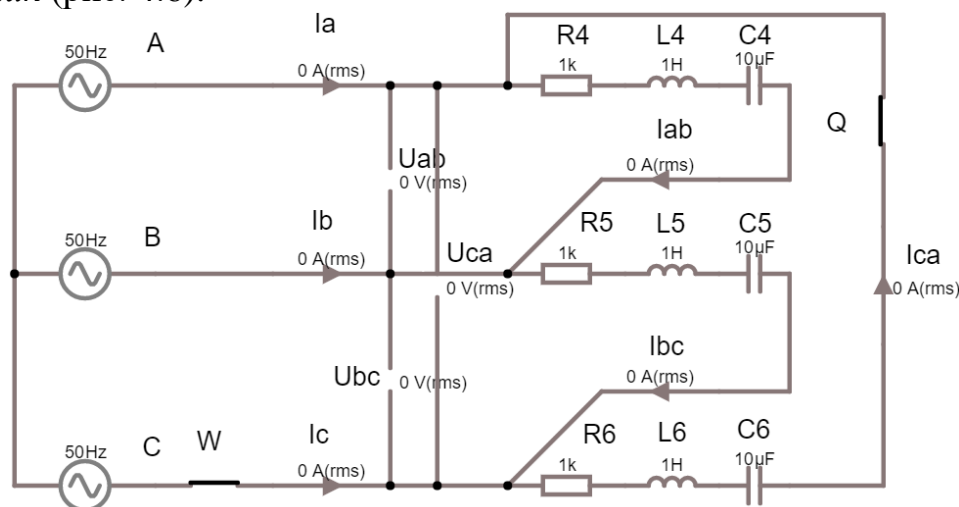


Рис. 4.6. Файл **lr4_2.txt** (пример х-варианта)

Установить параметры элементов нагрузки фаз согласно варианта и **запустить** программу Circuit Simulator нажатием кнопки Start/STOP .

Занести в таблицу 4.2 показания измерительных приборов при равномерной и неравномерной нагрузках, в том числе при обрыве фазы *ca* и линейного провода *C*. Позиции ключей *Q* и *W*, сопротивления фаз \underline{Z}_a , \underline{Z}_b и \underline{Z}_c указаны в таблице 4.2.

Убедиться в равенстве фазных, а также линейных токов при равномерной нагрузке фаз приёмника.

Скопировать схемы цепей в отчёт.

По данным экспериментов **построить** векторные диаграммы фазных напряжений, фазных и линейных токов схемы цепи при неравномерной нагрузке, в том числе при обрывах фазы *ca* и линейного провода *C*. Фазные углы **определить** по формуле $\varphi_\phi = \arctg(X_\phi / R_\phi)$.

Обратить внимание на изменение линейных токов при обрыве фазы *ca* и фазных токов при обрыве линейного провода *C*.

Таблица 4.2 – Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Вид цепи	Нагрузка	Измерено								
		$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_{ab},$ А	$I_{bc},$ А	$I_{ca},$ А
Трёхпроводная: звезда- треугольник	Равномерная (ключи Q и W замкнуты): $\underline{Z}_\phi = R \pm jX$									
	Неравномерная (ключи Q и W замкнуты): $\underline{Z}_{ab} = R \pm jX; \underline{Z}_{bc} = \pm jX; \underline{Z}_{ca} = R$									
	Неравномерная (ключ Q разомкнут, W – замкнут): $\underline{Z}_{ab} = R \pm jX; \underline{Z}_{bc} = \pm jX;$ $\underline{Z}_{ca} = \infty$ (XX)									
	Неравномерная (ключ Q замкнут, W – разомкнут): $\underline{Z}_{ab} = R \pm jX; \underline{Z}_{bc} = \pm jX;$ $\underline{Z}_{ca} = R$; обрыв провода <i>C</i>									

Сравнить значения модулей построенных векторов линейных токов I_A, I_B и I_C с их экспериментальными значениями.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы трехфазных цепей с приемниками, соединенными звездой и треугольником.
3. Расчётные формулы и вычисления параметров трехфазных цепей, таблицы с вычисленными и измеренными величинами.
4. Векторные диаграммы напряжений и токов трехфазных цепей.
5. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 5

ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

(Lr5_1.txt – Lr5_10.txt)

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

Усвоить практические приёмы лабораторного исследования однофазного трансформатора методом холостого хода (опыт ХХ) и короткого замыкания (опыт КЗ), снять внешние характеристики трансформатора.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЁТНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Назначение, устройство и принцип действия трансформатора

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Трансформаторы находят широкое применение для передачи и распределения электрической энергии, для различных технологических целей и для питания различных цепей радио-, электронно-вычислительной и телевизионной аппаратуры, устройств связи, автоматики, телемеханики и т. д.

Трансформаторы бывают двух типов: *понижающие* напряжение, например, до 400 В и ниже и *повышающие* напряжение до 3 – 500 кВ и выше. Различают одно-, трёх- и многофазные, двух-, трёх- и многообмоточные трансформаторы. Диапазон мощностей силовых масляных трансформаторов общего назначения от 10 кВ·А до 630 МВ·А на напряжения (первичные) 10(6), 35, 110, 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ, сухого исполнения – от единиц В·А до 2500 кВ·А на первичные напряжения 380, 500, 660, 10000 В и вторичные – 230 и 400 В. Силовые трансформаторы однофазные, мощностью 4 кВ·А и ниже и трёхфазные – 5 кВ·А и ниже относят к трансформаторам *малой мощности*. Такие трансформаторы широко применяются в преобразовательной, бытовой технике, радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуре.

Наряду с силовыми трансформаторами в практической электротехнике широко используются *измерительные* трансформаторы тока и напряжения.

При подключении первичной обмотки *A-X* силового трансформатора к сети первичный ток i_1 , проходя по её виткам w_1 , возбуждает в сердечнике синусоидальный магнитный поток (рис. 5.1):

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t,$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота питающего напряжения u_1 ;

Этот поток, пронизывая витки w_1 первичной и витки w_2 вторичной обмоток, наводит в них ЭДС:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \text{ и } e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

или (для действующих значений):

$$E_1 = 4,44f w_1 \Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44f w_2 \Phi_m.$$

С вторичной обмотки $a-x$ снимается напряжение u_2 , которое подаётся к потребителю электрической энергии Z_H .

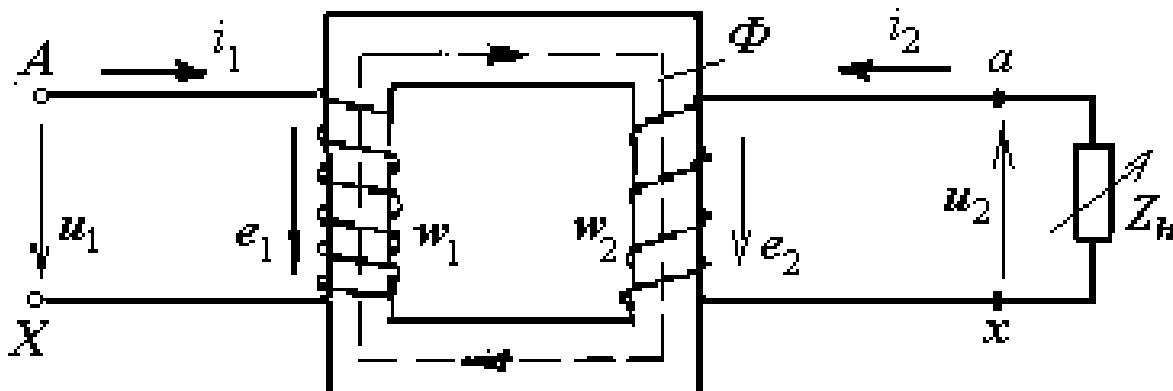


Рис. 5.1. Схема однофазного трансформатора

Ток первичной обмотки трансформатора при отключенной нагрузке ($Z_H = \infty$) является его током холостого хода I_0 . Его выражают в процентах по отношению к номинальному первичному току $I_{1н}$, т. е.

$$i_0 (\%) = 100I_0/I_{1н}.$$

Ток холостого хода $i_0 (\%)$ в силовых трансформаторах составляет 2 – 5 %, а в маломощных трансформаторах может составить 20 – 50 % номинального тока $I_{1н}$.

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют *коэффициентом трансформации* трансформатора:

$$n = E_1/ E_2 = w_1/w_2.$$

2. Определение параметров трансформатора

Для определения коэффициента трансформации n , а также параметров схемы замещения (рис. 5.2) и потерь мощности в трансформаторе проводят опыты холостого хода (ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ) трансформатора.

