

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна
Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета
Дата подписания: 23.08.2023 17:07:03
Уникальный программный ключ:
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕ-
НИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Содержание

№ п/п	Содержание	Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование лабораторных работ	
4.	Содержание лабораторных работ	
4.1	Лабораторная работа №1. Согласование источника и нагрузки по напряжению, току и мощности.	
4.2	Лабораторная работа №2. Исследование сложных цепей постоянного тока.	
4.3	Лабораторная работа №3. Исследование цепей синусоидального тока с катушками индуктивности.	
4.4	Лабораторная работа №4. Исследование цепей синусоидального тока с конденсаторами.	
4.5	Лабораторная работа №5. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Резонанс напряжений.	
4.6	Лабораторная работа №6. Электрическая цепь синусоидального тока при параллельном включении активного и реактивных сопротивлений.	
4.7	Лабораторная работа №7. Исследование трехфазной системы при соединении потребителей звездой.	
7.8	Лабораторная работа №8. Трехфазная цепь при соединении потребителей по схеме треугольник.	
4.9	Лабораторная работа №9. Частотные характеристики последовательного резонансного контура.	
4.10	Лабораторная работа №10. Частотные характеристики параллельного резонансного контура.	
4.11	Лабораторная работа №11. Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении.	
4.12	Лабораторная работа №12. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений.	
4.13	Лабораторная работа №13. Феррорезонанс в последовательной цепи.	

4.14 Лабораторная работа №14. Исследование переходных процессов в цепи с

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- 4.15 Лабораторная работа №15. Исследование переходных процессов в цепи с индуктивностью.
- 4.16 Лабораторная работа №16. Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами.
- 4.17 Лабораторная работа №17. Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе.
- 4.18 Лабораторная работа №18. Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с помощью датчика Холла.
- 4.19 Лабораторная работа №19. Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек.
- 4.20 Лабораторная работа №20. Измерение магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов.
- 4.21 Лабораторная работа №21. Исследование поляризационной кривой сегнетоэлектрика.
- 4.22 Лабораторная работа №22. Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле.
- 4.23 Лабораторная работа №23. Исследование поверхностного эффекта и эффекта близости.
- 5 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
- 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
- 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
- 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

Приложения

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Введение

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с электронными компонентами, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электронных схем и приборов, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано одиннадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Целью дисциплины «Теоретические основы электротехники» является изучение студентами основных закономерностей процессов протекающих в электротехнических цепях и методов определения электрических величин, характеризующие эти процессы, приобретение теоретических и практических знаний по теоретическим основам электротехники, необходимых для успешного освоения последующих дисциплин специальности.

Задачи дисциплины состоят в освоении студентами:

- принципов составления и записи уравнений, описывающих процессы в цепи в соответствии с законами Кирхгофа, Ома, Фарадея - Максвелла - Ленца;
- основных принципов анализа процессов по линейным схемам замещения цепей: наложения, линейности, компенсации, взаимности;
- основных методов анализа линейных схем (методы контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного источника) и получении начальных сведений о возможности использования ЭВМ при расчетах;
- комплексного метода определения амплитуд и начальных фаз гармонических токов и напряжений в установившихся режимах;
- классического, операторного и интегрального метода анализа переходных процессов по линейным схемам замещения цепей, а также принципов составления уравнений и подготовки информации для расчета переходных процессов на ЭВМ методом переменных состояний;
- методов расчета электромагнитных процессов во взаимосвязанных контурах;
- основ теории четырехполюсников;
- методов построения фильтров и их расчета в электротехнических и электронных схемах;
- основ анализа процессов в цепях с распределенными параметрами;
- основ теории поля;
- методов электрических измерений с использованием измерительных приборов;
- основных процессов, протекающих в электрических цепях с негармоническими токами.

2. Оборудование и материалы

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Аппаратные средства:	
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Лаборатория теоретических основ электротехники, релейной защиты и электробезопасности с интерактивным мультимедиа оборудованием

– Комплект типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники».

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

3. Наименование лабораторных работ

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
3 семестр			
1	Лабораторная работа № 1. Согласование источника и нагрузки по напряжению, току и мощности. Получить практические навыки сборки схем для экспериментальной проверки согласования источника и нагрузки по напряжению, току и мощности.		
2	Лабораторная работа № 2. Исследование сложных цепей постоянного тока. Получить практические навыки сборки схем для экспериментальной проверки и расчета цепей постоянного тока с использованием закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа.	1,5	1,5
3	Лабораторная работа №3. Исследование цепей синусоидального тока с катушками индуктивности. Приобрести практические навыки сборки и анализа цепей переменного синусоидального тока с катушками индуктивности.		
4	Лабораторная работа №4. Исследование цепей синусоидального тока с конденсаторами. Приобрести практические навыки сборки и анализа цепей переменного синусоидального тока с конденсаторами.		
5	Лабораторная работа №5. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Резонанс напряжений. Опытная проверка основных соотношений для последовательной цепи переменного тока, обладающей активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.	1,5	1,5
6	Лабораторная работа №6. Электрическая цепь синусоидального тока при параллельном соединении активного и реактивных сопротив-		

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	Экспериментальная проверка зависимости активного и реактивных сопротивлений от частоты, а также соотношений между напряжением, сопротивлениями, проводимостями и токами в цепи с параллельно включенными активным сопротивлением, катушкой индуктивности и конденсатором.		
	Итого за 3 семестр:		3
4 семестр			
7	Лабораторная работа №7. Исследование трехфазной системы при соединении потребителей звездой. Ознакомиться опытным путем с особенностями соединения звездой приемников электрической энергии в цепи трехфазного тока. Исследовать режимы равномерной и неравномерной нагрузок, а также работу системы при обрыве одной из фаз. Получить практические навыки расчета и испытания трехфазных цепей, а также построения векторных диаграмм.		
8	Лабораторная работа №8. Трехфазная цепь при соединении потребителей по схеме треугольник. Исследовать особенности работы трехфазной цепи при соединении симметричного и несимметричного потребителей треугольником, усвоить построение векторных диаграмм по результатам эксперимента.	1,5	
9	Лабораторная работа №9. Частотные характеристики последовательного резонансного контура. Исследовать частотные характеристики последовательного резонансного контура.		
10	Лабораторная работа №10. Частотные характеристики параллельного резонансного контура. Исследовать частотные характеристики параллельного резонансного контура.		
11	Лабораторная работа №11. Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении. Приобрести практические навыки сборки и анализа линейных электрических цепей при периодическом несинусоидальном напряжении.		
12	Лабораторная работа №12. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений. Изучение студентами вольтамперных характеристик диодов и биполярных транзисторов.		
	Лабораторная работа №13. Феррорезонанс в		

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
 ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	Изучение студентами вольтамперных характеристик и триггерного эффекта в последовательной феррорезонансной цепи.		
14	Лабораторная работа №14. Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью. Закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих ёмкость, практическая проверка результатов расчёта.	1,5	
15	Лабораторная работа №15. Исследование переходных процессов в цепи с индуктивностью. Закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих индуктивность, практическая проверка результатов расчёта.		
	Итого за 4 семестр:		
5 семестр			
16	Лабораторная работа №16. Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами. Исследовать установившиеся электромагнитные процессы в длинной линии без потерь в режимах холостого хода и короткого замыкания; изучить влияние величины и характера нагрузки на режим работы линии.	1,5	
17	Лабораторная работа №17. Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе. Получение картины силовых линий, моделируемых плоскопараллельным электромагнитным и электростатическим полем на токопроводящем листе и определение его напряженности или индуктивности в отдельных точках.		
18	Лабораторная работа №18. Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с помощью датчика Холла. Измерение и расчет индуктивности вдоль оси цилиндрической и кольцевых катушек.		
19	Лабораторная работа №19. Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек. Определение опытным и расчётным путем зависимости взаимной индуктивности двух соосных одинаковых катушек от расстояния между ними.	1,5	
20	Лабораторная работа №20. Измерение магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов. Проверка закона полного тока.		
21	Лабораторная работа №21. Исследование по- двигательной способности сегнетоэлектрика.		

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	Экспериментальное получение на экране осциллографа кулон-вольтной характеристики нелинейного конденсатора и расчет поляризационной характеристики диэлектрика.		
22	Лабораторная работа №22. Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле. Определение опытным и расчетным путем зависимости электромагнитной силы от тока в катушке.		
23	Лабораторная работа №23. Исследование поверхностного эффекта и эффекта близости. Исследование распределения тока в массивных проводниках.		
	Итого за 5 семестр:	3	
	Итого:	9	3

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа №1. Согласование источника и нагрузки по напряжению, току и мощности

Цель работы: Получить практические навыки сборки схем для экспериментальной проверки согласования источника и нагрузки по напряжению, току и мощности

Основы теории:

Выходные величины напряжения, тока и мощности источника напряжения зависят от его первоначального напряжения (ЭДС) и внутреннего сопротивления, так же как от подключенной к нему нагрузки.

Режим называется согласованным, если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника. При этом в нагрузке потребляется максимальная мощность.

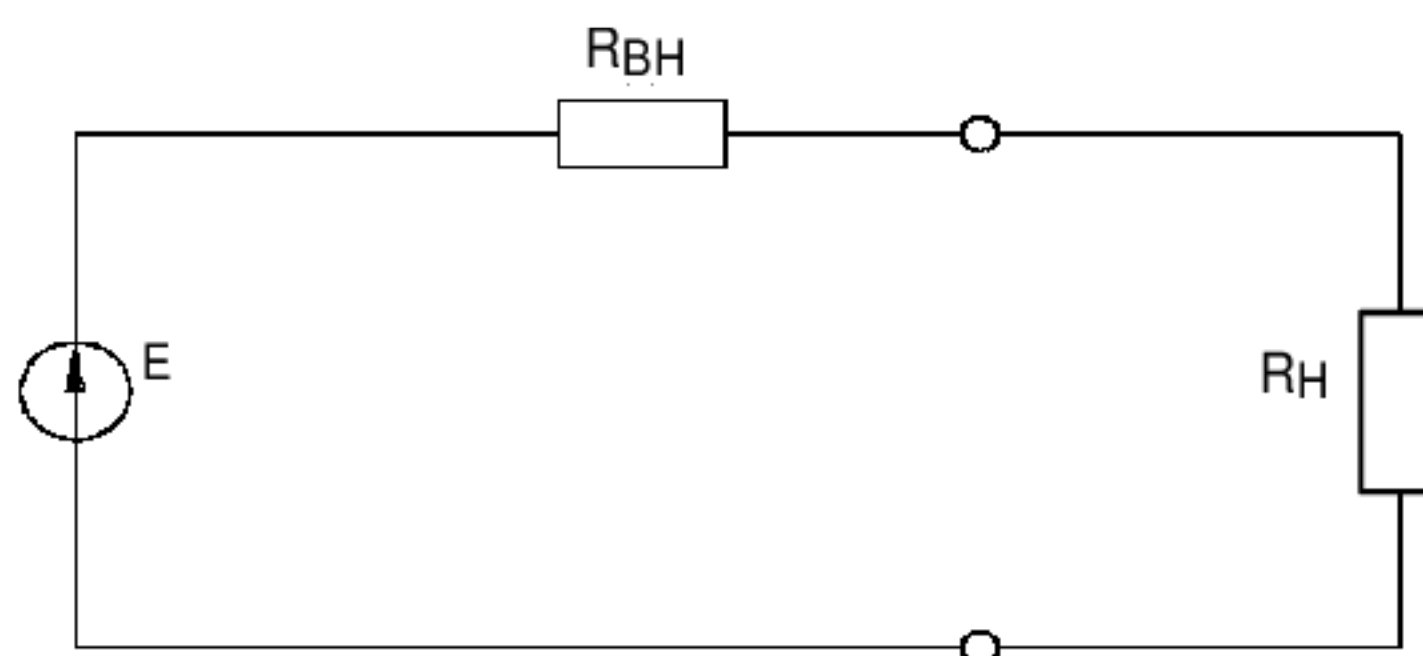


Рисунок 1 – Принципиальная схема электрической схемы

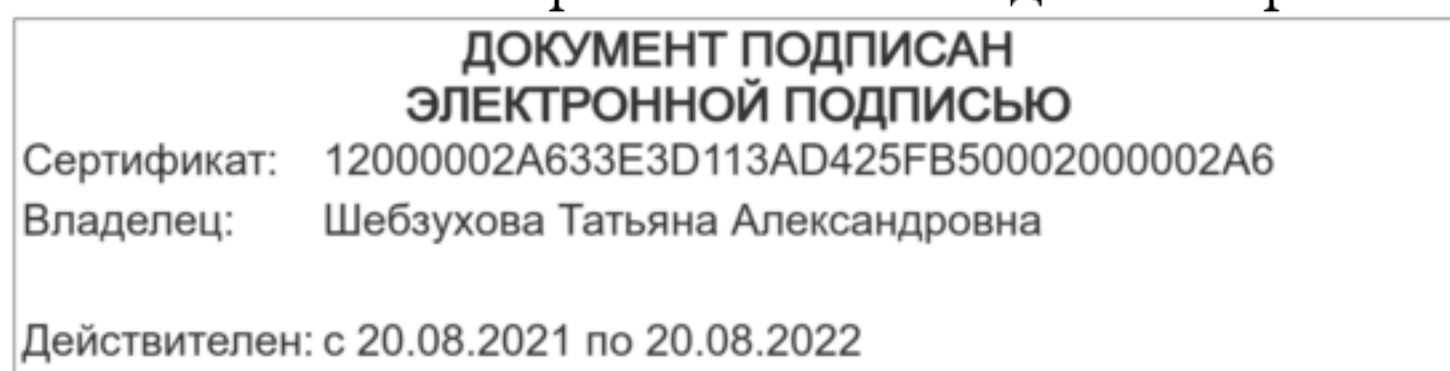
Указание по технике безопасности:

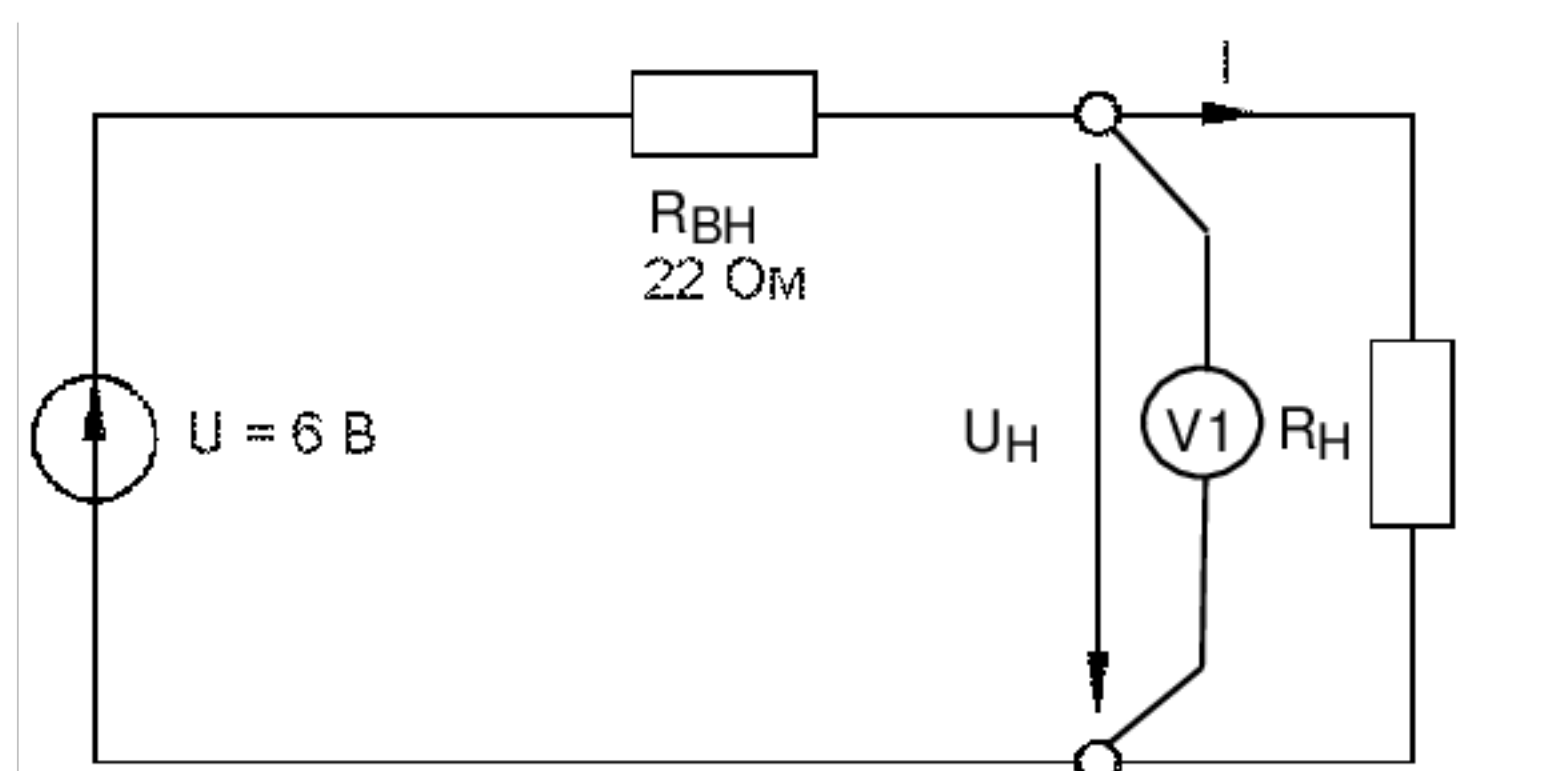
Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите цепь согласно схеме. Поскольку используемый источник питания сам по себе стабилизированный, что означает фактически $R_{вн} = 0$, он дополнен последовательно включенным резистором 22 Ома, имитирующим внутреннее сопротивление.