На рисунке 5.2 обозначено:

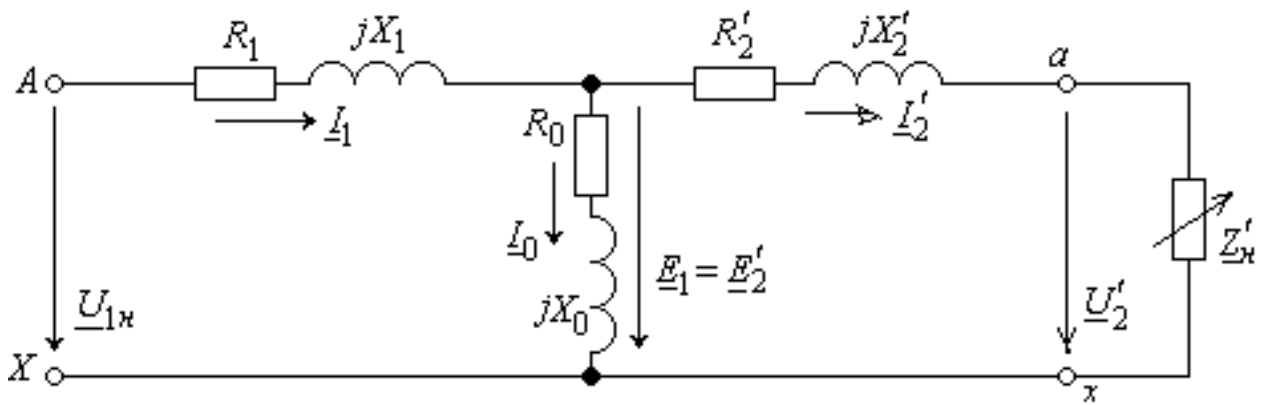


Рис. 5.2. Схема замещения трансформатора

- R_1 и X_1 – активное и индуктивное сопротивления первичной обмотки;
- $R'_2 = n^2 R_2$ и $X'_2 = n^2 X_2$ – приведенные к числу витков первичной обмотки активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки;
- R_0 – активное сопротивление намагничивающей ветви, обусловленное потерями мощности в стальном магнитопроводе;
- X_0 – индуктивное сопротивление намагничивающей ветви, обусловленное основным магнитным потоком;
- $Z'_н = n^2 Z_н$ – приведенное к числу витков первичной обмотки сопротивление нагрузки;
- $U'_2 = nU_2$ и $I'_2 = I_2/n$ – приведенные к числу витков первичной обмотки вторичное напряжение и вторичный ток.

При *опыте* ХХ к первичной обмотке трансформатора подводится номинальное напряжение (рис. 5.3):

$$\underline{U}_{1н} = -\underline{E}_1 + \underline{Z}_1 \underline{I}_0,$$

где $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$ – полное сопротивление первичной обмотки.

При этом вторичная обмотка разомкнута ($I_2 = 0$) и напряжение на её зажимах

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_{20} = \underline{E}_2.$$

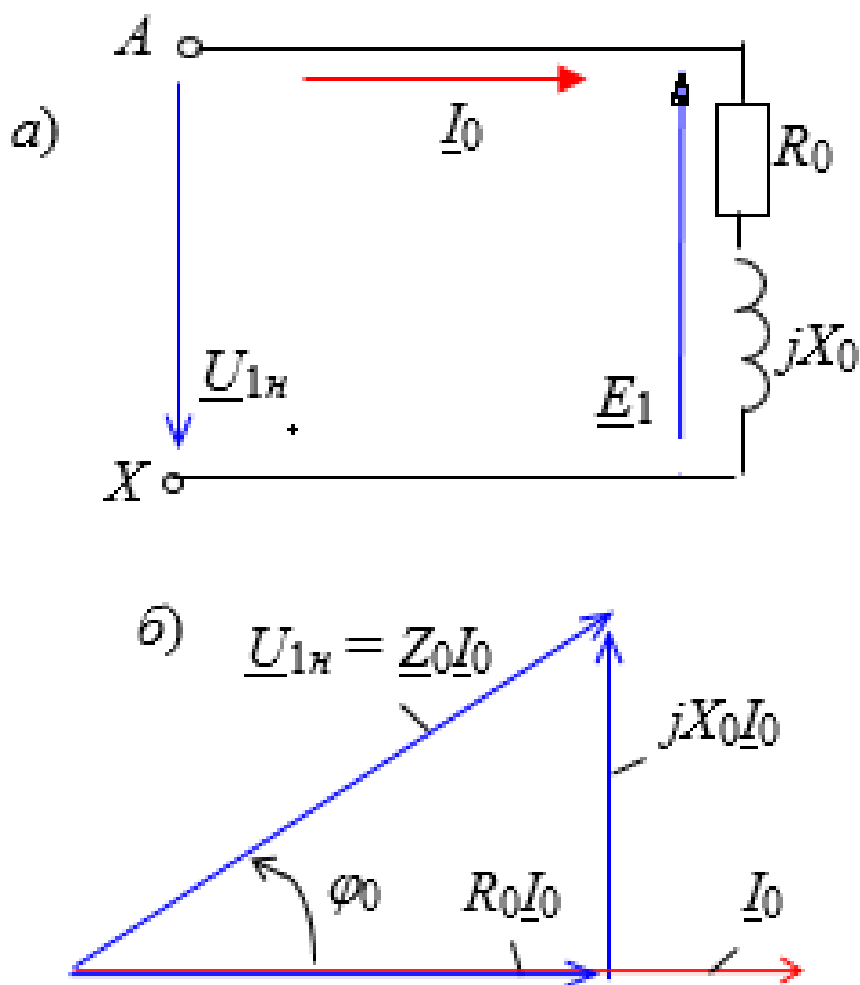


Рис. 5.3. Опыт ХХ трансформатора:
 а) схема замещения, б) векторная диаграмма

Измерив напряжение U_{20} , ток I_0 и активную мощность P_x и пренебрегая падением напряжения на первичной обмотке $Z_1 I_0$ (ввиду его небольшого значения по сравнению с ЭДС E_1), т. е. пользуясь упрощённой схемой замещения трансформатора при ХХ (рис. 5.3, а и б), определяют:

– коэффициент трансформации:

$$n = E_1 / E_2 \approx U_{1н} / U_{20};$$

– параметры намагничивающей ветви схемы замещения трансформатора:

$$Z_0 = U_{1н} / I_0; \quad R_0 = P_x / I_0^2; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

– потери мощности при ХХ, называемые *потерями в стали* P_0 , которые затрачиваются в основном на нагрев магнитопровода от действия вихревых токов и циклического перемагничивания стали, т. е. $P_0 \approx P_x$.

При *опыте* КЗ (рис. 5.4) в отличие от опасного аварийного короткого замыкания трансформатора, возникающего случайно при работе при напряжении $U_1 = U_{1н}$, к первичной обмотке подводят такое пониженное напряжение $U_1 = U_k$ (меньше напряжения $U_{1н}$ в 8 – 20 раз в зависимости от типа и

мощности трансформатора), при котором в его обмотках устанавливаются токи, равные соответствующим номинальным значениям:

$$I_{1H} = S_n / U_{1H}; \quad I_{2H} = S_n / U_{2H} \approx nI_{1H},$$

где S_n – номинальная мощность трансформатора (в В·А или в кВ·А).

Ввиду малости магнитного потока Φ (пропорционального пониженному напряжению U_K) при опыте КЗ и соответственно потерь в стали (а они пропорциональны магнитному потоку в квадрате, т. е. Φ^2) активная мощность, потребляемая трансформатором из сети, идёт в основном на нагрев обмоток, т. е. равна электрическим потерям (называемыми *потерями в меди* P_M) в проводах обмоток:

$$P_K \approx P_M = R_1 I_{1H}^2 + R_2 I_{2H}^2 \approx (R_1 + R_2') I_{1H}^2 = R_K I_{1H}^2.$$

Измерив напряжение U_K , ток I_{1H} и активную мощность P_K , определяют:

- параметры схемы замещения при КЗ трансформатора (пользуясь упрощенной схемой замещения, рис. 5.4, а):

$$Z_K = U_K / I_{1H}; \quad R_K = P_K / I_{1H}^2; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

где $Z_K = \sqrt{R_K^2 + X_K^2}$, $R_K = R_1 + R_2'$ и $X_K = X_1 + X_2'$ – соответственно полное, активное и реактивное сопротивления КЗ трансформатора;

- напряжение КЗ (рис. 5.4, б), выраженное в процентах,

$$u_K (\%) = 100 U_K / U_{1H};$$

- потери мощности при КЗ трансформатора (*потери в меди*) $P_M \approx P_K$.

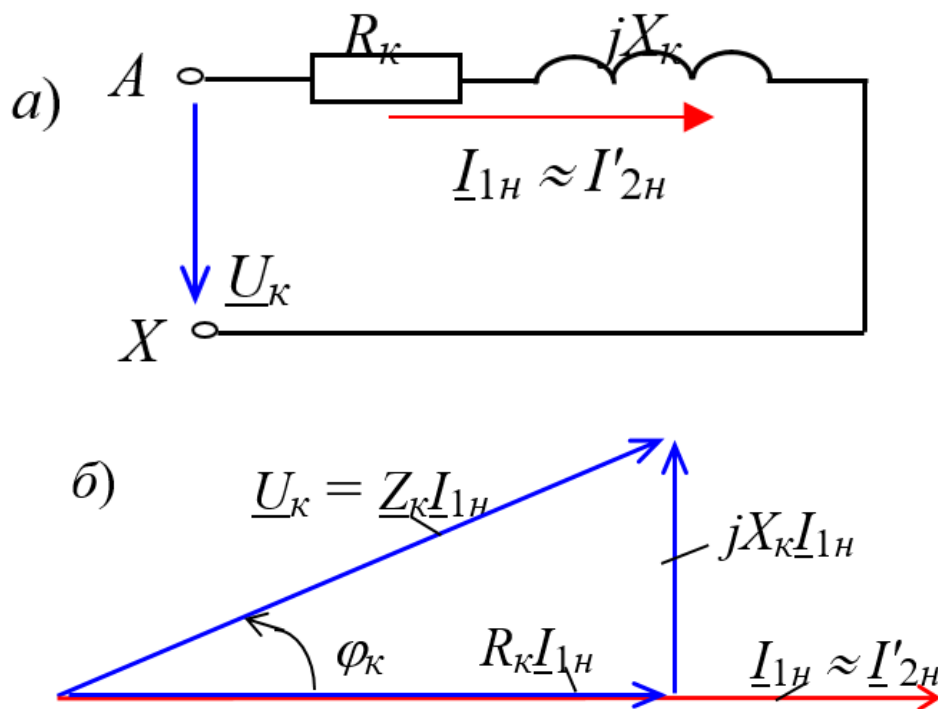


Рис. 5.4. Опыт КЗ трансформатора:

а) схема замещения, б) векторная диаграмма трансформатора

3. Внешние характеристики трансформатора

Зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки при изменяемой нагрузке от тока нагрузки, т. е. $U_2 = f(I_2)$, носит название *внешней характеристики* трансформатора (рис. 5.5).

Вторичное напряжение (см. рис. 5.5), равное

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{Z}_2 I_2 = \underline{E}_2 - (R_2 + jX_2) I_2 \approx \underline{U}_{20} - \underline{Z}_2 I_2,$$

при увеличении тока нагрузки уменьшается как за счёт увеличения падения напряжения $Z_2 I_2$ на его вторичной обмотке, так и за счёт уменьшения ЭДС E_2 (вследствие некоторого уменьшения магнитного потока Φ при соответствующем увеличении тока I_1). Однако при активно-ёмкостной нагрузке при увеличении тока напряжение U_2 увеличивается.

Внешние характеристики могут быть рассчитаны и построены, исходя из паспортных данных трансформатора, а также путём прямого измерения напряжения U_2 и тока I_2 при изменении нагрузки Z_n .

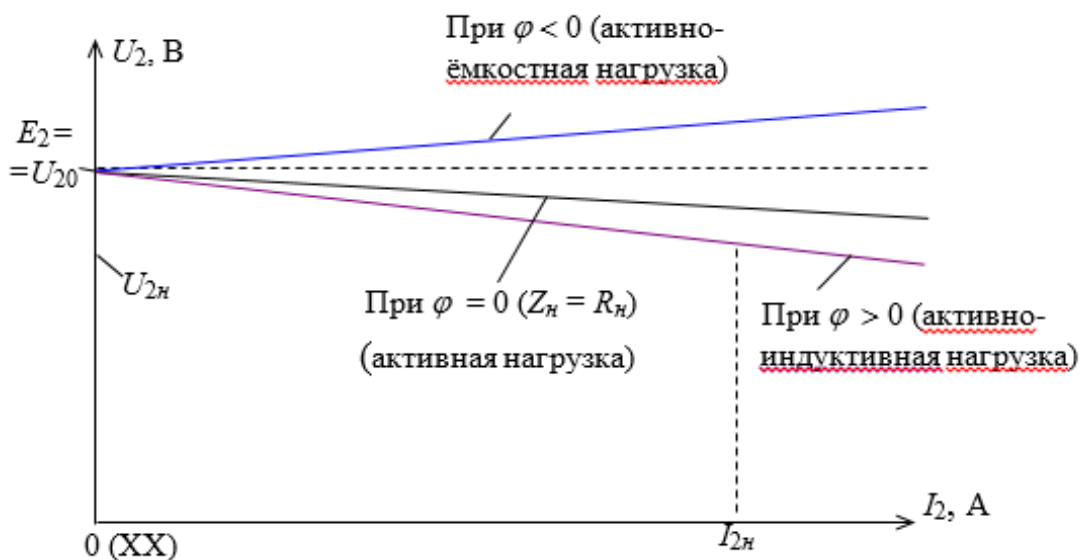


Рис. 5.5. Внешняя характеристика трансформатора

ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Провести экспериментальное исследование характеристик трансформатора.

Номер варианта трансформатора (файла электрической схемы) и числовые значения исходных данных определяются по таблице 5.1.

Вариант задания соответствует последней цифре номера зачётной книжки, ноль соответствует 10-му варианту.

Таблица 5.1 – Варианты заданий

№ варианта	Файл эл.схем	E, В	$U_{1н}$, В	$I_{1н}$, А	U_k , %
1	Lr5_1.txt	60	42,4	0,176	10
2	Lr5_2.txt	60	42,4	0,108	10
3	Lr5_3.txt	70	49,5	0,206	10
4	Lr5_4.txt	70	49,5	0,126	10
5	Lr5_5.txt	80	56,6	0,235	10
6	Lr5_6.txt	80	56,6	0,144	10
7	Lr5_7.txt	90	63,6	0,264	10
8	Lr5_8.txt	90	63,6	0,162	10
9	Lr5_9.txt	100	70,7	0,294	10
10	Lr5_10.txt	100	70,7	0,180	10

Задание 1.

Провести опыт XX трансформатора.

Запустить среду Circuit Simulator.

Открыть файл lr5_N.txt для исследования однофазного трансформатора (рис. 5.6).

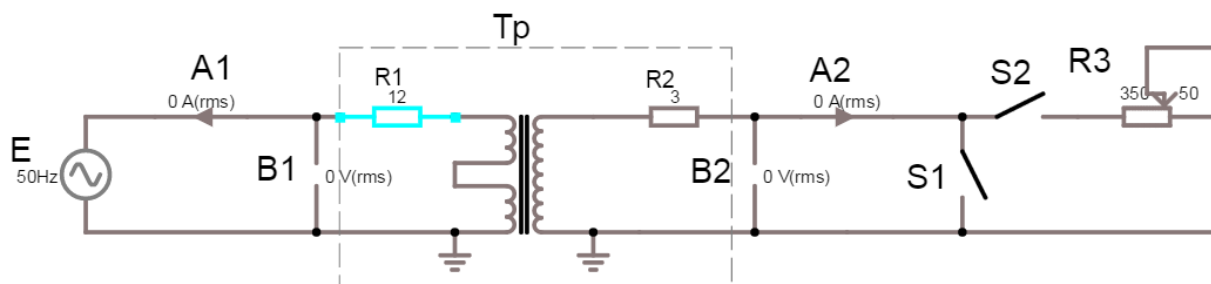


Рис. 5.6. Файл lr5_N.txt (х-вариант)

Обозначения и назначение элементов на схеме:

- E – ЭДС источника однофазного напряжения (**амплитудное** значение параметра устанавливается в соответствии с № варианта), В;
- B1 – вольтметр для измерения **действующего** значения напряжения $U_1(\text{rms})$ на первичной обмотке трансформатора: $U_{1н} = E / \sqrt{2}$;
- $f = 50$ Гц – частота сети;
- B2 – вольтметр для измерения **действующего** значения напряжения $U_2(\text{rms})$ на вторичной обмотке трансформатора;
- A1 – амперметр для измерения **действующего** значения тока $I_1(\text{rms})$ первичной обмотки трансформатора;
- A2 – амперметр для измерения **действующего** значения тока $I_2(\text{rms})$ вторичной обмотки трансформатора;

- S1 – переключение режима холостого хода (XX) и короткого замыкания (КЗ) трансформатора;
- S2 – подключение нагрузки;
- R1 – активное сопротивление первичной обмотки трансформатора;
- R2 – активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора;
- R3 – сопротивление нагрузки.

- **Установить** ЭДС источника E в соответствии с № варианта.

ВНИМАНИЕ. В окне «СВОЙСТВА» устанавливаются амплитудные значения ЭДС E.

Переключатели S1 и S2 перевести в **разомкнутое** положение (режим холостого хода XX), рисунок 5.6.

Подключить осциллограф (см. Приложение 1) к сопротивлению R01 для визуализации и измерения среднего (average) значения активной мощности P_0 , потребляемой трансформатором на холостом ходу.

Запустить программу моделирования Circuit Simulator, последовательно нажав кнопки **RESET** и **Start/STOP** симулятора.

После стабилизации формы синусоиды и показания мощности P_0 (рис. 5.8) **остановить** программу моделирования нажав кнопку Start/STOP симулятора. **При продолжительной нестабильности повторно нажать кнопки RESET и Start/STOP.**

- **Скопировать** смоделированную схему задания (рис. 5.7) и осциллограмму мощности $p(t)$ в отчёт (рис. 5.8).