Затем следует измерить напряжение U_H и ток I_H при значениях сопротивления нагрузки R_H , указанных в табл. 1. Они могут быть набраны с использованием последовательного и параллельного соединения резисторов.

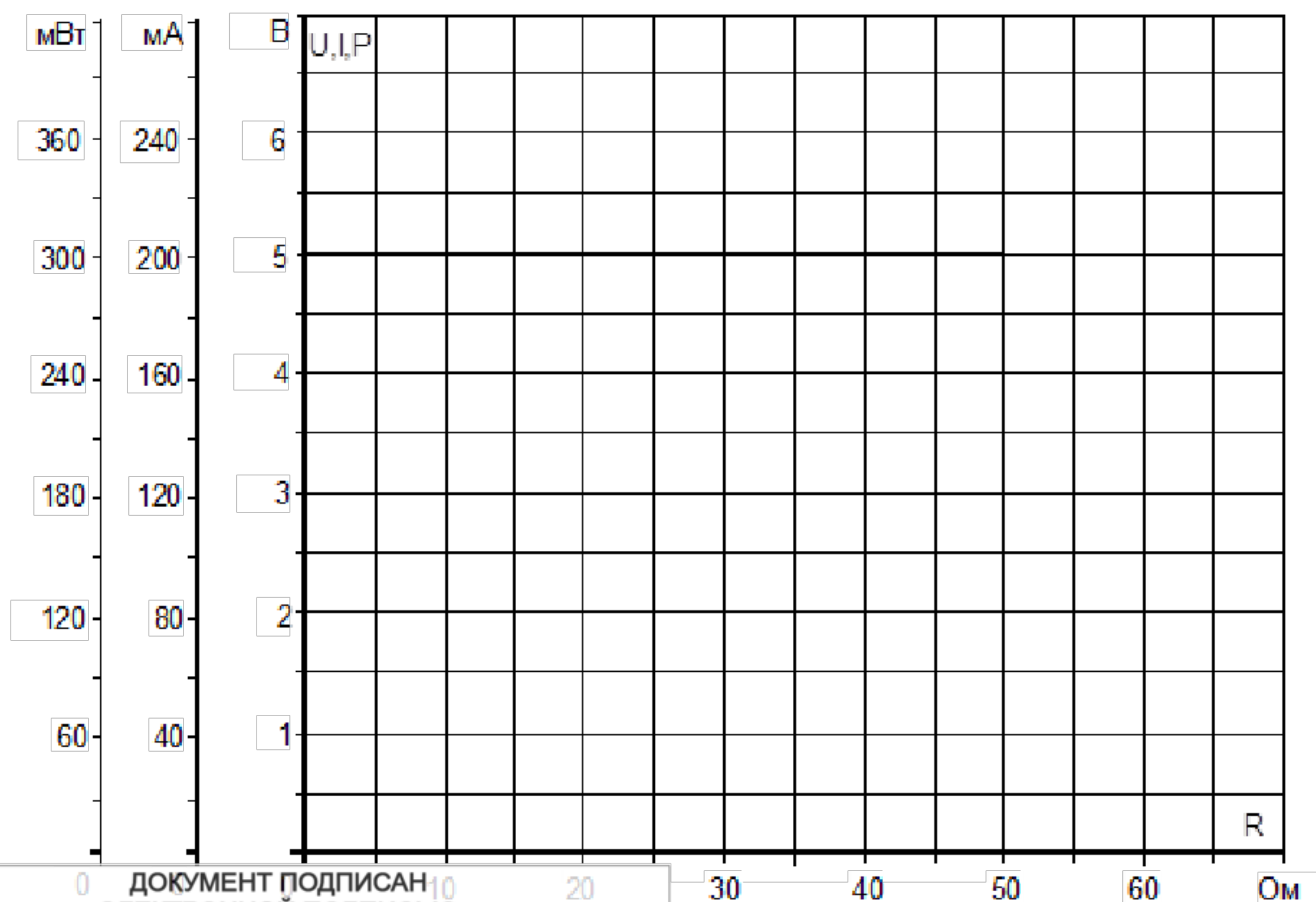




$R_H, \text{Ом}$	0	6,9 (10 22)	13,2 (22 33)	22	33	43 (10+33)	55 (22+33)	65 (22+33+10)	∞
$U_H, \text{В}$									
$I_H, \text{мА}$									
$P, \text{мВт}$									

Мощность источника напряжения рассчитывается по формуле $P = U \cdot I$ или измеряется непосредственно виртуальным ваттметром.

Занесите все величины в табл. 10.1 и на график (рис. 10.3) для построения кривых $I_H = f(R_H)$, $U_H = f(R_H)$ и $P = f(R_H)$.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

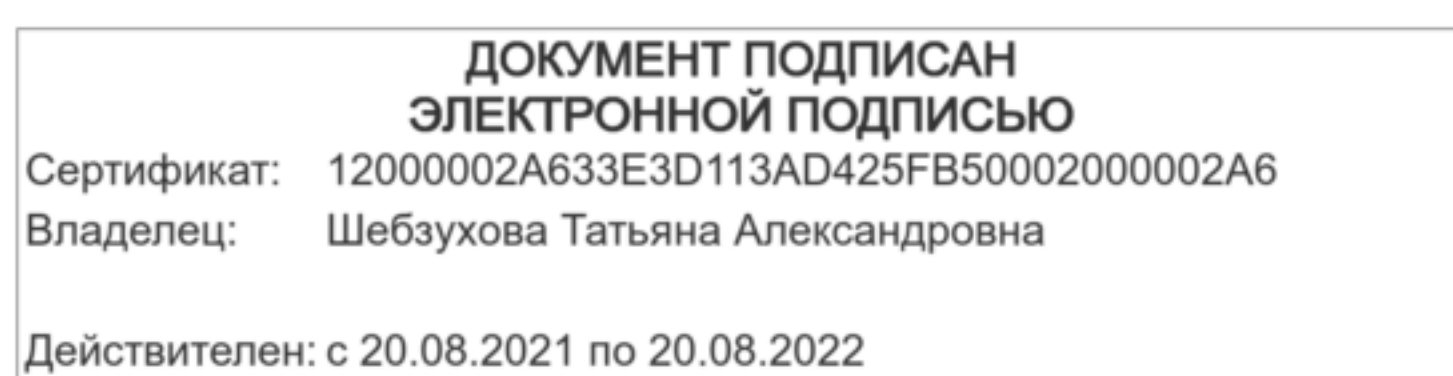
Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Когда имеют место согласование по току, согласование по напряжению и согласование по мощности?



Лабораторная работа №2. Исследование сложных цепей постоянного тока

Цель работы: Получить практические навыки сборки схем для экспериментальной проверки и расчета цепей постоянного тока с использованием закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа.

Основы теории:

Сложной цепью постоянного тока называют электрическую цепь, состоящую из нескольких сопротивлений и источников напряжения, соединенных между собой тем или иным способом.

Узлом электрической цепи называется место соединения трех и более ветвей цепи. При наличии в схеме n таких узлов можно составить $(n - 1)$ уравнений согласно первому закону Кирхгофа. В соответствии с этим законом сумма токов, подходящих к узлу, равна сумме токов, отходящих от узла, или алгебраическая сумма всех токов в узле равна нулю, т.е. $\sum I = 0$. При этом необходимо токи, подходящие к узлу, записывать в уравнение с одним знаком (например «+»), а токи, отходящие от узла – с противоположным знаком.

При последовательном соединении нескольких сопротивлений (рис. 1.1 а) общее сопротивление участка равно сумме всех сопротивлений на этом участке: $R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3$. Ток на участке цепи с несколькими последовательно соединенными сопротивлениями будет равен (по закону Ома):

$$I = \frac{U}{R_{\Sigma}}$$

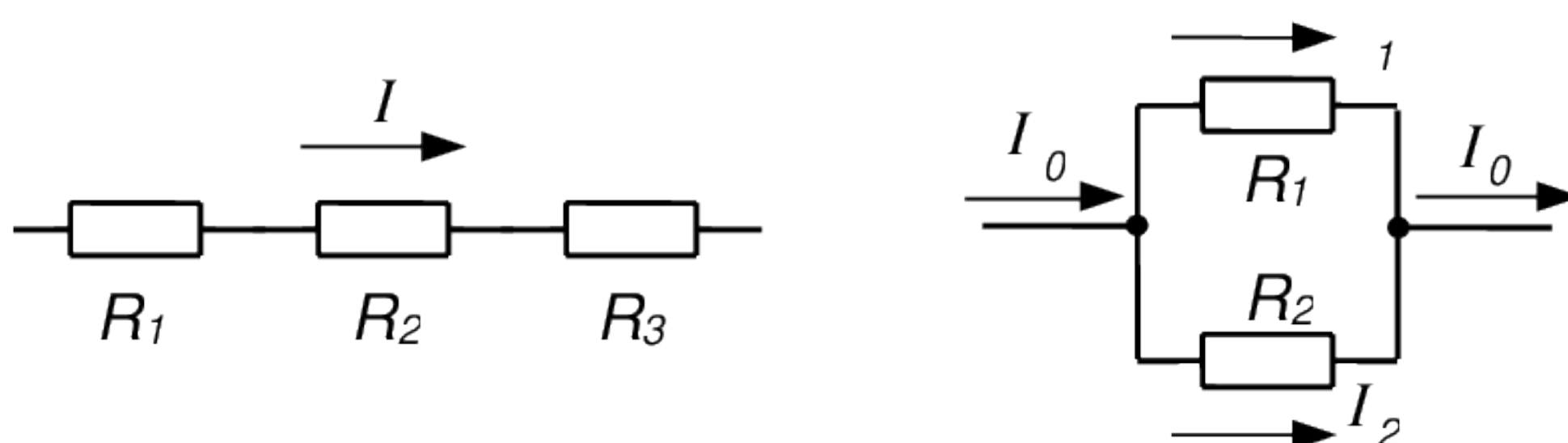
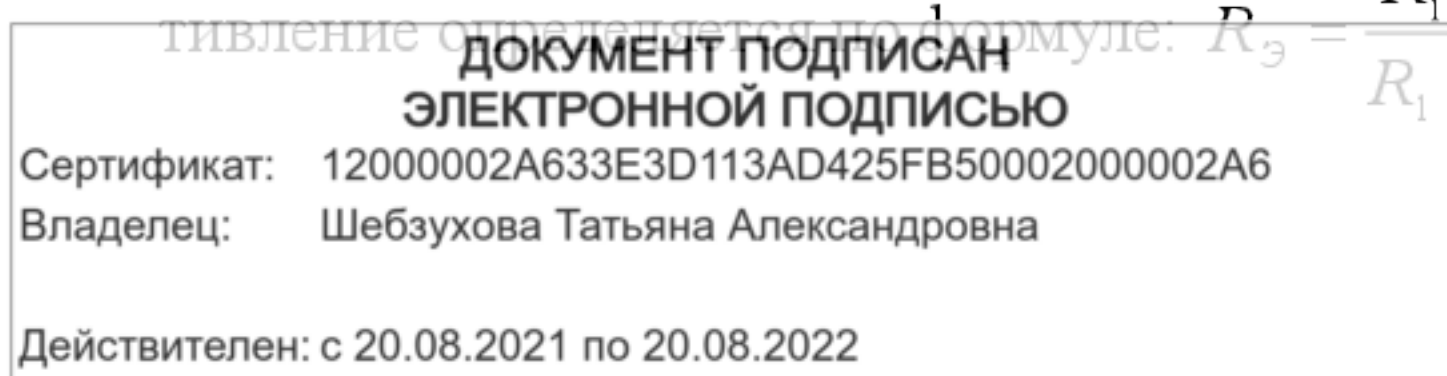


Рисунок 1.1 – Последовательное (а) и параллельное (б) соединение сопротивлений

При параллельном соединении двух сопротивлений (рис. 1, б) эквивалентное сопро-

тивление определяется по формуле: $R_{\Sigma} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.



Если известен ток I_0 , протекающий по неразветвленной части цепи, то токи I_1 и I_2 в сопротивлениях R_1 и R_2 можно определить по формулам:

$$I_1 = I_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

При трех параллельно включенных сопротивлениях (рис. 1.2) эквивалентное сопротивление будет равно:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}.$$

Ветвью электрической цепи называется участок электрической цепи, заключенный между двумя узлами (например, контур *abefa* на рис. 1.3).

В каждом контуре между электродвижущими силами (э.д.с.), имеющимися в цепи, и падениями напряжения на отдельных участках существует строго определенная зависимость, определяемая вторым законом Кирхгофа:

$$\sum E = \sum IR,$$

т.е. алгебраическая сумма электродвижущих сил в данном контуре равна алгебраической сумме падений напряжений на участках цепи этого контура.

Для того, чтобы правильно записать уравнение по второму закону Кирхгофа, необходимо задаться направлением обхода этого контура (например, по ходу часовой стрелки). Если при обходе контура направление э.д.с. совпадает с направлением обхода, то ее записывают в левую часть уравнения со знаком «+», а если ее направление не совпадает с направлением обхода, то ее считают со знаком «-». Аналогично поступают со знаками падений напряжений. Если направление тока на участке цепи совпадает с направлением обхода, то IR на этом участке записывают со знаком «+», в противном случае – со знаком «-».

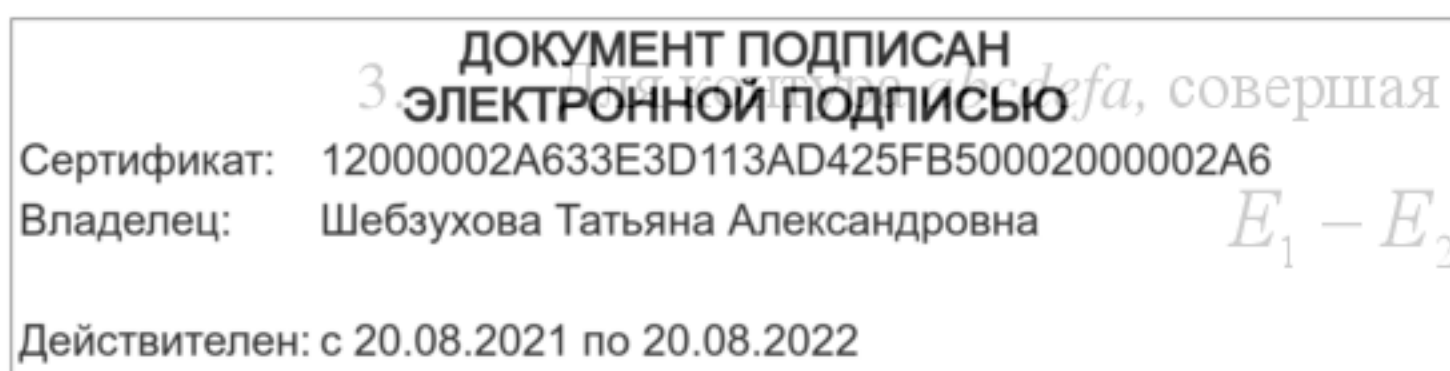
Покажем это на примере (рис. 1.3)

1. Для контура *abefa*, совершая обход по часовой стрелке, получим:

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3$$

2. Для контура *bcedb*, совершая обход против часовой стрелки, получим:

$$E_1 = I_2 R_2 + I_3 R_3$$



3 Для контура *abefa*, совершая обход по часовой стрелке, получим:

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Подобрать приборы, необходимые для выполнения работы, ознакомиться с ними и записать технические данные источников э.д.с., реостатов, измерительных приборов.
2. Собрать схему для проверки первого закона Кирхгофа (рис.1.2). Установить максимальные значения сопротивлений реостатов и измерить после замыкания ключа $Kл1$ токи в параллельных ветвях и общий ток цепи I_0 . Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