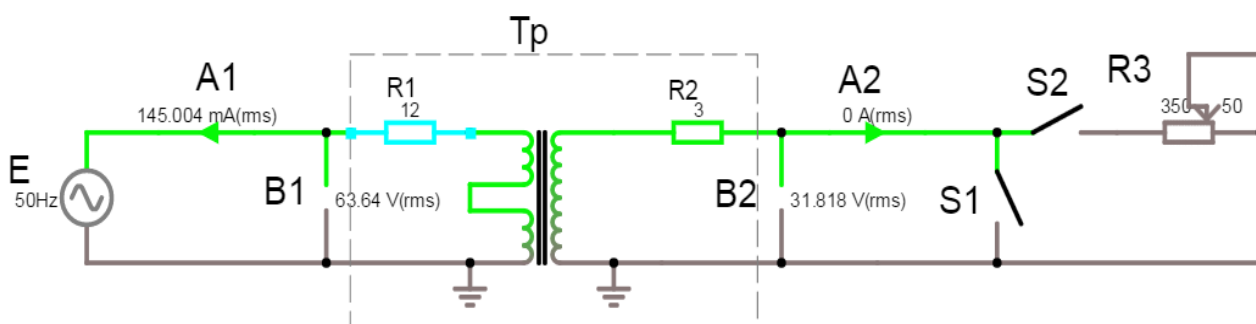


Рис. 5.7. Смоделированная схема Ir5_N.txt (пример хх-варианта).

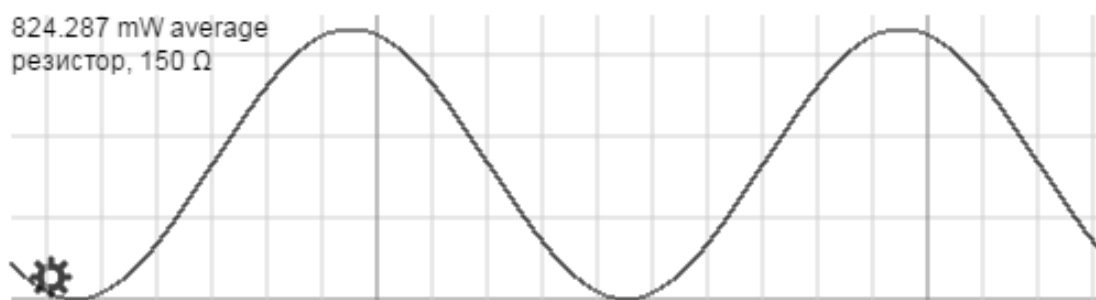


Рис. 5.8. Осциллограмма мощности P_0 , потребляемой трансформатором на холостом ходу, $P_0 = 824,287 \text{ mW average}$ (пример х-варианта).

Занести в таблицу 5.2 показания измерительных приборов **B1, B2, A1, A2** и значение мощности **P₀**.

Таблица 5.2– Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Установлено		Измерено				Вычислено						
$U_{1н},$ В	$f,$ Гц	$U_{10},$ В	$U_{20},$ В	$I_0,$ А	$P_0,$ Вт	n	$i_0,$ %	$Z_0,$ Ом	$R_0,$ Ом	$X_0,$ Ом	$\varphi_{xx},$ град	$\delta,$ град
	50											

Рассчитать и занести в таблицу 5.2 параметры XX трансформатора:

$$n = U_{10} / U_{20};$$

$$i_0 (\%) = 100 I_0 / I_{1н};$$

$$Z_0 = U_{10} / I_0;$$

$$R_0 = R_{cm} = P_0 / I_0^2;$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

$$\cos \varphi_{xx} = P_0 / (U_{10} \cdot I_0),$$

$$\varphi_{xx} = \arccos(\cos \varphi_{xx}),$$

$$\delta = 90 - \varphi_{xx}.$$

Скопировать в отчёт осциллограммы тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$, (рис. 5.9), подключив осциллограф к источнику Е. Подтвердить равенство сдвига по фазе φ_{xx} (град), вычисленного по параметрам цепи (P_0 , U_{10} и I_0), и интервалу времени Δt (ms) осциллограм по формуле:

$$\varphi_{xx} = 360^\circ \Delta t / T.$$

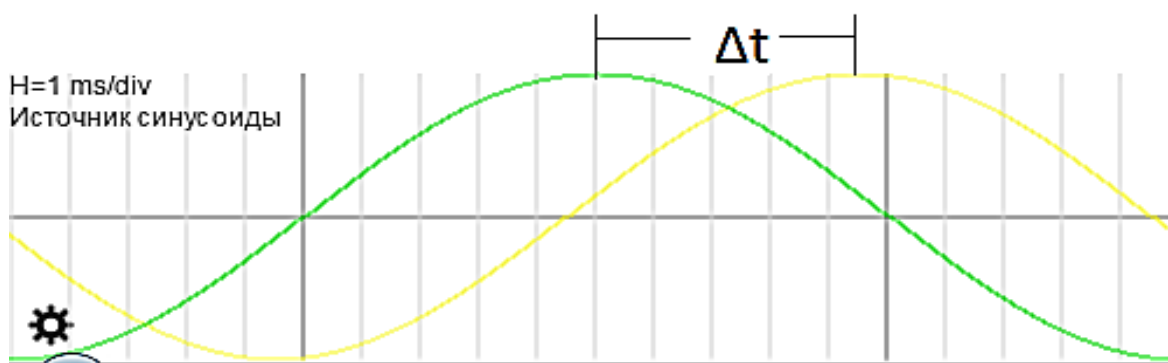


Рис. 5.9. Осциллограммы $u(t)$ и $i(t)$ (пример х-варианта)

Задание 2.

Провести опыт КЗ трансформатора.

Для этого:

Установить значение ЭДС источника E равное амплитуде напряжения короткого замыкания $U_K = u_K U_{1н} / 100$.

Поставить переключатель S1 в положение замкнуто, т. е. замкнуть накоротко вторичную обмотку трансформатора (см. рис. 5.10).

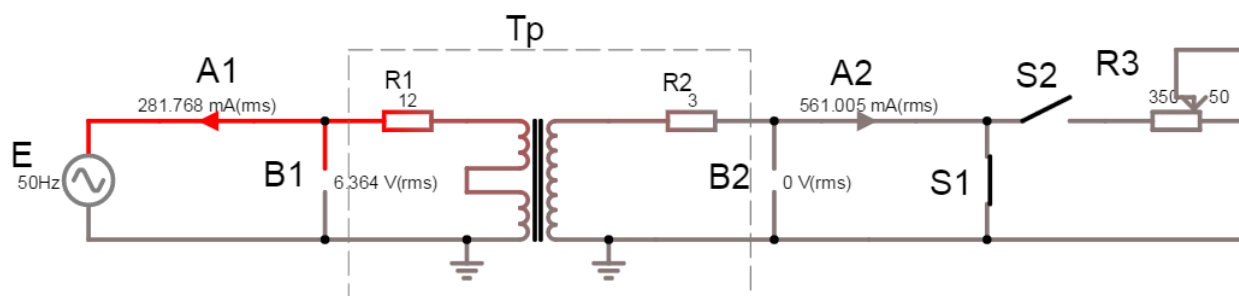


Рис. 5.10. Смоделированная схема **lr5_N.txt** в режиме КЗ (пример хх- варианта)

Запустить программу MS10 (нажать/отпустить кнопку Start/STOP симулятора)

Занести результаты измерений U_K , I_{1H} , I_{2H} и P_K в таблицу 5.3.

Таблица 5.3– Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Установлено	Измерено				Вычислено								
$E = U_K, В$	$U_K,$ В	$I_{1H},$ А	$I_{2H},$ А	$P_K,$ Вт	$u_K,$ %	$Z_K,$ Ом	$R_K,$ Ом	$X_K,$ Ом	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$X_{p1},$ Ом	$X_{p2},$ Ом	$\varphi_K,$ град

Рассчитать указанные в таблице 5.3 параметры КЗ трансформатора:

$$u_K (\%) = 100U_K / U_{1H};$$

$$Z_K = U_K / I_{1H}; R_K = P_K / I_{1H}^2; X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

$$R_1 = R_2' = R_K / 2; R_2 = R_2' / n^2;$$

$$X_{p1} = X_{p2}' = X_K / 2; X_{p2} = X_{p2}' / n^2;$$

$$\cos \varphi_K = P_K / (U_K \cdot I_{1H}),$$

$$\varphi_{xx} = \arccos(\cos \varphi_K),$$

$$\varphi_K = 360^\circ \Delta t / T.$$

Скопировать в отчёт смоделированную схему задания (рис. 5.10) и осциллограмму активной мощности P_K , потребляемой трансформатором в режиме КЗ (рис. 5.11).

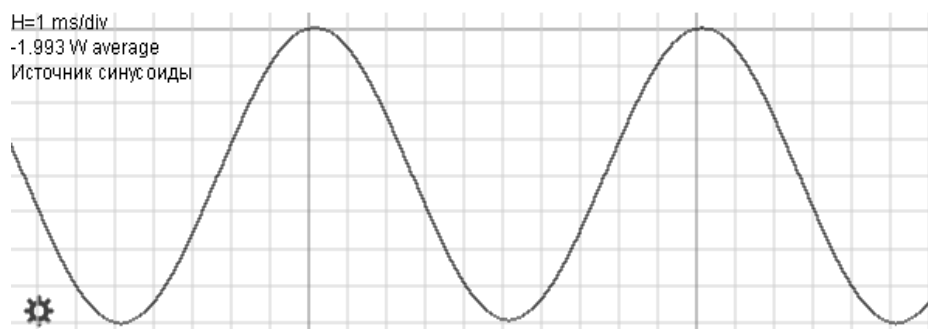


Рис. 5.11. Осциллограмма активной мощности P_K , потребляемой трансформатором в режиме КЗ, $P_K = 1.993 \text{ W average}$ (пример х-варианта)

Задание 3.

Снять внешние характеристики $U_2(I_2)$ трансформатора при резистивной нагрузке.

С этой целью:

Разомкнуть переключатель **S1** и замкнуть переключатель **S2** (см. рис. 5.7).

Установить значение ЭДС источника равное амплитуде номинального напряжения $U_{1н}$.

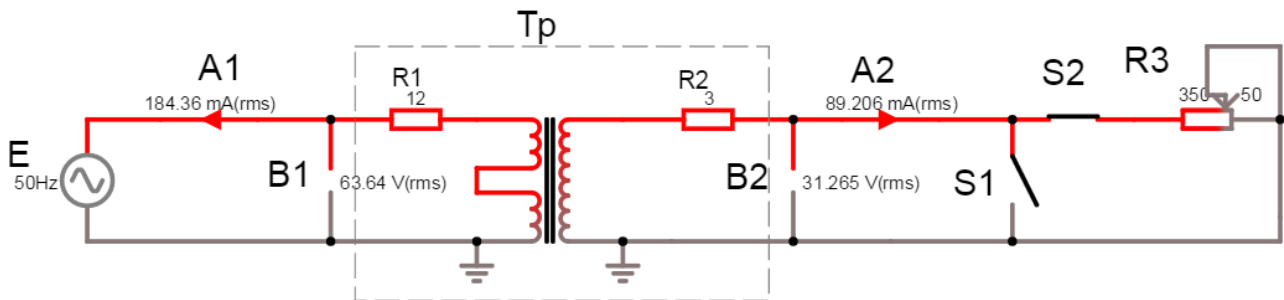


Рис. 5.12. Смоделированная схема **lr5_N.txt** в режиме нагрузки (хх-вариант)

Рассчитать номинальное сопротивление резистора нагрузки **R3**:

$$R3 = U_{2н}/I_{2н};$$

- изменяя сопротивление $R3$, **снять** показания вольтметра **B2** U_2 и амперметра **A2** I_2 , при токах 0 (XX); 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25 от тока $I_{2н}$ ($I_{2н} \approx nI_{1н}$) и занести их в таблицу 5.4;

Таблица 5.4 – Результаты измерений и расчётов параметров цепи

Нагрузка	Вторичные напряжение и ток	XX ($I_2 = 0$)	$0,25I_{2н}$	$0,5I_{2н}$	$0,75I_{2н}$	$I_{2н}$	$1,25I_{2н}$
R	$U_2, В$						
	$I_2, А$	0					

– используя данные таблицы 5.4, **построить** внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$ трансформатора при активной нагрузке (см. рис. 5.5).

Задание 4.

Начертить схему замещения нагруженного трансформатора, исключив намагничивающую ветвь с сопротивлениями R_0 и X_0 и объединив сопротивления $R_1 + R'_2 = R_k$ и $X_1 + X'_2 = X_k$ (см. рис. 5.4);

Рассчитать и **построить** векторные диаграммы нагруженного трансформатора при токе $I_1 = I_{1н}$ и нагрузках R . При этом ток $I_{1н} = I'_{2н} = I_{2н}/n$; $\underline{U}_{1н} = R_k \underline{I}_{1н} + jX_k \underline{I}_{1н} + \underline{U}'_{20}$, где $\underline{U}'_{20} = R'_2 \underline{I}'_{2н} = R'_2 \underline{I}_{1н}$.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные трансформатора.
3. Смоделированные электрические схемы испытания трансформатора.
4. Расчёт параметров трансформатора.
5. Результаты измерений и расчётов, сведенные в таблицу 5.2, таблицу 5.3 и таблицу 5.4.
6. Осциллограммы токов, напряжений и активной мощности в режимах ХХ и КЗ.
7. Схемы замещения и векторные диаграммы в режимах ХХ и КЗ.
8. Схема замещения нагруженного трансформатора с указанием значений параметров.
9. График внешней характеристики трансформатора $U_2 = f(I_2)$.
10. Выводы по работе.


БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Марченко, А. Л. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim [Текст] : учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 448с.
2. Бабичев, Ю. Е., Электротехника и электроника: Лабораторно-практические работы [Текст] / Ю. Е. Бабичев, Ф. Л. Иванников. – М.: МГТУ, 2006. – 203с.
3. Рекус, Г. Г., Лабораторный практикум по электротехнике и основам электроники [Текст] / Г. Г. Рекус, В. Н. Чесноков. – М. : Высшая школа, 2001. – 240с.
4. ГОСТ Р 52002-2003. Электротехника. Термины и определения основных понятий [Текст]. – Введ. 2003-07-01.

Инструкция по работе в среде Circuit Simulator

Начало работы

Лабораторные работы по дисциплине «Электротехника и электроника» в дистанционном формате системы МУДЛ выполняются путём компьютерного моделирования в программной среде **Circuit Simulator 1.2.0**.

Установка программы **Circuit Simulator 1.2.0** на ПК проводится посредством двойного клика левой клавиши мыши по EXE файлу программы находящемуся в ПОЯСНЕНИЯХ (СООБЩЕНИЯХ) к выполнению лабораторных работ в МУДЛ. После установки программы на рабочем столе ПК появляется иконка симулятора .

Запуск программы осуществляется кликом левой кнопки мыши по иконке симулятора . На экране появляется анимированная схема LRC-контура (рис. 1).

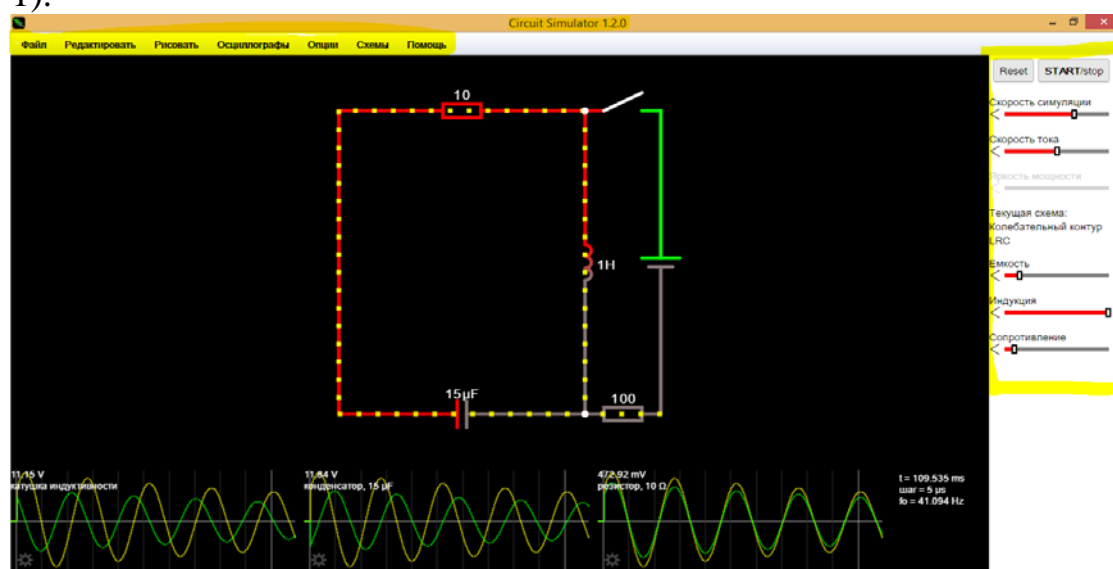


Рис. 1. Окно программы Circuit Simulator 1.2.0 при запуске программы

В верхней части окна посередине указано наименование программы и версия Circuit Simulator 1.2.0. Под названием программы располагается строка меню, содержащая в себе 7 компонентов: *файл*, *редактировать*, *рисовать*, *осциллографы*, *опции*, *схемы* и *помощь*.

В центре экрана располагается *рабочее поле*, в котором строятся электрические схемы. Слева находится панель управления симуляцией, она состоит из: кнопки перезапуска симуляции *Reset*, кнопки начала/остановки симуляции *START/stop* и ползунок *Скорость симуляции*. В некоторых работах присутствуют дополнительные ползунки, изменяющие параметры соответствующих элементов схемы.