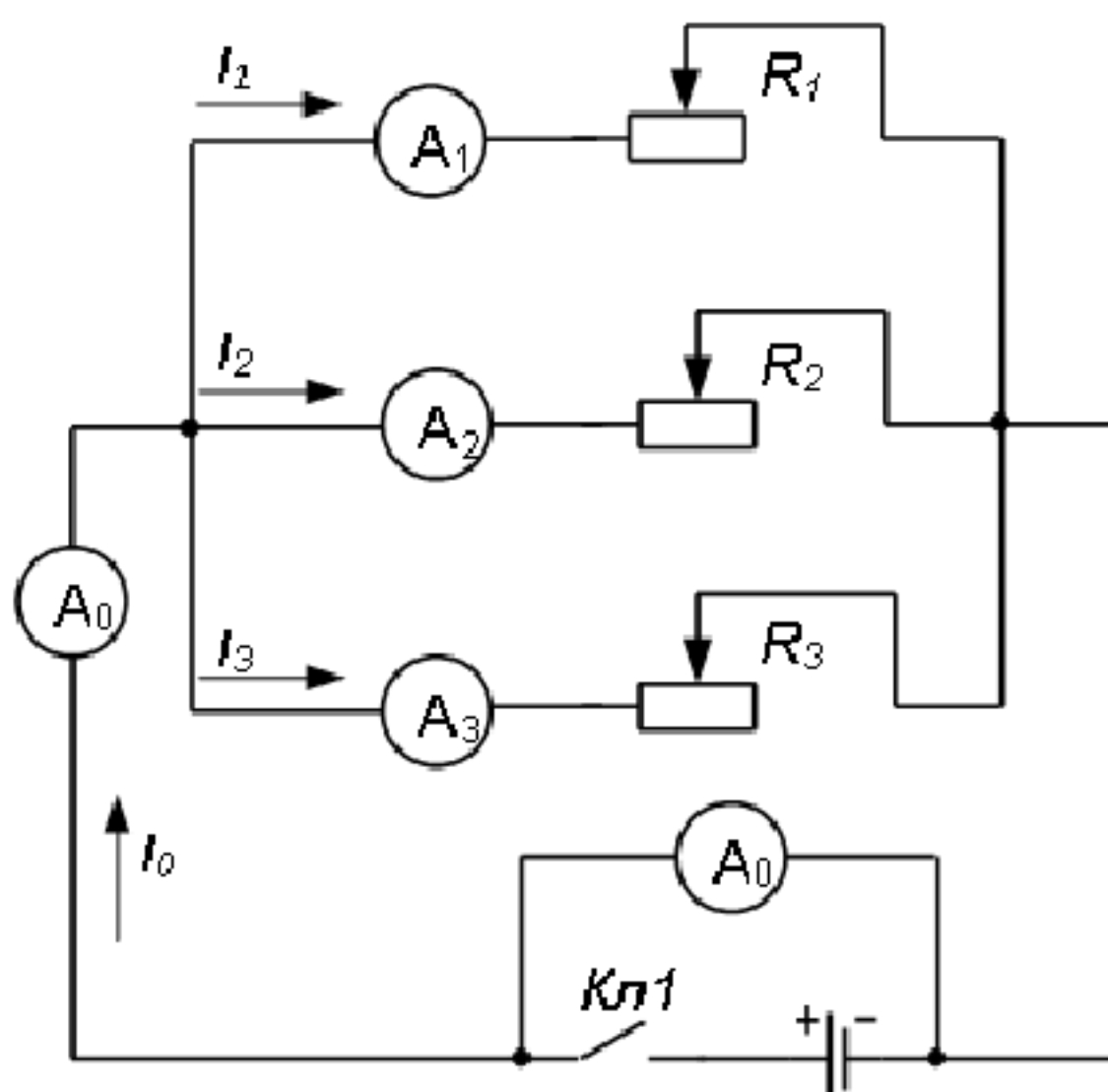


Рисунок 1.2 – Схема для проверки первого закона Кирхгофа

В опыте 1.2 следует передвинуть ползунки реостатов произвольно, наблюдая, чтобы стрелки амперметров не зашкаливали.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Результаты измерений					Результаты вычислений				
Обознач.	I_0	I_1	I_2	I_3	U	R_1	R_2	R_3	R_3	γ_0
Ед. изм.	A	A	A	A	B	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$\%$
Опыт 1										
Опыт 2										

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

По закону Ома вычислить сопротивление каждого реостата и эквивалентное сопротивление схемы R_{Σ} . Вычислить относительную погрешность измерений $\gamma_0 \%$ по формуле:

$$\gamma = \frac{I_0 - (I_1 + I_2 + I_3)}{I_0} \cdot 100\%$$

3. Собрать схему (рис. 1.3) для проверки второго закона Кирхгофа.

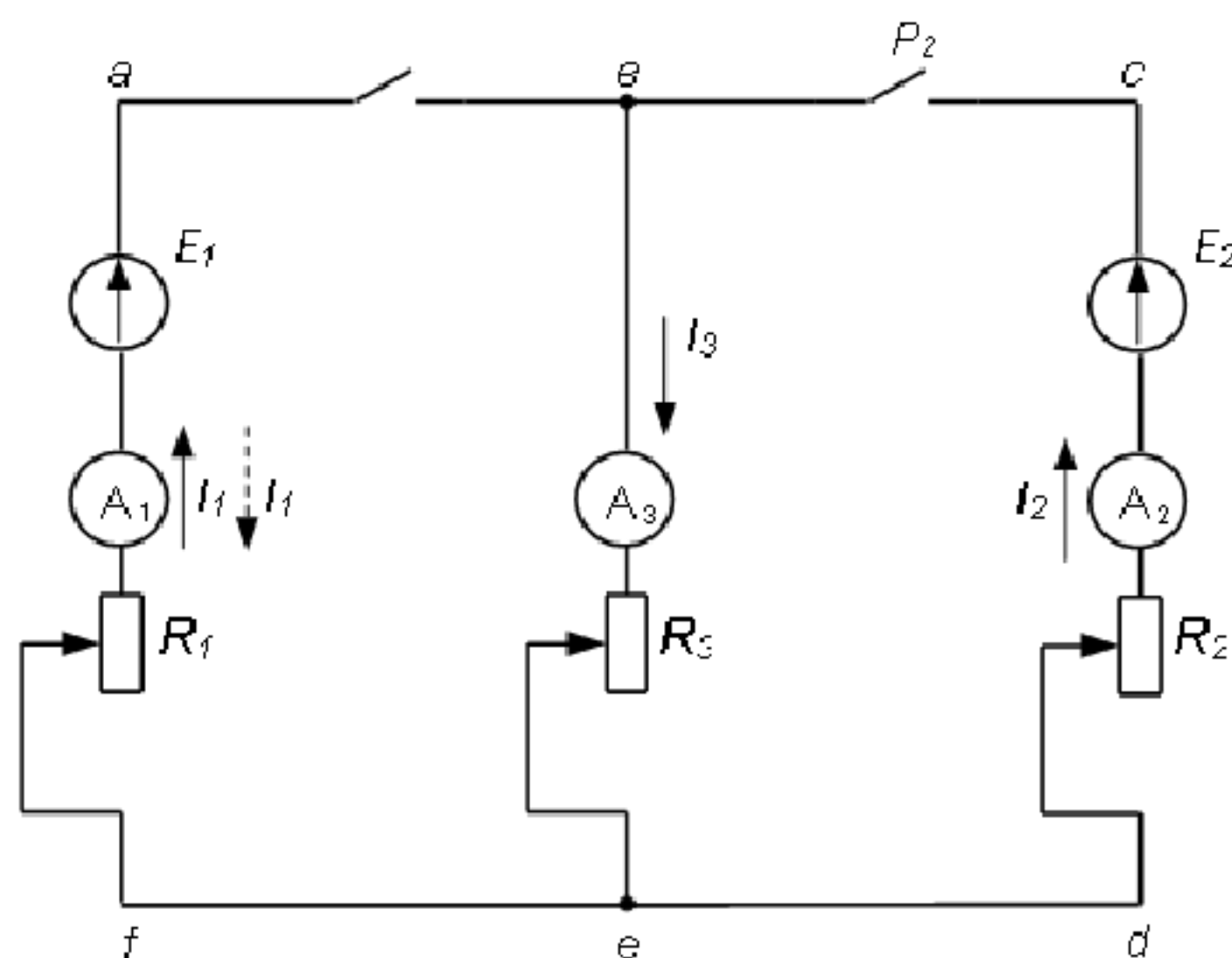


Рисунок 1.3 – Схема для проверки второго закона Кирхгофа

При разомкнутых рубильниках P_1 и P_2 измерить вольтметром величины э.д.с. каждого аккумулятора. Сопротивления реостатов R_1 , R_2 и R_3 измерить омметром. Токи на отдельных участках цепи измерить для трех случаев:

Опыт 1 – рубильник P_1 замкнут, P_2 – разомкнут.

Опыт 2 – рубильник P_2 замкнут, P_1 – разомкнут.

Опыт 3 – оба рубильника P_1 и P_2 замкнуты.

Результаты измерений и известные величины внутренних сопротивлений источников э.д.с. r_{01} и r_{02} занести в таблицу 2.

Таблица 1.2 – Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Результаты измерений								Известные величины		Результаты вычислений				
	E_1	E_2	I_1	I_2	I_3	U_1	U_2	U_3	r_{01}	r_{02}	R_1	R_2	R_3	ΣIR	γ_0
	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>B</i>	<i>%</i>
Опыт 1															
Опыт 2															
Опыт 3															

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

По результатам измерений и вычислений сделать вывод о применимости второго закона Кирхгофа для расчета цепей постоянного тока.

Вычислить относительную погрешность для каждого из трех опытов

$$\gamma_0 = \frac{\Sigma E - \Sigma IR}{\Sigma E} \cdot 100\%$$

Для одного из контуров проверить баланс мощностей:

$$\Sigma EI = \Sigma I^2 R + \Sigma I^2 r_0$$

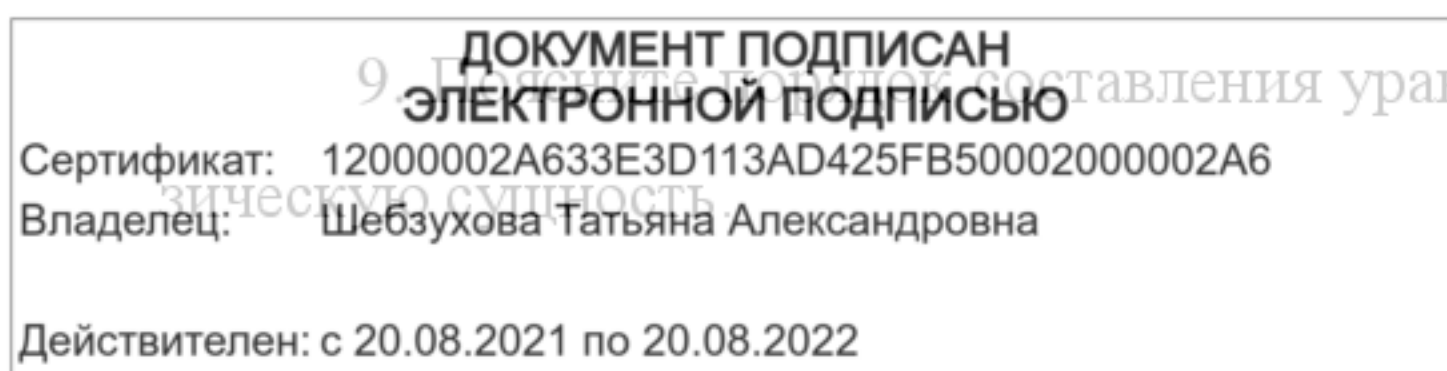
Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте закон Ома для участка электрической цепи, содержащего и не содержащего источник э.д.с..
2. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
3. Какие контуры схемы замещения являются независимыми?
4. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
5. От чего зависят знаки слагаемых при составлении уравнений по законам Кирхгофа?
6. Как по экспериментальным данным вычислить внутреннее сопротивление источника напряжения?
7. Как по полученным в лабораторной работе экспериментальным данным Вы проверяли справедливость законов Ома и Кирхгофа?
8. Какой метод Вы применили для расчёта электрической цепи? Поясните его сущность.

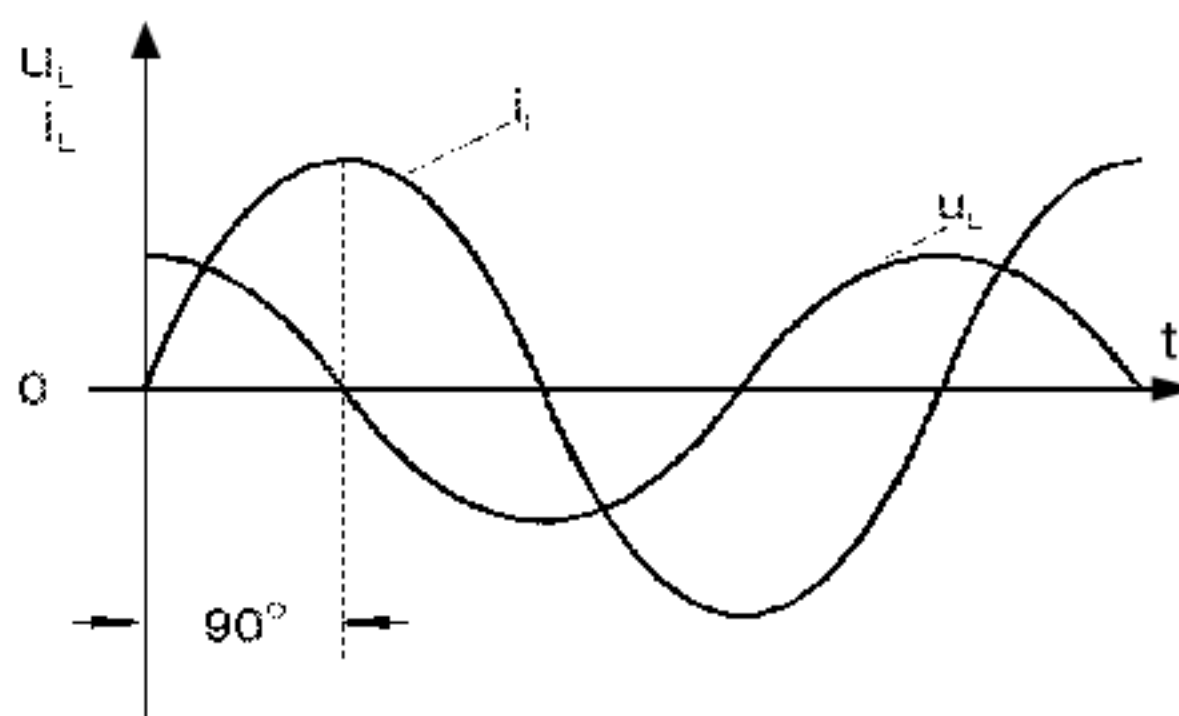


Лабораторная работа №3. Исследование цепей синусоидального тока с катушками индуктивности

Цель работы: Приобрести практические навыки сборки и анализа цепей переменного синусоидального тока с катушками индуктивности

Основы теории:

Когда к катушке индуктивности подведено синусоидальное напряжение, ток в ней отстает от синусоиды напряжения на ней на 90° . Соответственно, мгновенное значение тока достигает амплитудного значения на четверть периода позже, чем мгновенное значение напряжения. В этом рассуждении пренебрегается активным сопротивлением катушки.



Выведите на дисплей виртуального осциллографа кривые изменения во времени мгновенных значений тока i_L и напряжения u_L катушки индуктивности и определите фазовый сдвиг между ними.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока оказывает токоограничивающий эффект благодаря индуцируемой в ней противоЭДС. Этот токоограничивающий эффект принято выражать как индуктивное реактивное сопротивление (индуктивный реактанс) X_L .

Величина индуктивного реактанса X_L зависит от величины индуктивности катушки, измеряемой в Генри, и частоты приложенного напряжения переменного тока. В случае синусоидального напряжения имеем

$$X_L = \omega L = 2\pi fL ,$$

где X_L - реактивное индуктивное сопротивление, Ом,

L - индуктивность катушки, Гн.