Внизу располагаются осциллографы, на них можно увидеть значение и форму тока, напряжения и мощности, а также увидеть сдвиг фаз между током и напряжением. Подробнее работа осциллографов рассмотрена в пункте Снятие измерений.

Для открытия схемы лабораторной работы необходимо:

1. Скопировать файлы электрических схем лабораторных работ **Ir1_1.txt**, **Ir1_2.txt**, **Ir6.txt**, **Ir11_1.txt** и **Ir11_2.txt** из ПОЯСНЕНИЯ к лабораторным работам в МУДЛ на рабочий стол ПК.

2. Открыть файл электрической схемы в соответствии с номером лабораторной работы : *Файл* → *Открыть файл схемы...* (рис. 2).

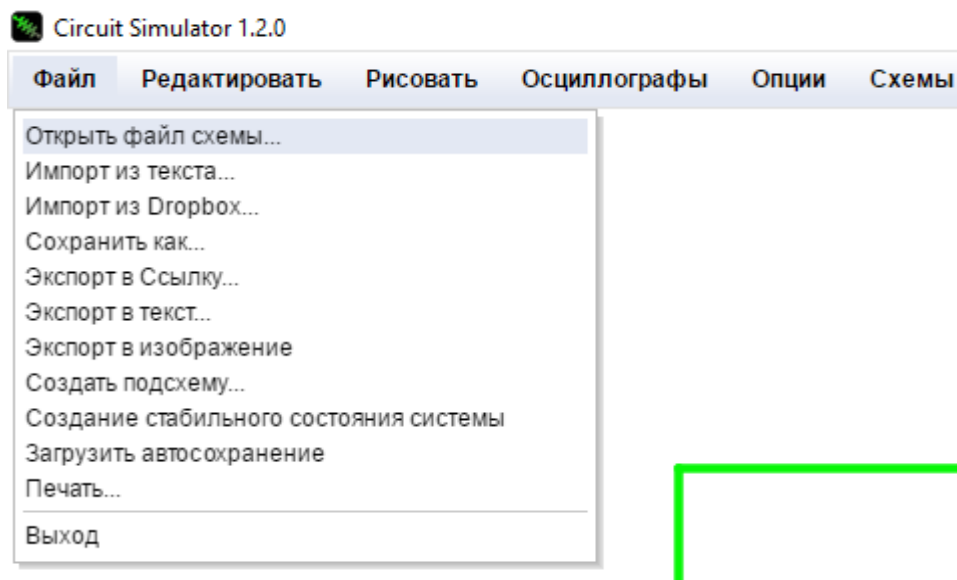


Рис. 2. Меню открытия файла

В открывшемся окне проводника операционной системы компьютера нужно выбрать файл лабораторной работы и нажать *Открыть*. При этом на рабочем поле откроется электрическая схема лабораторной работы.

Для сохранения файла схемы нужно выбрать пункт *Сохранить как....*

Появится окно сохранения схемы (рис. 3).

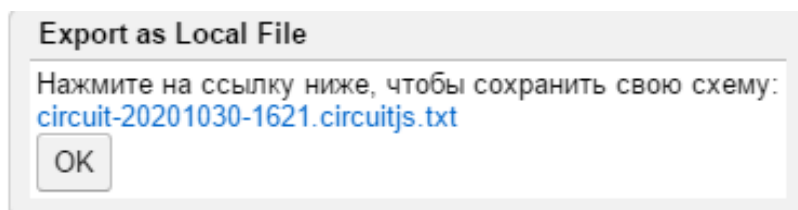


Рис. 3. Окно сохранения схемы

При нажатии на ссылку, выделенную синим цветом, откроется проводник, в котором можно переименовать файл, завершить сохранение, нажав кнопку *Сохранить*.

Важно! Схема должна быть сохранена в формате *.txt* (текстовый документ).

Изменение параметров схемы

В лабораторных работах каждому варианту соответствуют свои значения параметров элементов схемы.

Изменить значение параметра элемента схемы можно открыв окно «Свойства» двойным щелчком левой кнопки мыши (ЛКМ) по элементу.

На рисунке 4 в качестве примера изображено диалоговое окно параметров «Свойства» источника переменного напряжения.

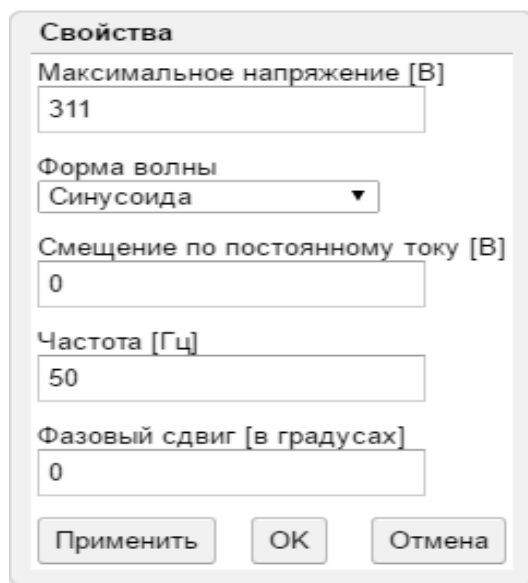


Рис. 4. Параметры источника переменного напряжения

В данном окне можно изменить значения максимального (амплитудного) напряжения, частоты и фазового сдвига. **Важно! В параметрах задается амплитудное значение напряжения, оно в $\sqrt{2}$ раз больше действующего.**

Изменение значений параметров в Circuit Simulator аналогично работе в Word. После чего нужно нажать кнопку *Ок* и *Применить*.

Изменения параметров резисторов, катушек и конденсаторов производится аналогичным образом (рис. 5) с учетом размерности единиц измерения.

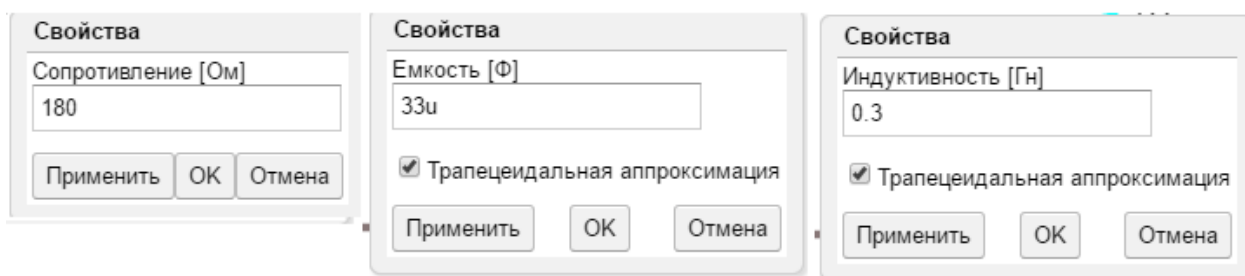


Рис. 5. Параметры резистора, конденсатора и катушки индуктивности

Измерение параметров

Для выполнения лабораторных работ необходимо выполнять измерения: токов, напряжений, мощностей и угла сдвига фаз.

Рассмотрим для примера схему с резистором и катушкой индуктивности, изображенную на рисунке 6.

В данной схеме присутствуют источник ЭДС E_1 , резистор R_1 , катушка индуктивности L_1 , амперметр PA , вольтметр PV .

На электрических схемах в симуляторе Circuit Simulator амперметр PA на схеме изображается в виде стрелки, вольтметр PV изображается в виде разрыва

цепи. Ваттметр вообще не изображается в виде элемента, а значения мощности рассчитываются аналитически.