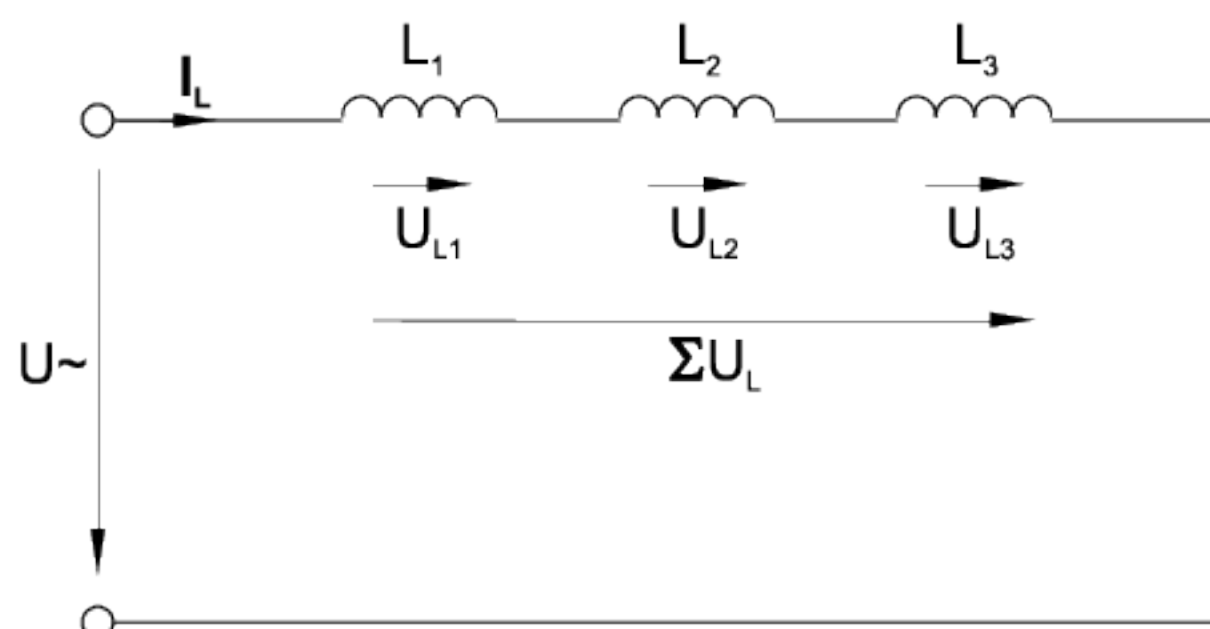
Если активное сопротивление катушки мало и им можно пренебречь, то реактивное (индуктивное) сопротивление можно определить через действующие значения или ампли-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

$$X_L = U_L / I_L \text{ или } X_L = U_{Lm} / I_{Lm}.$$

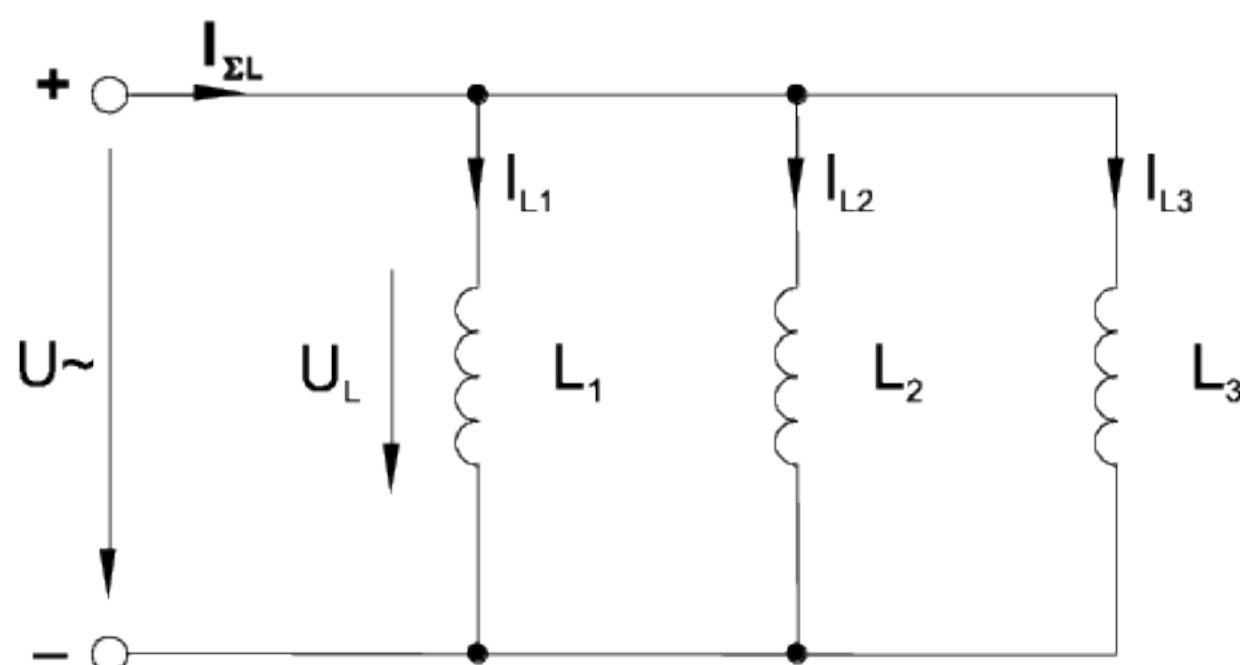
Когда несколько катушек соединены последовательно (рис. 5.3.1), эквивалентная индуктивность цепи равна сумме индуктивностей отдельных катушек:

$$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$



При параллельном соединении катушек эквивалентная индуктивность цепи меньше индуктивности наименьшей катушки. Вычисляется она по формуле:

$$1/L_{\Sigma} = 1/(1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots).$$



Если последовательно соединены только 2 катушки, общая индуктивность равна

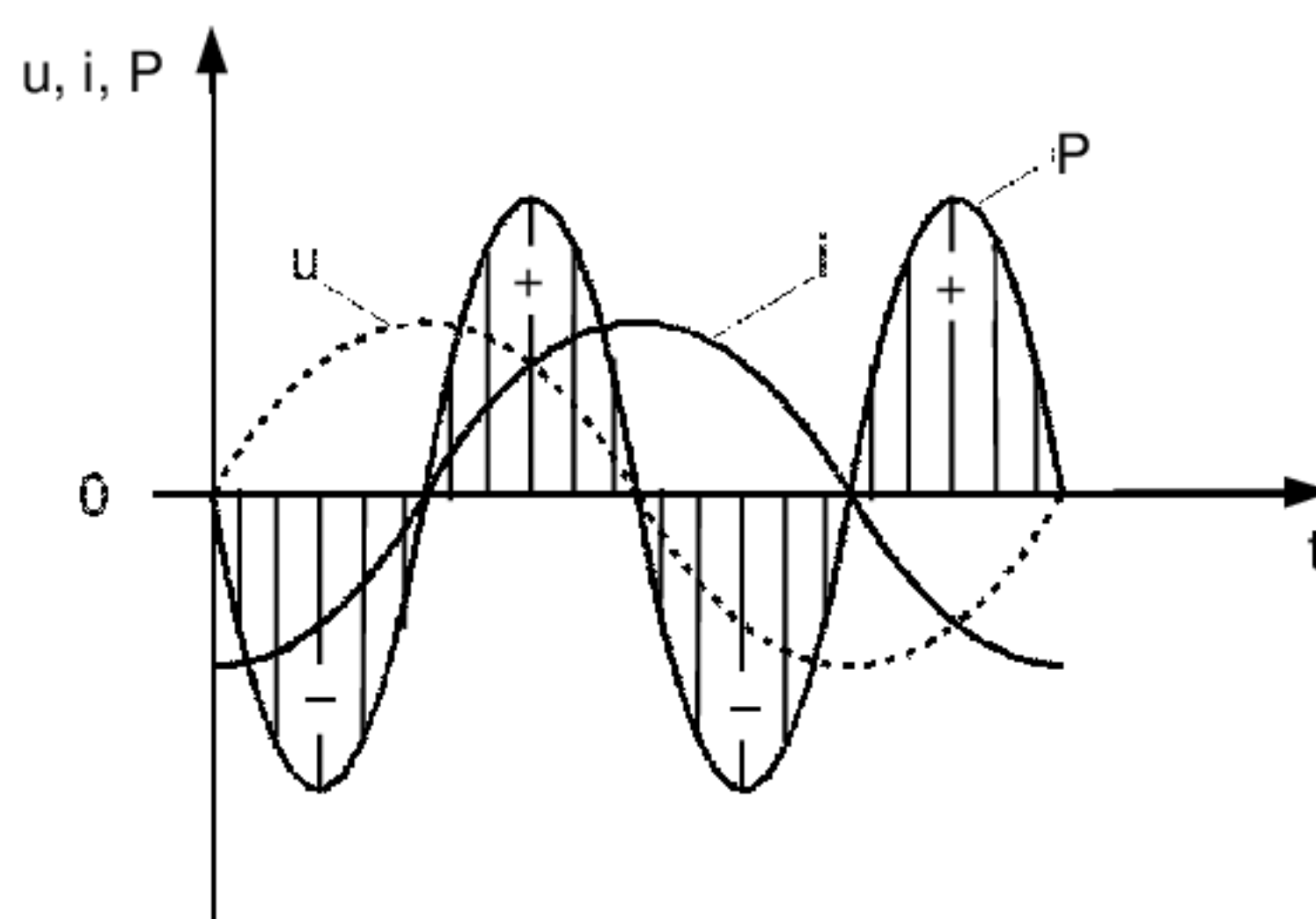
$$L_{\Sigma} = L_1 \cdot L_2 / (L_1 + L_2).$$

Токи в отдельных катушках обратно пропорциональны соответствующим индуктивностям, и их сумма равна общему току цепи. Напряжение, приложенное к каждой катушке, одинаково и равно U .

Когда катушка индуктивности подключена к переменному синусоидальному напряжению, в ней возникает синусоидальный ток, отстающий по фазе от напряжения на 90° .

Изменение во времени мгновенной мощности, потребляемой в катушке, может быть представлено на графике путем перемножения мгновенных значений тока i и напряжения u . Положительная полуволна кривой мощности равнозначна подведению энергии к катушке. Во время отрицательной полуволны катушка отдает запасенную ранее энергию магнитного поля. В идеальной катушке потерь активной мощности нет. В действительности же

возвращается часть энергии, которая меньше потребляемой из-за потерь энергии в активном сопротивлении катушки.



В идеальной катушке (при $R=0$) график мощности $p(t)$ представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой

$$Q_L = U_{Lm} I_{Lm} / 2 = U_L I_L.$$

Это значение является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой идеальной катушкой индуктивности. Она называется индуктивной реактивной мощностью.

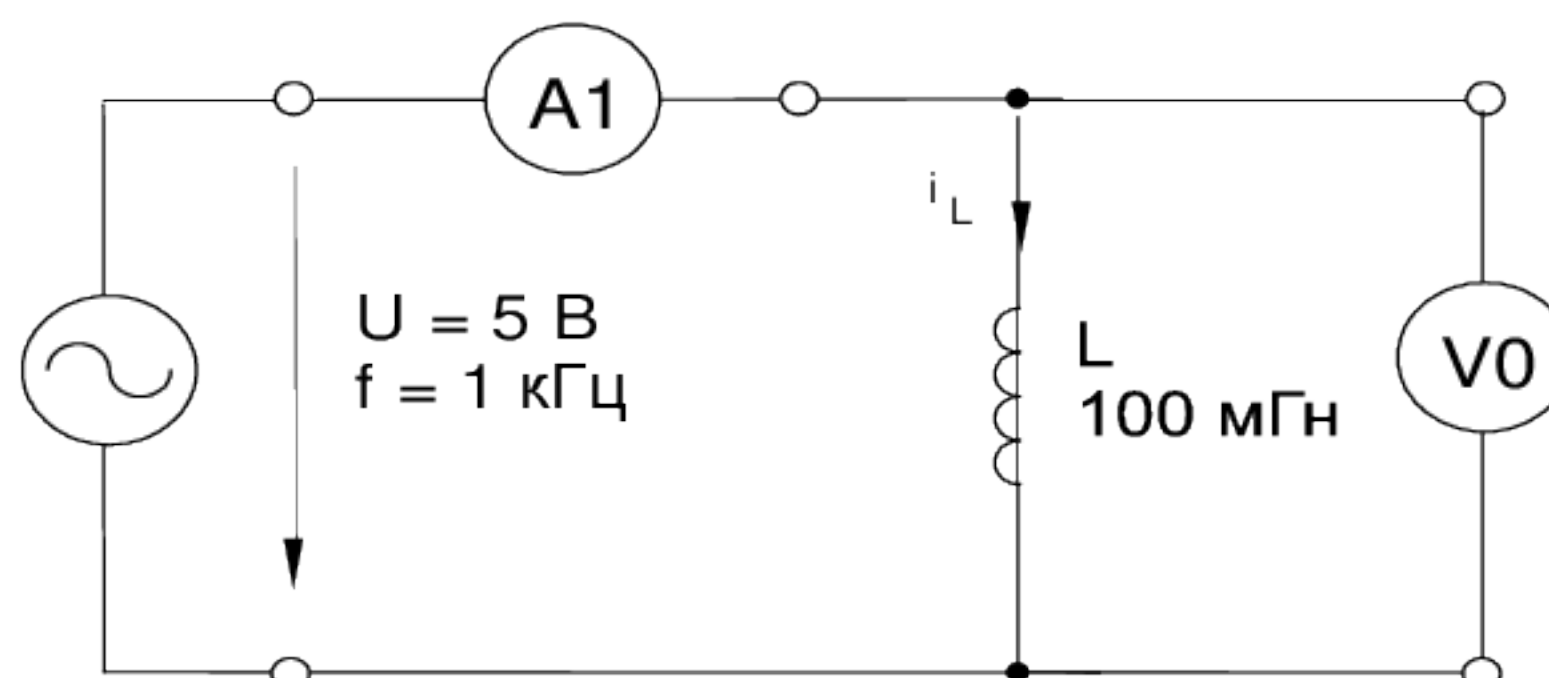
Средняя (активная) мощность, потребляемая такой катушкой, равна нулю

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите цепь согласно схеме, подключите к ее входу регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами: $U=5V$, $f=1\text{ кГц}$.



Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

«Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
У ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

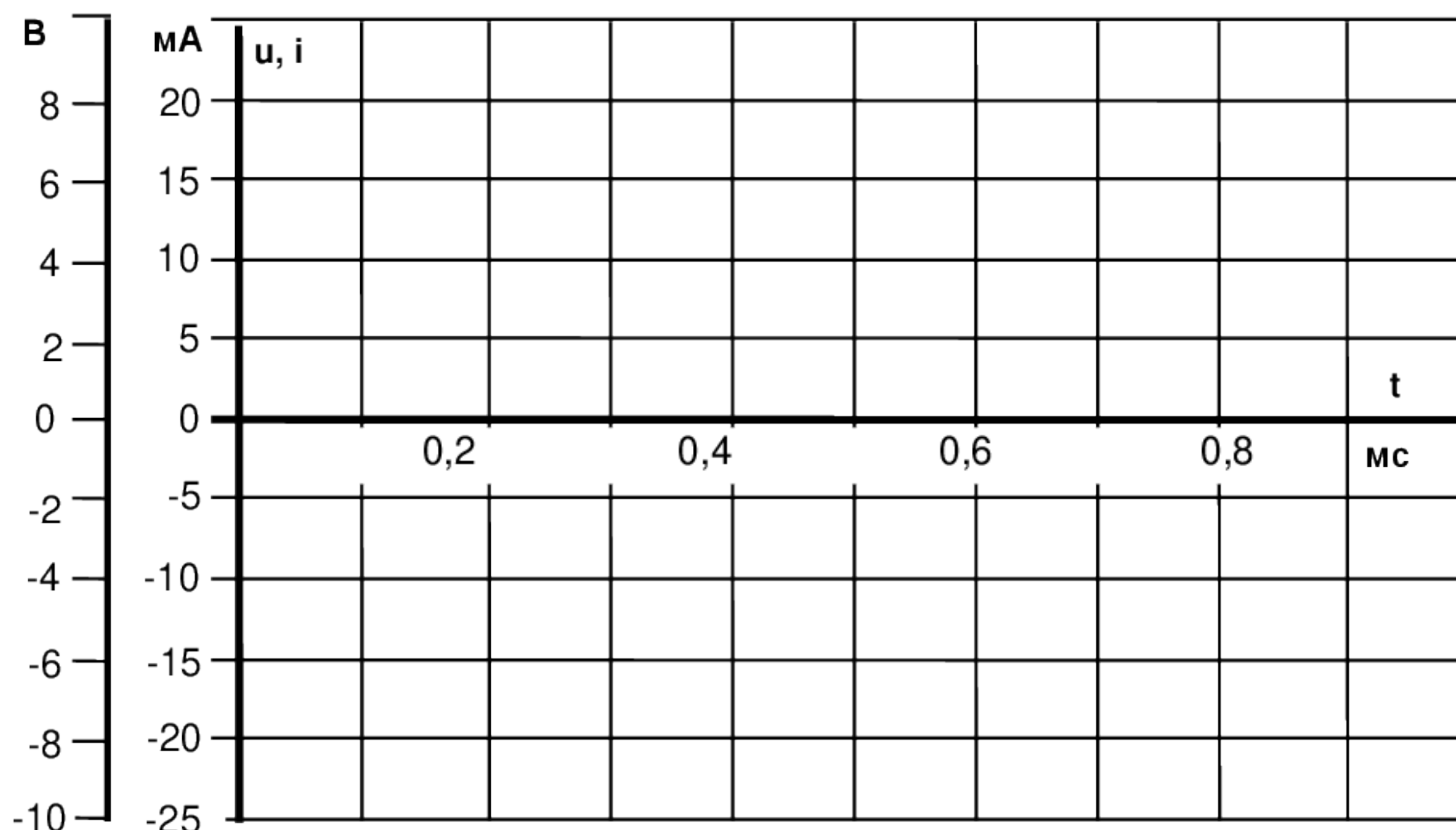
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

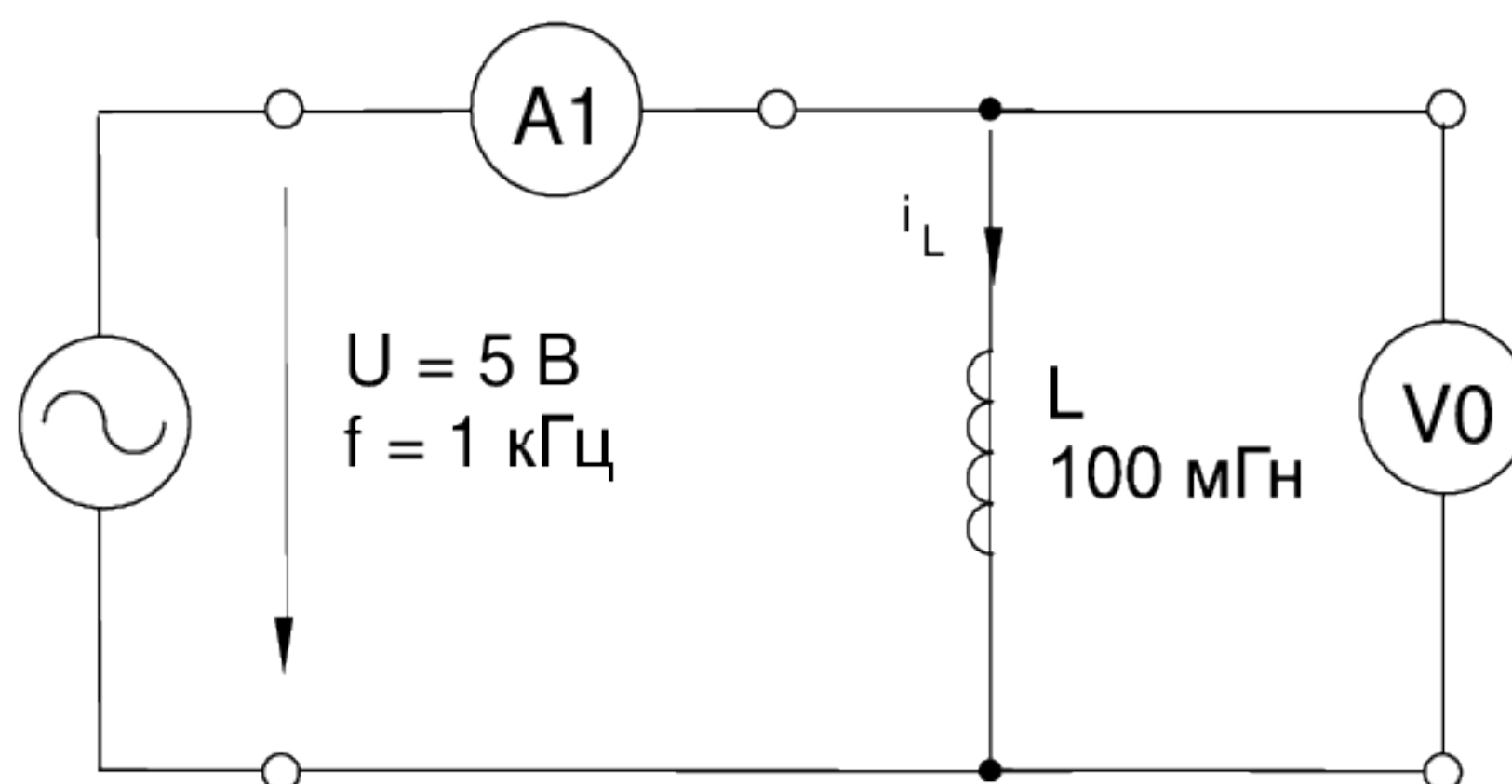
Подключите осциллограф так, чтобы на экране было изображение периодов напряжения и тока.

Перенесите данные осциллографирования напряжения и тока катушки на график, определите фазовый сдвиг между синусоидами напряжения и тока катушки индуктивности.



Включите блок дополнительных приборов, выберите из меню прибор «Угол сдвига фаз» и «подключите» его к V1 и A1. Убедитесь, что вы правильно определили фазовый сдвиг по осциллографу.

Соберите цепь согласно схеме, подсоедините к ее входу регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5 \text{ В}$, $f = 1 \text{ кГц}$.



Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

Подключите два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.

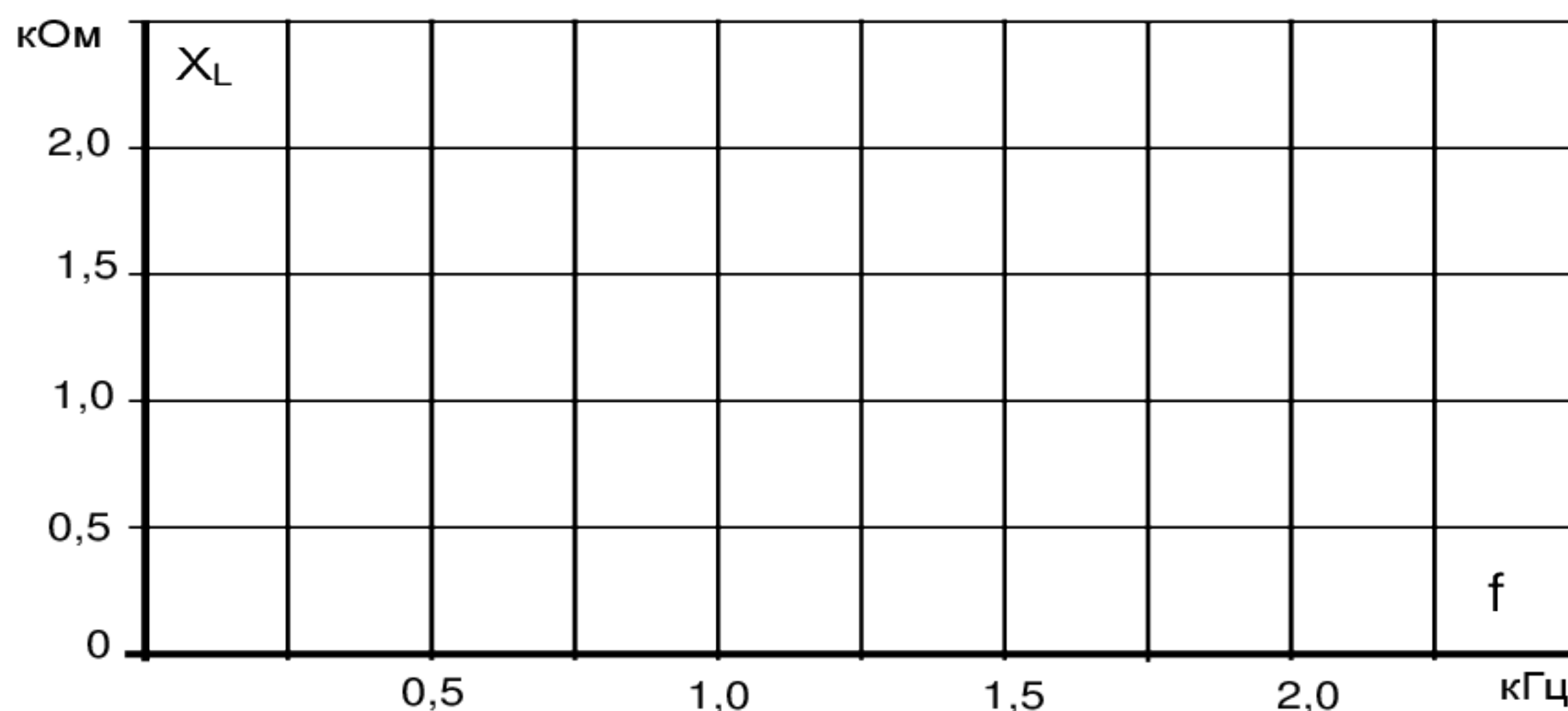
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Снимите с осциллограммы амплитудные значения U_m и I_m для индуктивностей и частот, указанных в табл. и занесите их в соответствующие ячейки таблицы.

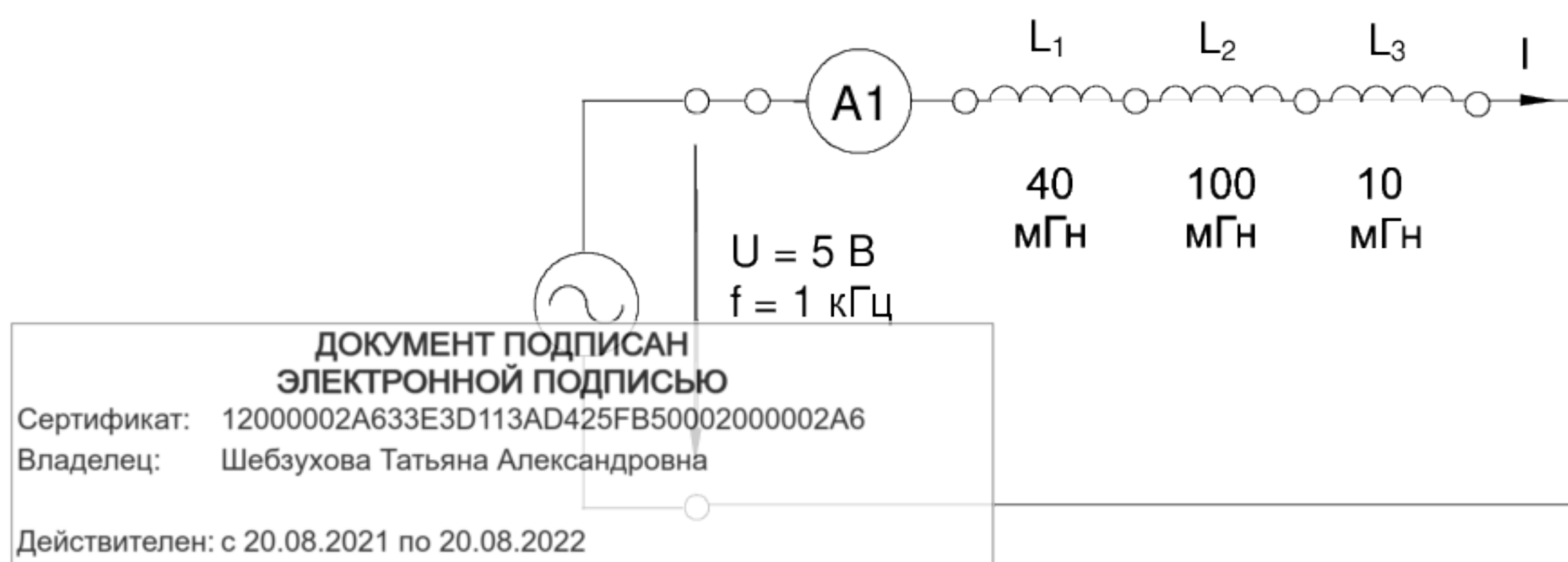
f, кГц		0,5	1	1,5	2
$U_{mL}, В$	100 мГн				
$U_{mL}, В$	40 мГн				
$U_{mL}, В$	10 мГн				
$I_{mL}, мА$	100 мГн				
$I_{mL}, мА$	40 мГн				
$I_{mL}, мА$	10 мГн				
$X_L =$ $U_m/I_m,$ кОм	100 мГн				
	40 мГн				
	10 мГн				
$X_L = \omega L,$ Ком	100 мГн				
	40 мГн				
	10 мГн				

Вычислите величины X_L по формулам U_m/I_m и ωL и занесите их в табл.

Перенесите величины X_L на график (рис. 5.2.2) для построения кривой $X_L = f(f)$.



Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.3.2) и подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5 В$ и $f = 1 кГц$.



Измерьте с помощью мультиметров или виртуальных приборов A1 и V1 действующие значения тока в цепи, приложенного напряжения и напряжения на каждой катушке. Результаты измерений занесите в табл.

I, мА	U, В	U _{L1} , В	U _{L2} , В	U _{L3} , В

Рассчитайте реактивные сопротивления и индуктивности катушек, эквивалентную индуктивность цепи по данным измерений.

Вычисление индуктивных реактансов:

$$X_{L1} = U_{L1} / I_L$$

$$X_{L2} = U_{L2} / I_L$$

$$X_{L3} = U_{L3} / I_L$$

$$X_{\Sigma} = U / I$$

Вычисление угловой частоты:

$$\omega = 2\pi f$$

Вычисление индуктивностей:

$$L_1 = X_{L1} / \omega$$

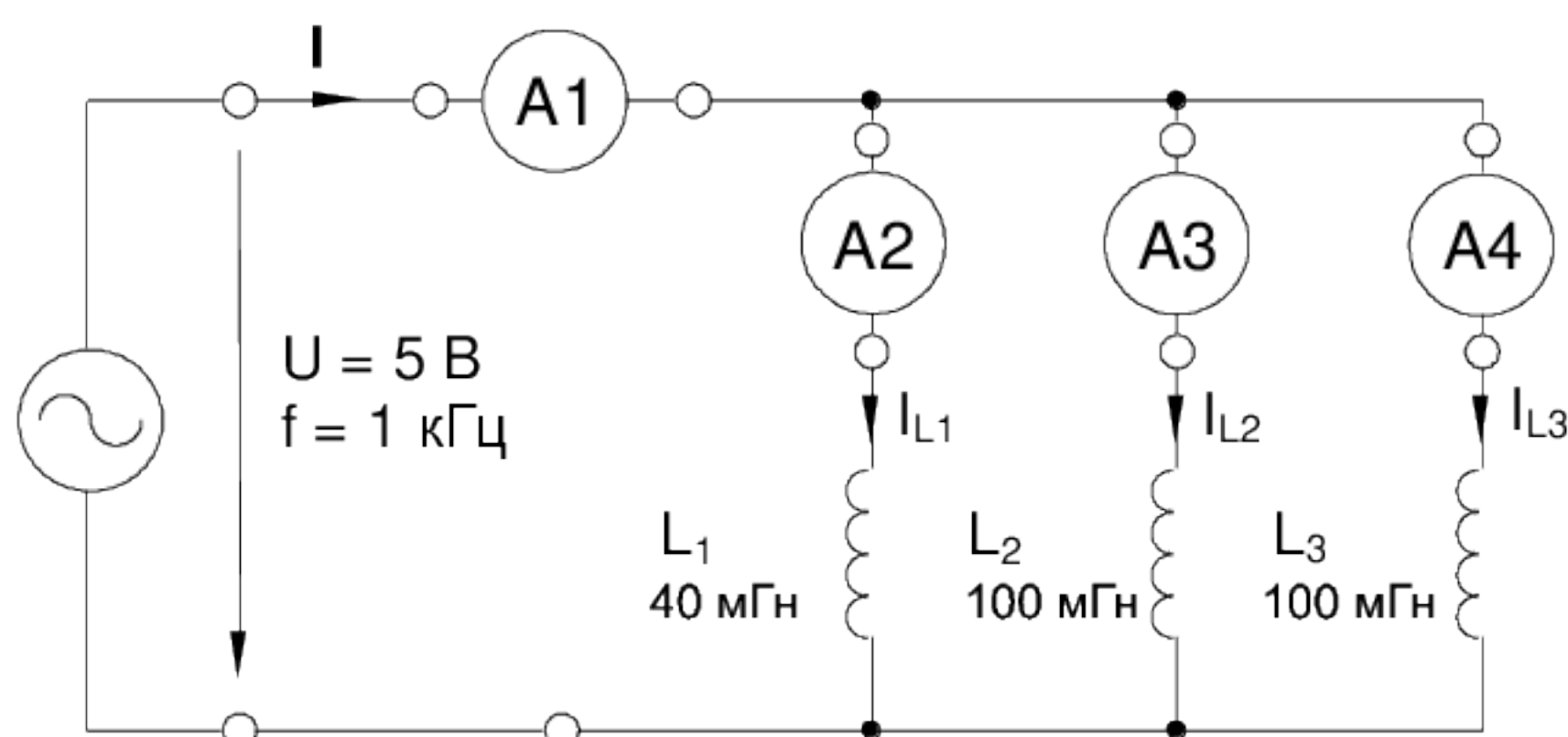
$$L_2 = X_{L2} / \omega$$

$$L_3 = X_{L3} / \omega$$

$$L_{\Sigma} = X_{L\Sigma} / \omega$$

Соберите цепь согласно схеме, подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5 \text{ В}$ и $f = 1 \text{ кГц}$.

Измерьте с помощью мультиметра или виртуальных приборов общий ток цепи I,



Токи параллельных ветвей I_1 , I_2 , I_3 и падения напряжение U на катушках, занесите

данные из таблицы занесите в таблицу

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

U, В	I, мА	I ₁ , мА	I ₂ , мА	I ₃ , мА

Вычислите индуктивные реактансы X_{L3} , X_{L1} , X_{L2} , X_{L3} по формуле $X_L = U / I_L$.

Определите индуктивности отдельных катушек и общую индуктивность цепи по формуле $L = X_L / \omega$.

Проверьте вычислениями величину индуктивности L_3 , найденную экспериментально.

Вычисление индуктивных реактансов:

$$X_{L1} = U_{L1} / I_{L1}$$

$$X_{L2} = U_{L2} / I_{L2}$$

$$X_{L3} = U_{L3} / I_{L3}$$

$$X_{L3} = U / I$$

Вычисление индуктивностей:

$$L_1 = X_{L1} / \omega$$

$$L_2 = X_{L2} / \omega$$

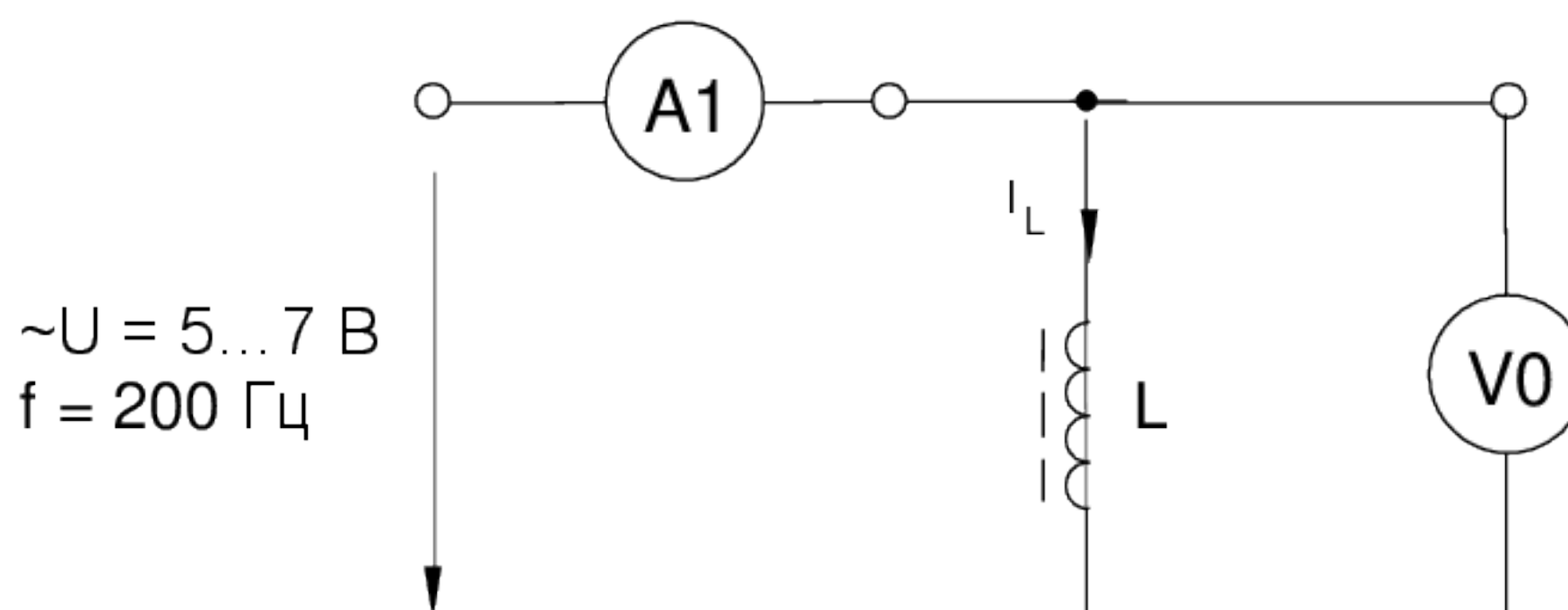
$$L_3 = X_{L3} / \omega$$

$$L_3 = X_{L3} / \omega$$

Проверка общей индуктивности расчетом:

$$L_3 = 1 / (1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3) = .$$

Соберите цепь согласно схеме, подсоедините к ней регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами: $U = 5 \dots 7 \text{ В}$ и $f = 200 \text{ Гц}$. В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор).



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

«Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

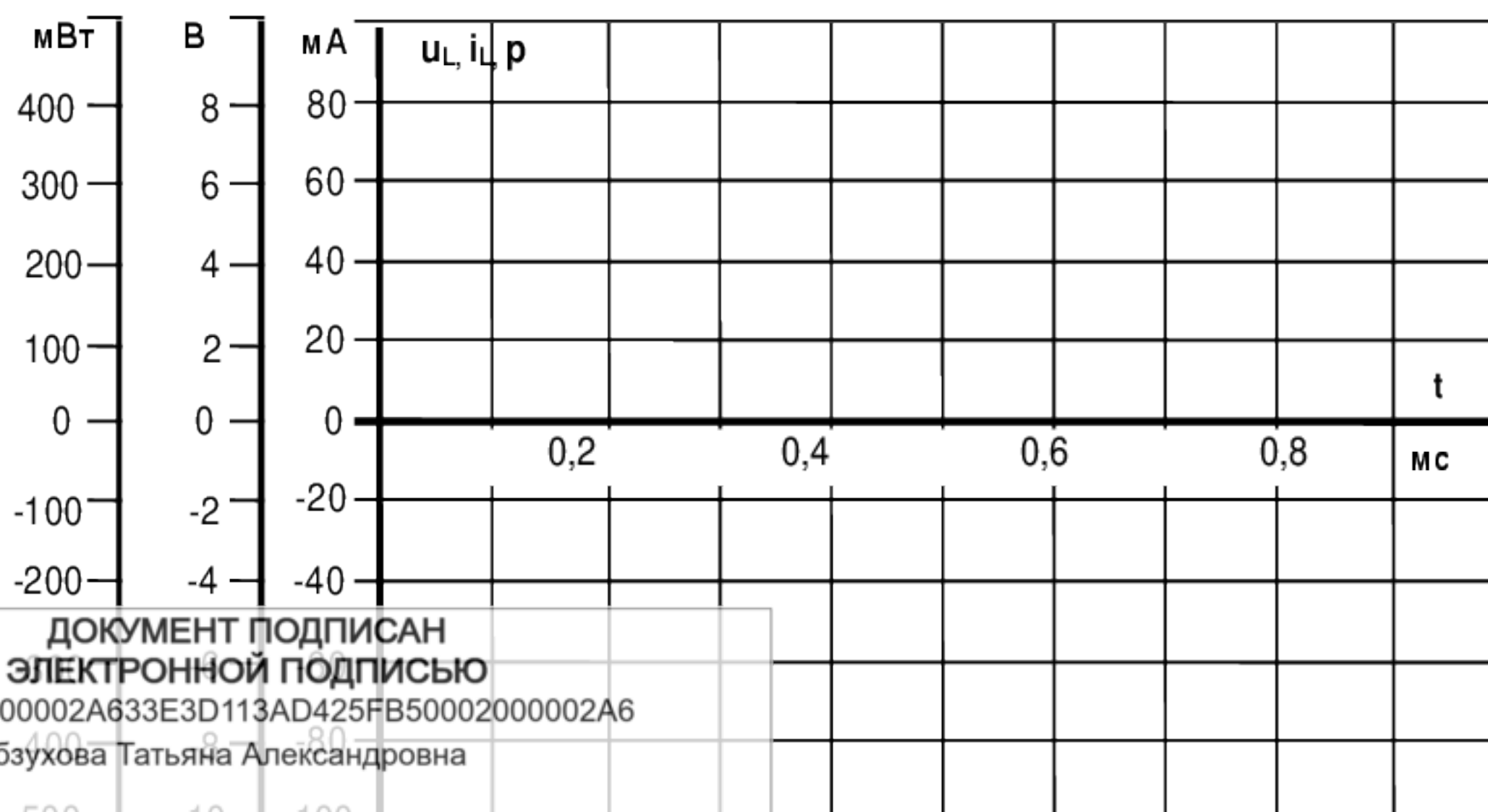
Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.

Включите блок дополнительных приборов, выберите из меню приборы «Активная мощность» и «Реактивная мощность» и подключите их к V1 и A1. Запишите значения реактивной мощности Q_L и активной P . Убедитесь, что $P \ll Q_L$.

Занесите данные осциллографирования напряжения и тока в катушке в табл. 5.5.1 соответственно указанным в ней моментам времени, выполните вычисления мгновенных значений реактивной мощности.

Время t , мс	Ток i_L , мА	Напряжение u_L , В	$p = u_L i_L$, мВт
0			
0,1			
0,2			
0,3			
0,4			
0,5			
0,6			
0,7			
0,8			
0,9			
1,0			

Перенесите данные табл. 5.5.1 на график.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

По графику $p(t)$ определите максимальную возвращаемую мощность (реактивную мощность)

$$Q_L = (P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}}) / 2$$

Сравните эту мощность с мощностью, измеренной варметром:

$$Q_L = \dots$$

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как зависит индуктивное сопротивление от частоты?
2. Чем объясняется различие значений X_L , вычисленных по формулам U_m/I_m и ωL ?

Лабораторная работа №4. Исследование цепей синусоидального тока с конденсаторами

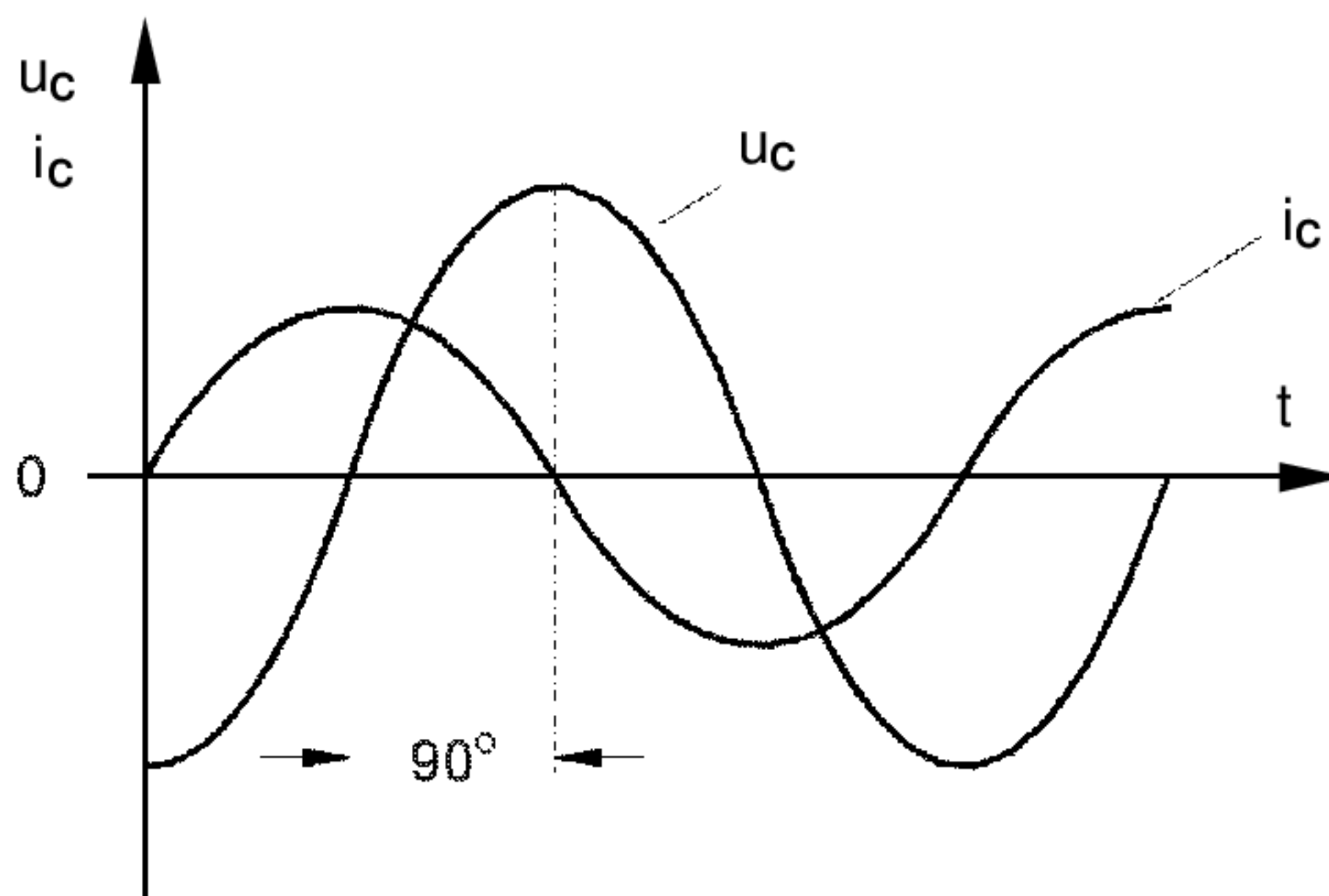
Цель работы: Приобрести практические навыки сборки и анализа цепей переменного синусоидального тока с конденсаторами.

Основы теории:

Когда к конденсатору приложено синусоидальное напряжение, он периодически заряжается и разряжается. Ввиду переменного характера напряжения периодически меняется также полярность заряда конденсатора. Ток в конденсаторе i_C достигает своего амплитудного значения каждый раз, когда напряжение u_C на нем проходит через нуль. Таким образом, синусоида тока i_C опережает синусоиду напряжения u_C на 90° .

Фазовый сдвиг:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ.$$



Конденсатор в цепи синусоидального тока оказывает токоограничивающий эффект, который вызван встречным действием напряжения при изменении знака заряда. Этот токоограничивающий эффект принято выражать как емкостное реактивное сопротивление (емкостной реактанс) X_C .

Величина емкостного реактанса X_C зависит от величины емкости конденсатора, измеряемой в Фарадах, и частоты приложенного напряжения переменного тока. В случае си-

нусоидальном токе
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC),$$

где X_C - реактивное емкостное сопротивление, Ом,

C - емкость конденсатора, Ф,

$\omega = 2\pi f$ - угловая частота синусоидального напряжения (тока).

Когда известны действующие значения тока в конденсаторе и падения напряжения на нем от этого тока, реактивное емкостное сопротивление можно вычислить по закону Ома:

$$X_C = U_{Cm} / I_{Cm} \text{ или } X_C = U_C / I_C.$$

Емкостному реактансу часто присваивают знак «-» в отличие от индуктивного реактанса, которому приписывают знак «+».

Когда несколько конденсаторов соединены последовательно, эквивалентная емкость цепи меньше емкости наименьшего конденсатора. Вычисляется она по формуле:

$$C_{\Sigma} = 1 / (1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots).$$

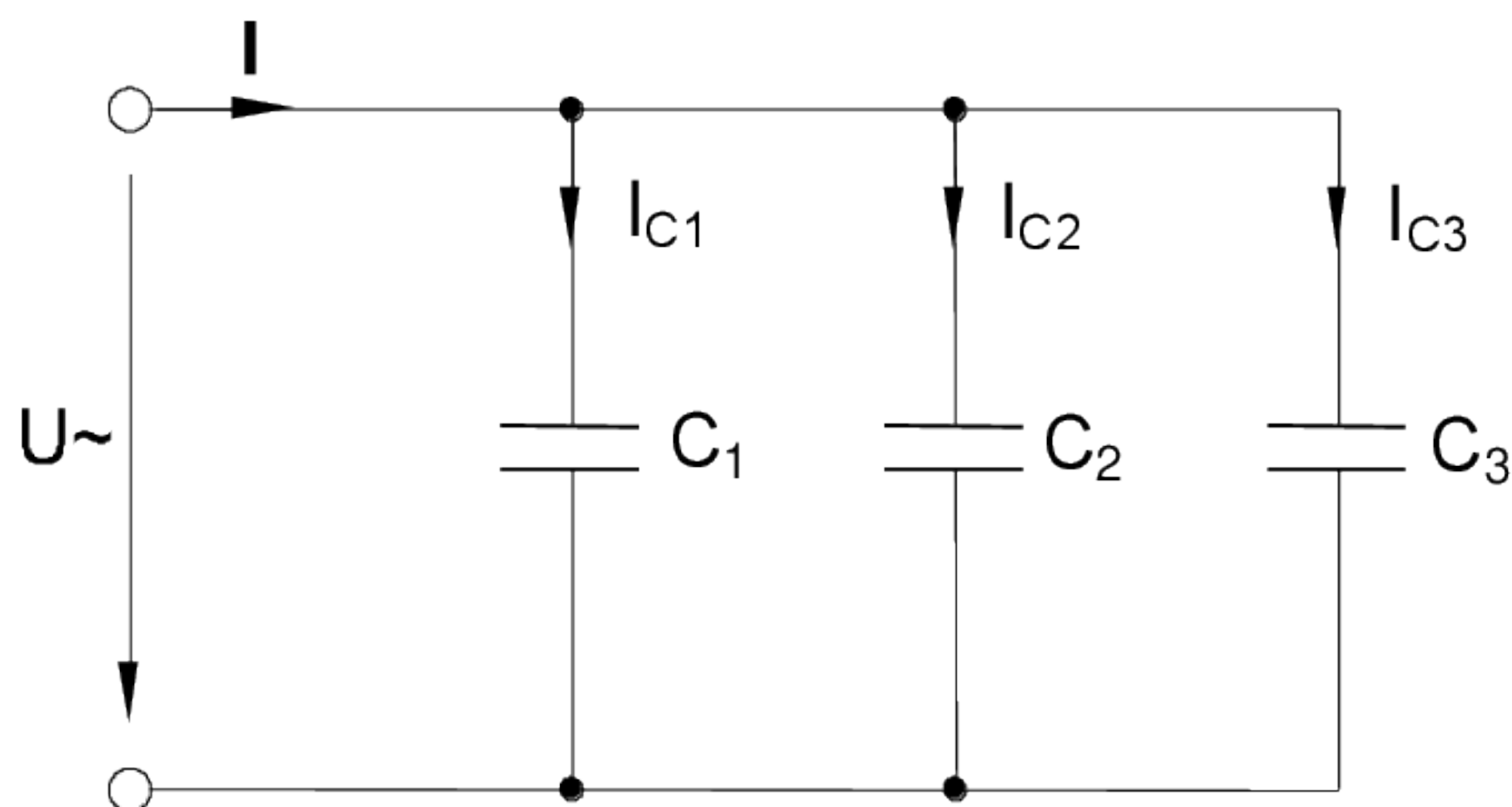
Если последовательно соединено только 2 конденсатора, общая емкость равна

$$C_{\Sigma} = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2).$$

Падения напряжения на отдельных конденсаторах обратно пропорциональны соответствующим емкостям, и их сумма равна общему напряжению ΣU_C . Ток в любой точке последовательной цепи с конденсаторами один и тот же.