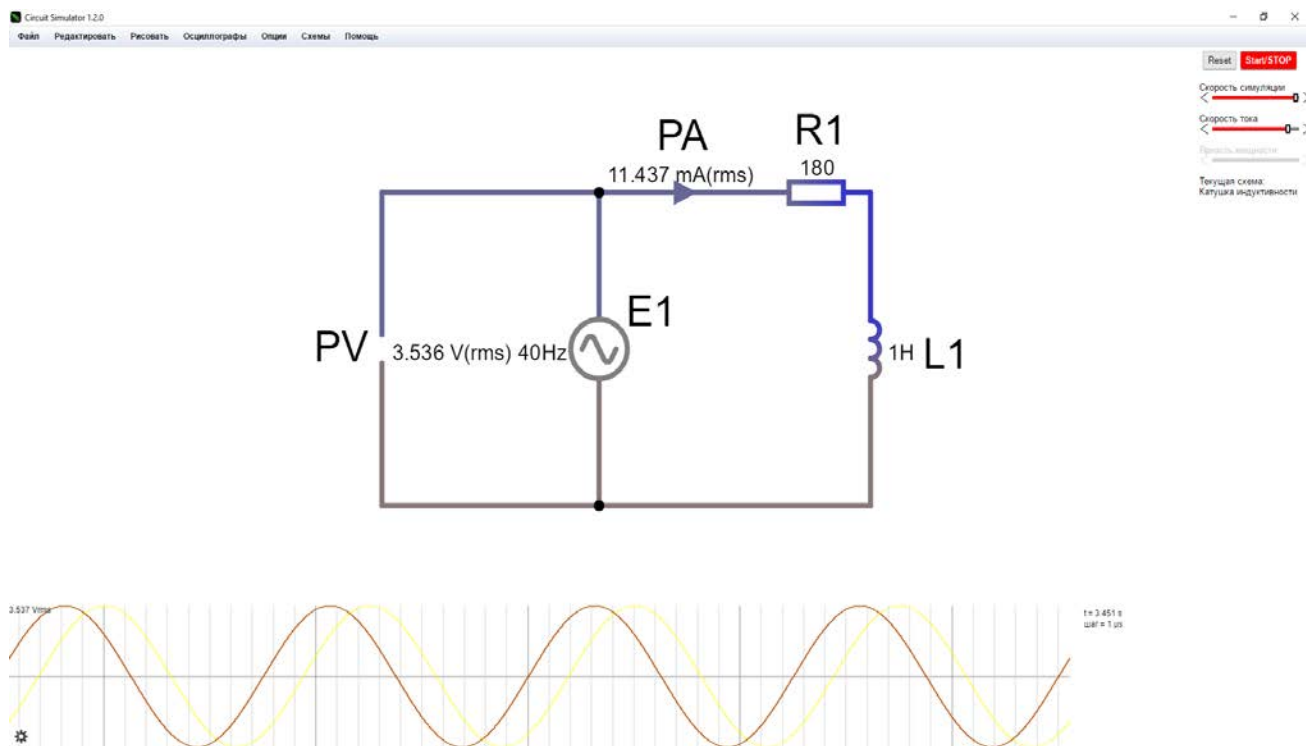


Рис. 6. Последовательное соединение катушки и резистора

Рядом с электрическими элементами показаны их параметры (сопротивление, индуктивность и т.д.), рядом с измерительными приборами показаны значения измеряемых величин. По умолчанию приборы показывают мгновенное значение. Чтобы увидеть действующее значение измеряемой величины (rms), надо двойным щелчком ЛКМ по изображению вольтметра или амперметра открыть окно «Свойства», выбрать значение «Среднеквадратичное напряжение» или «Среднеквадратичный ток» и нажать кнопку ОК.

Для получения осциллограмм напряжения или тока в необходимой точке схемы нужно подключить виртуальный осциллограф. Для этого надо навести курсор в данную точку и нажать правую кнопку мыши (ПКМ). В открывшемся окне функций выбрать пункт *Подключить осциллограф к док-панели* и нажать ПКМ. Осциллограммы тока (желтый цвет) и напряжения (красный цвет) расположены в нижней части рабочего поля (рис. 6).

Параметры осциллографа можно изменять открыв окно «*Параметры осциллографа*» (рис. 7) двумя способами: 1 – навести курсор в поле осциллограмм и нажать ПКМ, в открывшемся контекстном меню выбрать пункт *Параметры*; 2 – навести курсор на значок *шестерня* слева внизу осциллограммы.

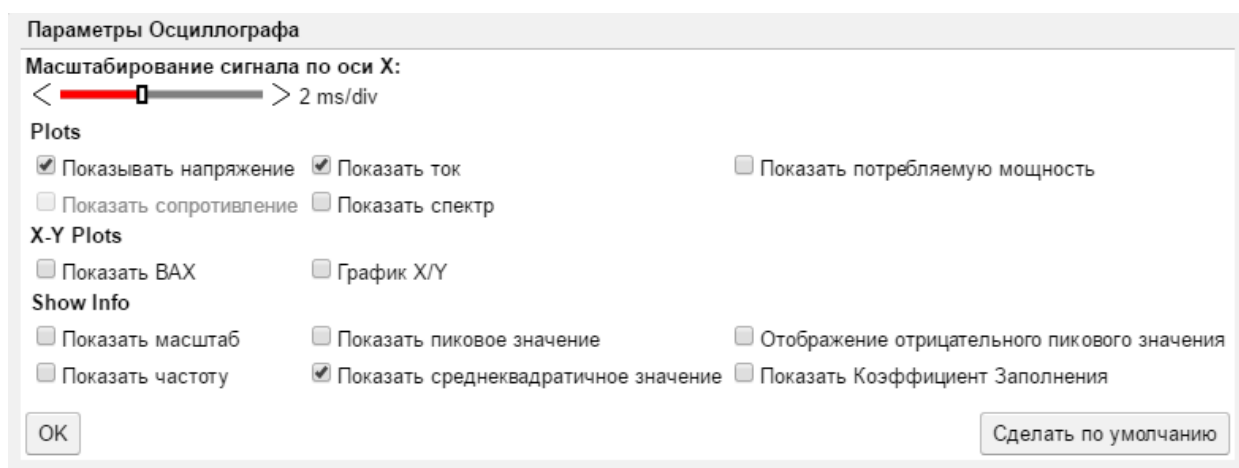


Рис. 7. Окно параметров осциллографа

В окне параметров можно выбрать, какие величины будет показывать осциллограф: ток, напряжение или мощность, и какие значения отображать: пиковое, пиковое отрицательное и среднеквадратичное. Для тока и напряжения среднеквадратичное значение равно действующему. После установки соответствующих галочек нажать ОК. Выбранные значения параметров отображаются в левом верхнем углу осциллограмм.

Также можно изменять масштаб сигнала по оси абсцисс (развёртку) ползунком в левой верхней части окна параметров. Это нужно для более точного определения угла сдвига фаз.

В файлах работ все осциллографы уже подключены.

Для измерения мощности нужно подключить осциллограф к источнику ЭДС, установить флажки *Показать потребляемую мощность* и *Отображение среднего значения*. Тогда осциллограмма примет вид, изображенный на рисунке 8. В левом верхнем углу будет отображено среднее значение мощности (Waverage). Отрицательный знак мощности означает, что источник вырабатывает мощность, положительный – потребляет.

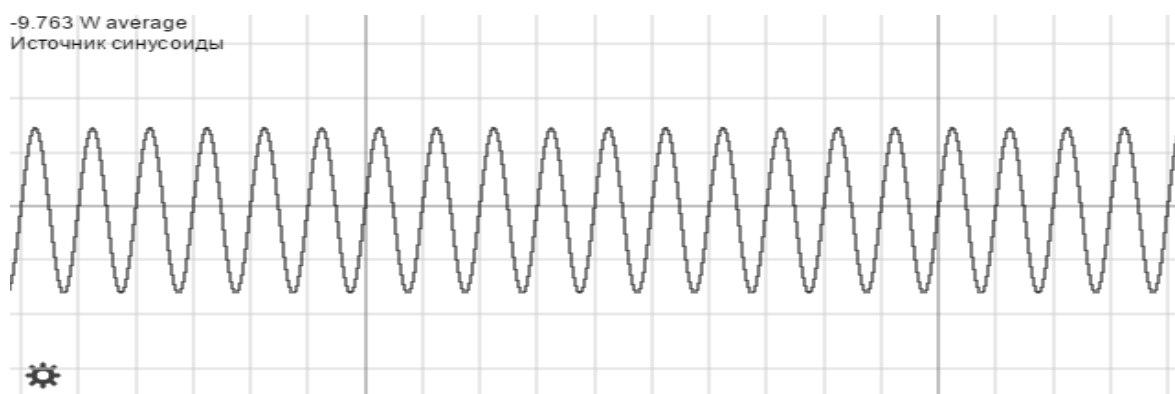


Рис. 8. Осциллограмма активной мощности

Для отображения реактивной мощности нужно подключить осциллограф к реактивному элементу (катушка или конденсатор) и установить флажки *Показать потребляемую мощность* и *Показать пиковое значение*. Тогда в левом верхнем углу осциллографа будет отображаться реактивная мощность Q (рис. 9).

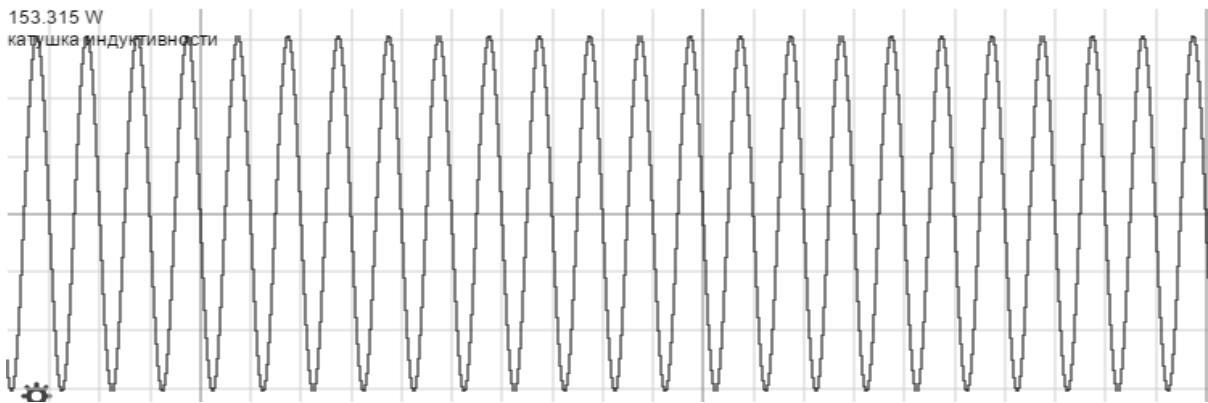


Рис. 9. Оциллограмма реактивной мощности

Для измерения угла сдвига фаз φ между синусоидальным напряжением и током в реальной цепи используют: измерители разности фаз; так называемый *метод вольтметра-амперметра-ваттметра*, а также методы, основанные на измерении временного интервала Δt при помощи электронно-лучевого осциллографа (рис. 10).