При параллельном соединении конденсаторов эквивалентная емкость цепи равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$



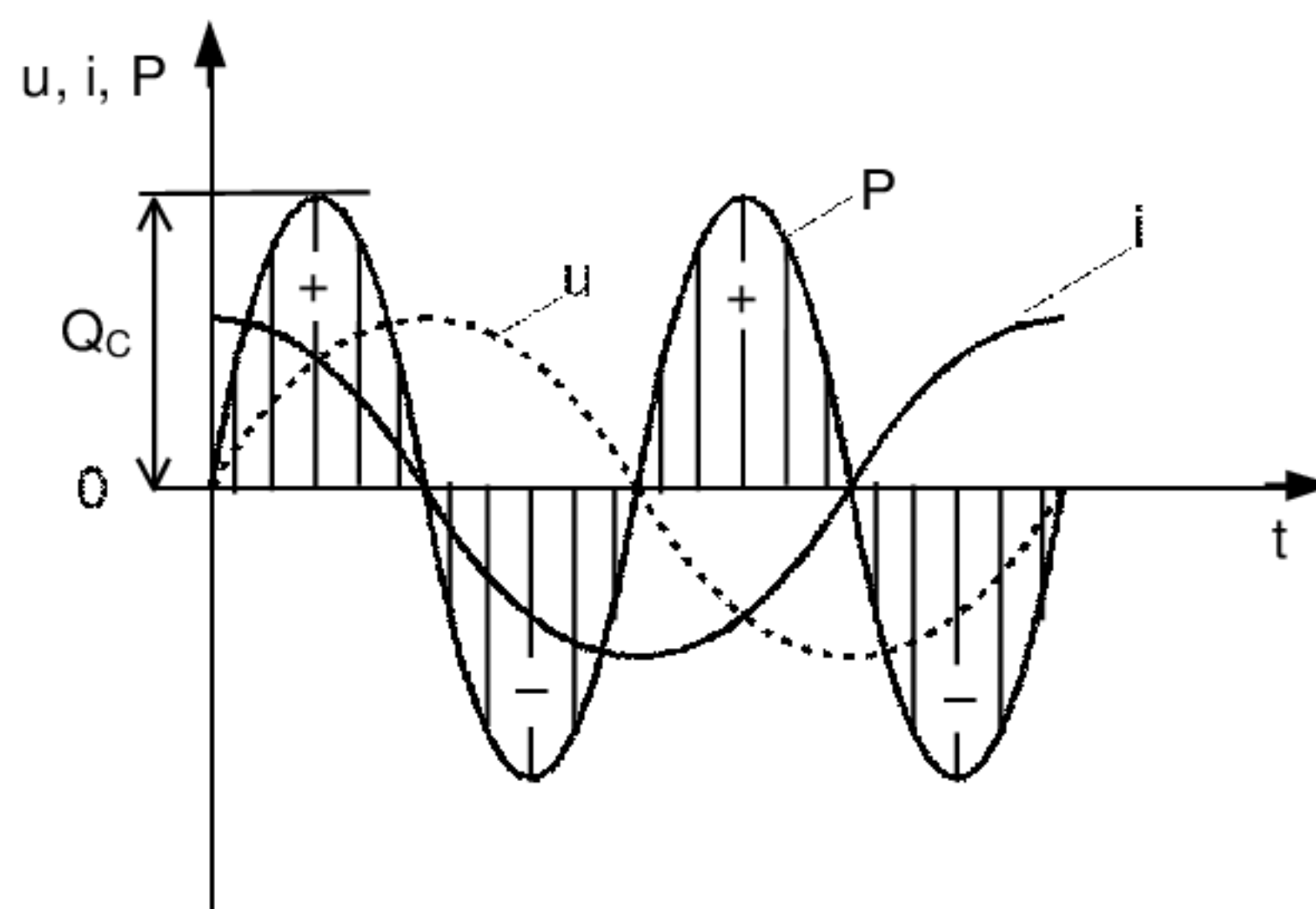
Токи в параллельных ветвях (конденсаторах) пропорциональны соответствующим емкостям, причем сумма токов ветвей равна общему току цепи I . Напряжения на всех конденсаторах одинаковы и равны U .

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



Мгновенная мощность, потребляемая конденсатором (как и любой другой цепью) определяется как произведение напряжения и тока:

$$p = u \cdot i$$

График изменения этой мощности можно построить, перемножая попарно ординаты графиков $u(t)$ и $i(t)$, взятые в один и тот же момент времени. Полученная таким образом кривая представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой.

$$Q_c = U_{cm} \cdot I_{cm} / 2 = U_c \cdot I_c.$$

Когда $p > 0$, конденсатор заряжается, потребляя энергию и запасая ее в электрическом поле. Когда $p < 0$, он отдает ее другим элементам цепи, являясь источником энергии. Величина Q_c является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой конденсатором, и называется емкостной реактивной мощностью.

Средняя (активная) мощность, потребляемая конденсатором, равна нулю.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите цепь согласно схеме и подключите регулируемый источник синусоидального напряжения при $U = 5$ В и $f = 1$ кГц. Напряжение источника установите с помощью мультиметра.

Включите виртуальный прибор V0, A1 и осциллограф.

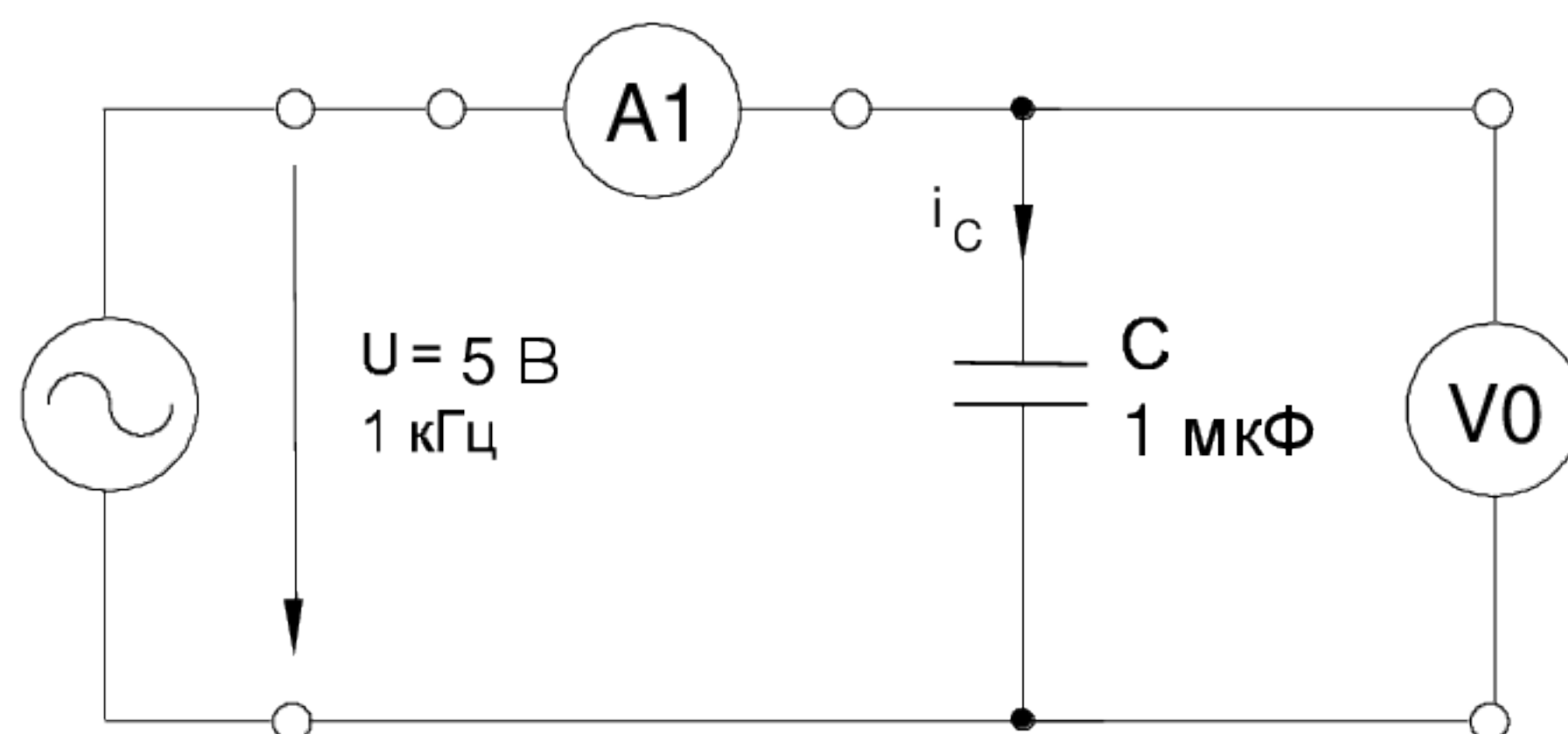
**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

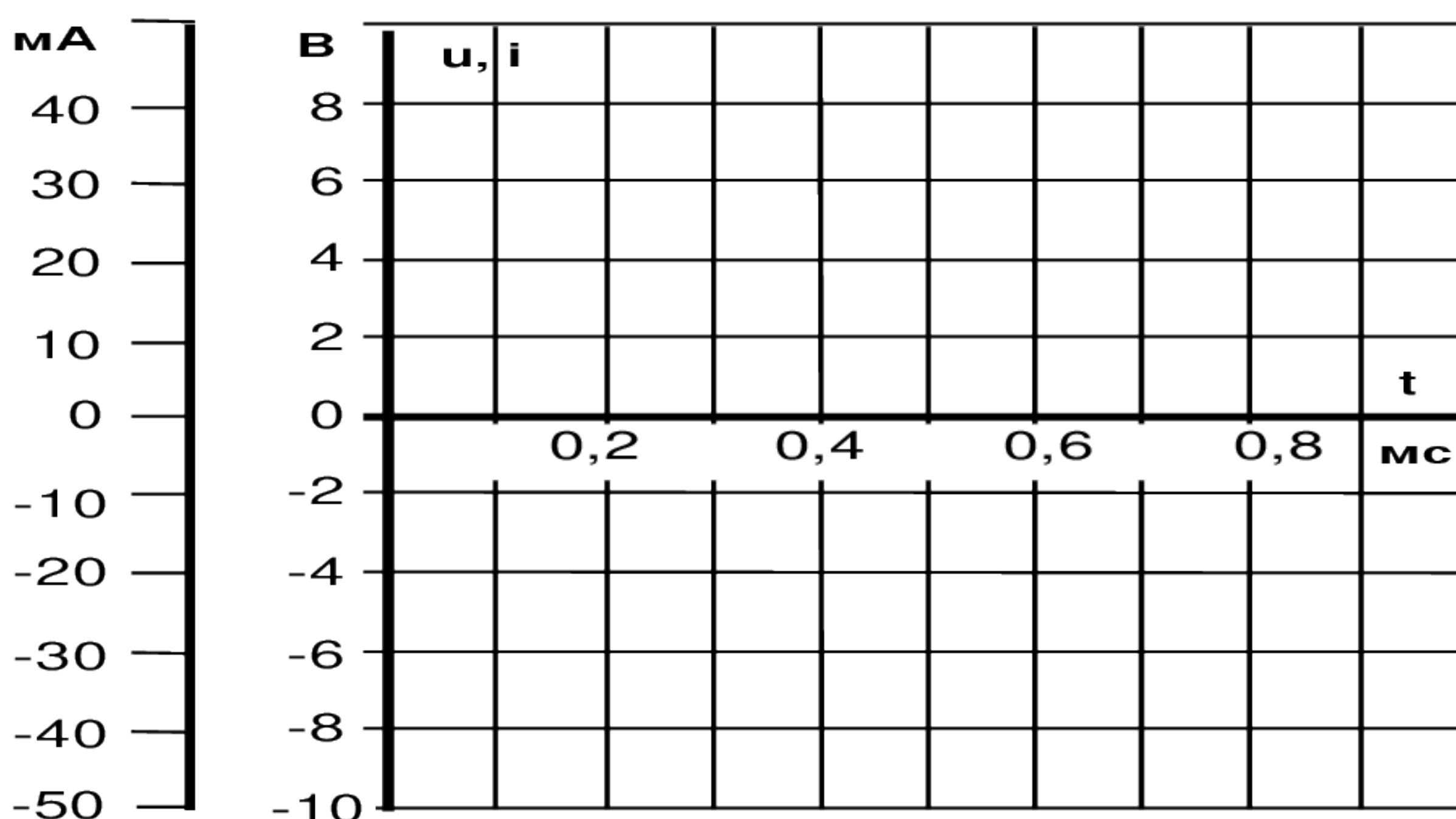
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

«После этого» подключите осциллограф к приборам V0 и A1, а остальные отключите.



Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.

Перенесите кривые на график и определите период и фазовый сдвиг между напряжением на конденсаторе $u_C(t)$ и током $i_C(t)$.



Из осциллограммы:

период $T =$ мс; фазовый сдвиг $\varphi =$.

Включите блок «Приборы II», выберите из меню прибор «Угол сдвига фаз» и «подключите» его к V0 и A1. Убедитесь, что вы правильно определили фазовый сдвиг по осциллографу.

Соберите цепь согласно схеме, установите синусоидальное напряжение $U = 5$ В и f

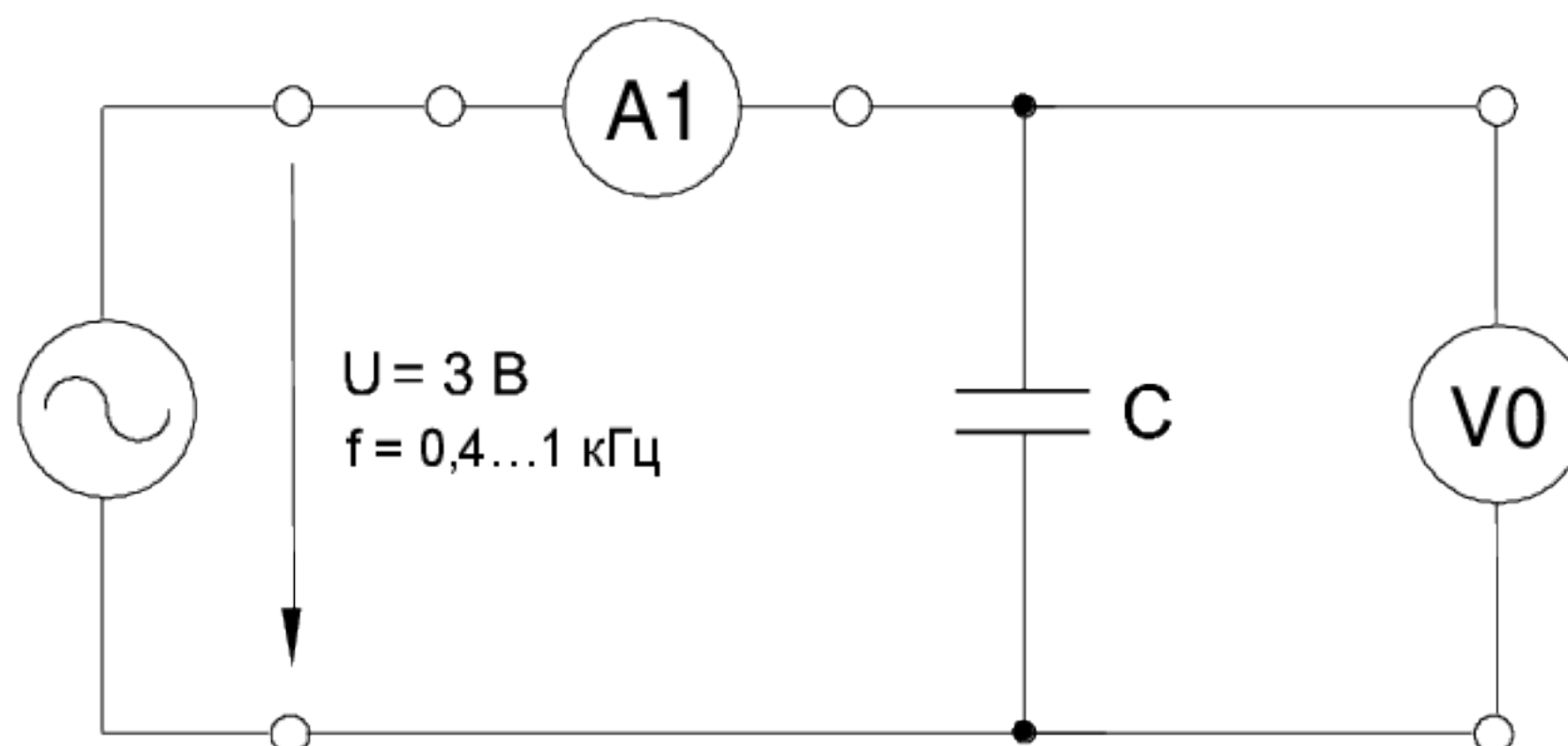
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$f = 1$ кГц к выходу синусоидального источника, затем присоедините источник к входным за-

ключите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

«Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.



Снимите с осциллограмм или измерьте виртуальными приборами амплитудные значения напряжений U_m и тока I_m для емкостей и частот, указанных в табл, и занесите их в соответствующие ячейки таблицы.

f, кГц		1	0,8	0,6	0,4
U_m , В	1,0 мкФ				
U_m , В	0,47 мкФ				
U_m , В	0,22 мкФ				
I_m , мА	1,0 мкФ				
I_m , мА	0,47 мкФ				
I_m , мА	0,22 мкФ				
$X_C = U_m / I_m$, кОм	1,0 мкФ				
	0,47 мкФ				
	0,22 мкФ				
$X_C = 1 / (\omega C)$, кОм	1,0 мкФ				
	0,47 мкФ				
	0,22 мкФ				

Вычислите величины X_C по формулам U_m / I_m и $1 / (\omega C)$ занесите их в табл. Сравните результаты.

Перенесите величины X_C на график (рис.4.2.2) для построения кривой $X_C = f(f)$.

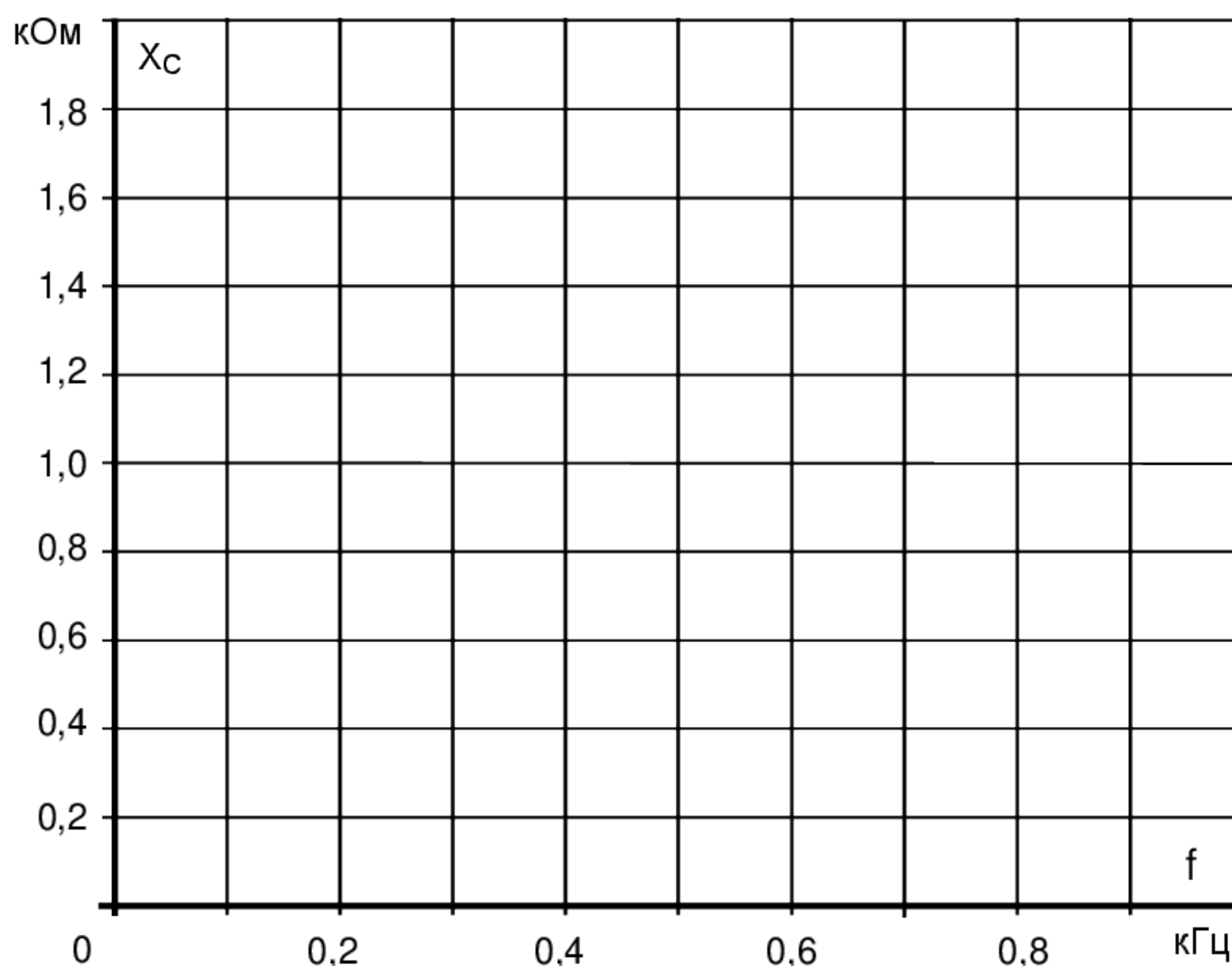
Проверьте расчетным путем величину реактанса X_C конденсатора емкостью $C =$

0,47 мкФ

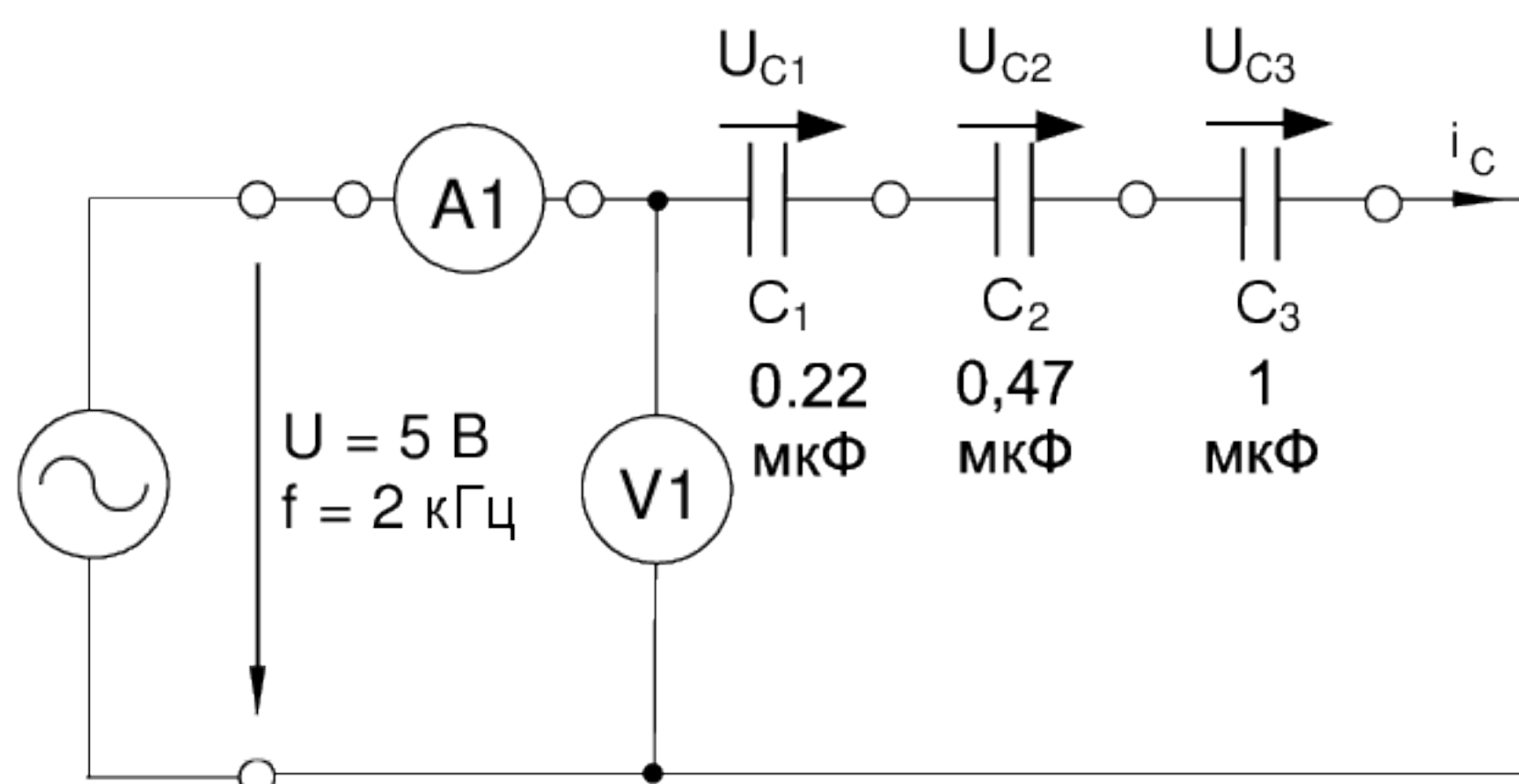
**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



Соберите цепь согласно схеме и подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5 \text{ В}$ и $f = 2 \text{ кГц}$.



Измерьте с помощью мультиметра или виртуальных приборов A1 и V1 действующие значения тока в цепи, приложенного напряжения и напряжения на каждом конденсаторе. Результаты измерений занесите в табл.

$I, \text{ мА}$	$U, \text{ В}$	$U_{C1}, \text{ В}$	$U_{C2}, \text{ В}$	$U_{C3}, \text{ В}$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Вычисление емкостных реактансов:
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$X_{C1} = U_{C1} / I_C$$

$$X_{C2} = U_{C2} / I_C$$

$$X_{C3} = U_{C3} / I_C$$

$$X_{\Sigma} = U / I$$

Вычисление угловой частоты:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Вычисление емкостей:

$$C_1 = 1 / (\omega \cdot X_{C1})$$

$$C_2 = 1 / (\omega \cdot X_{C2})$$

$$C_3 = 1 / (\omega \cdot X_{C3})$$

$$C_{\Sigma} = 1 / (\omega \cdot X_{\Sigma})$$

Проверка эквивалентной емкости цепи расчетом:

$$1/C_{\Sigma} = 1 / (1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3)$$

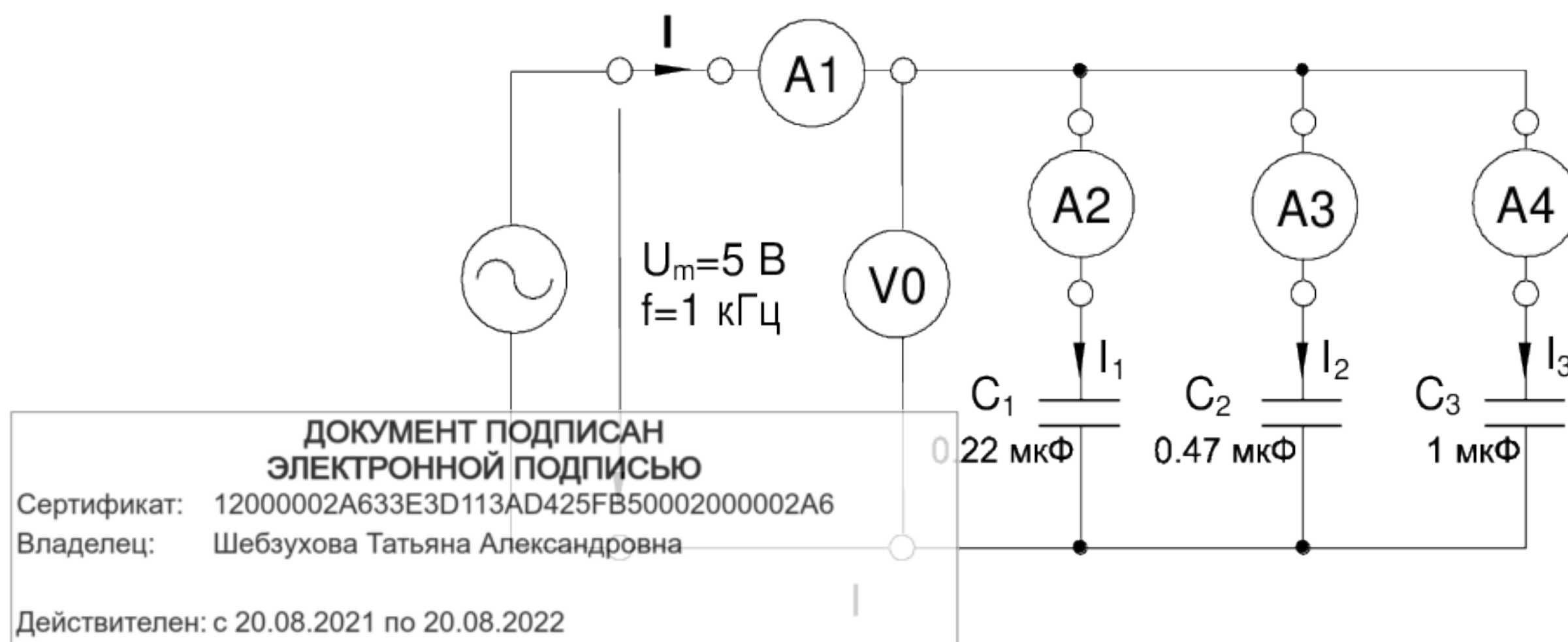
Проверьте эквивалентные реактанс и емкость цепи непосредственными измерениями с помощью виртуальных приборов. Для этого включите блок «Приборы II». В первом приборе выберите функцию «реактивное сопротивление X» и «подключите» его к V1 и A1. Во втором приборе выберите функцию «Частотомер» и «подключите» его к V1. Третий прибор запрограммируйте на вычисление емкости. Для этого введите аргументы расчетной формулы x7 и x8 (т.е. X и f) и саму расчетную формулу:

$$y = -1 / (2 \cdot 3,14 \cdot x8 \cdot x7)$$

Нажмите клавишу «Начать счет» и Вы получите результат вычисления – емкость в фарадах. Переведите ее в микрофарады и запишите результат:

$$C_{\Sigma} = \dots \quad \text{мкФ.}$$

Соберите цепь согласно схеме (рис. 4.4.2), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5 \text{ В}$ и $f = 1 \text{ кГц}$. Напряжение и частоту источника установите с помощью мультиметра.



Измерьте мультиметром или виртуальным прибором общий ток цепи I , токи параллельных ветвей I_1 , I_2 , I_3 и напряжения на конденсаторах U , занесите данные измерений в табл.

U , В	I , мА	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА

Вычислите емкостные реактансы X_C , X_{C1} , X_{C2} , X_{C3} по формуле $X_C = U/I_C$.

Определите емкости отдельных конденсаторов и эквивалентную емкость цепи по формуле $C = 1/(\omega \cdot X_C)$

Проверьте вычислениями величину емкости C_Σ , найденную экспериментально.

Вычисление емкостных реактансов:

$$X_{C1} = U_{C1} / I_{C1}$$

$$X_{C2} = U_{C2} / I_{C2}$$

$$X_{C3} = U_{C3} / I_{C3}$$

$$X_\Sigma = U / I$$

Вычисление емкостей :

$$C_1 = 1/(\omega \cdot X_{C1})$$

$$C_2 = 1/(\omega \cdot X_{C2})$$

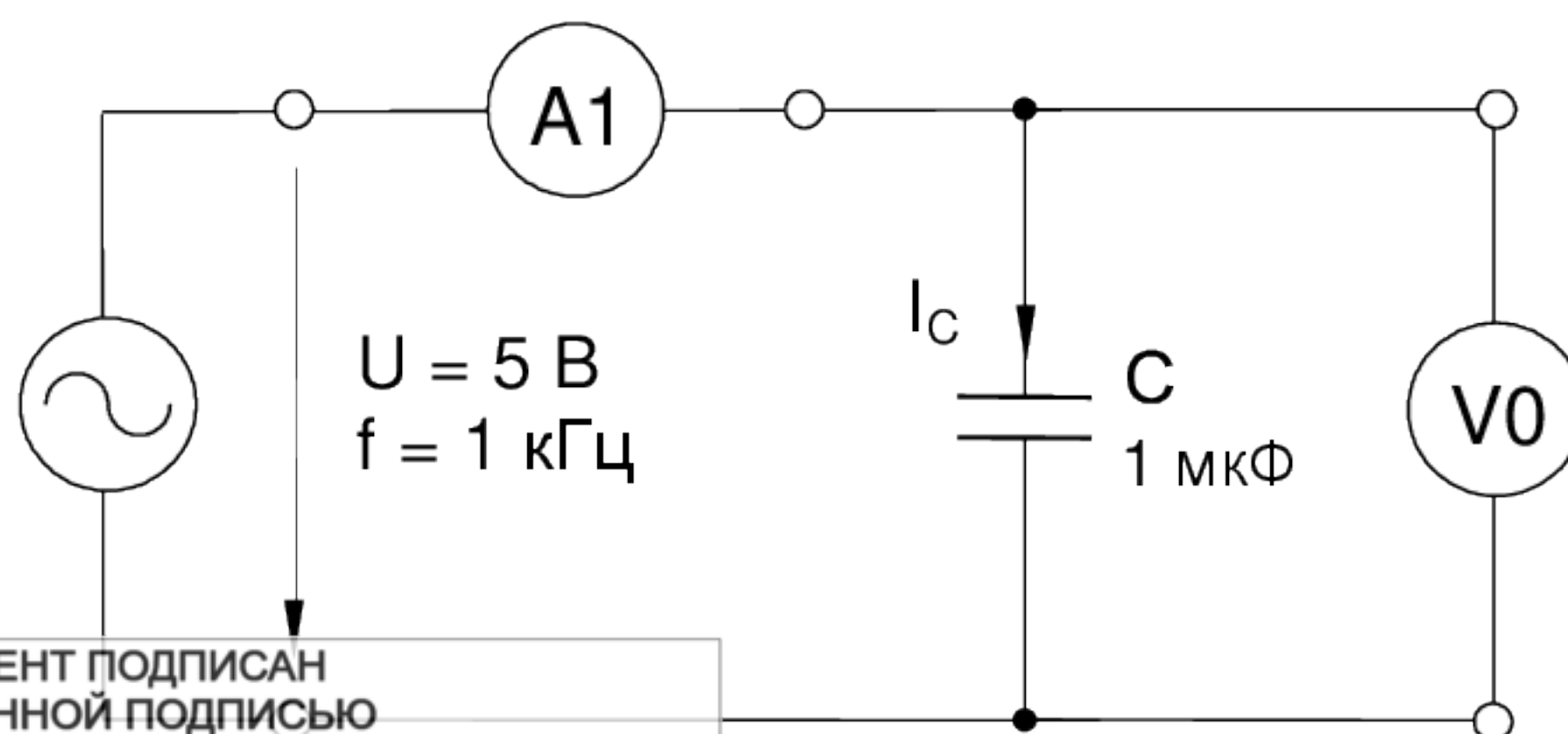
$$C_3 = 1/(\omega \cdot X_{C3})$$

$$C_\Sigma = 1/(\omega \cdot \