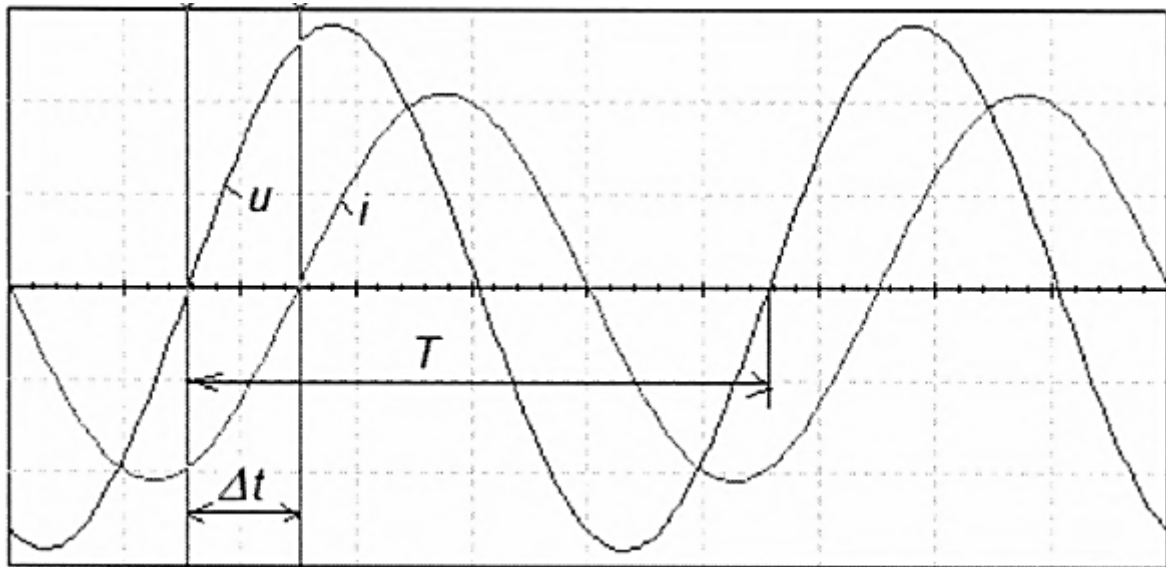


Рис.10. Измерение временного интервала Δt и периода T по оциллограмме

Временной интервал

$$\Delta t = \varphi / \omega = \varphi / 2\pi f$$

пропорционален фазовому сдвигу φ между синусоидальным напряжением и током в неразветвленной цепи и обратно пропорционален угловой частоте ω напряжения (тока).

При этом фазовый угол (в градусах) определяют по формуле

$$\varphi = 360^\circ \Delta t / T,$$

где $T = 1/f$ — период изменения напряжения в секундах (с); f — частота питающего цепь напряжения в герцах (Гц).

Временной интервал $\Delta t = T_2 - T_1$ обычно измеряют между нулевыми значениями оциллограмм напряжения и тока с помощью визирных линий. Угол φ берется со знаком "плюс", если ток отстаёт по фазе от напряжения (см. рис. 10), и со знаком "минус", если ток опережает по фазе напряжение.

Для измерения угла φ в ПО Circuit Simulator необходимо установить масштаб $200 \mu\text{s}/\text{div}$ (мкс/дел) в *свойствах* осциллографа и остановить симуляцию, нажав кнопку START/stop, когда на экране осциллографа кривые тока и напряжения пересекут ось времени. Далее поочередно определить время их пересечения с осью времени (рис. 11).

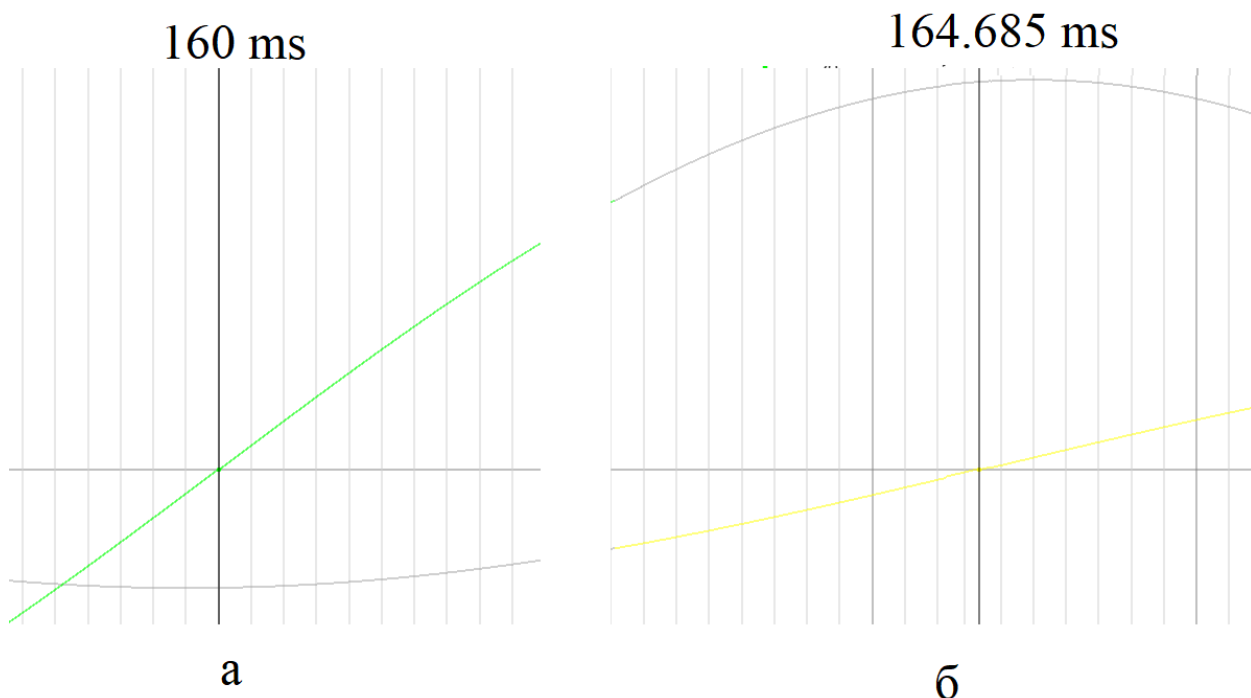


Рис. 11. Определение временного интервала Δt

В данном примере:

$$\Delta t = T2 - T1 = 164,685 \cdot 10^{-3} - 160 \cdot 10^{-3} = 4,658 \cdot 10^{-3};$$

$$\varphi = 360^\circ \Delta t / T = 360^\circ (4,658 \cdot 10^{-3}) / 0,02 = 84,5^\circ.$$

В некоторых случаях программа может отображать время с меньшей точностью. Проблему можно решить двумя способами: нажать кнопку Reset и снять значения до того, как время t превысит 1с, или определить время вручную, зная масштаб ($200 \mu\text{s}/\text{div} = 200$ мкс/деление) и время с точностью до 1 мс. При этом погрешность может достигать $\pm 5^\circ$ и полученное значение необходимо проверить с помощью метода *вольтметра-амперметра-ваттметра*.

При использовании метода вольтметра-амперметра-ваттметра угол φ определяют из уравнения $\varphi = \arccos(P/UI)$, где P – активная мощность, U и I – действующие значения напряжения и тока.

Установка программы Circuit_Simulator_1.2.0 на ПК через интернет

1. Копируем ссылку <https://github.com/SEVA77/circuitjs1/releases> в адресную строку любого браузера и нажимаем клавишу Enter.
2. Открывается сайт **github.com/comSEVA77/circuitjs1**.
3. В активах выбираем файл **Circuit_Simulator_1.2.0_x64_setup.exe** и кликаем ЛКМ (левая кнопка мыши).
4. В открывшемся окне ЗАГРУЗКИ нажимаем кнопку СОХРАНИТЬ (файл сохраняется).
5. Кликаем ЛКМ по файлу **Circuit_Simulator_1.2.0_x64_setup.exe** и в окне предупреждения системы безопасности нажимаем кнопку ЗАПУСТИТЬ.
6. После установки программы **Circuit Simulator** на ПК на рабочем столе должна появиться иконка симулятора.

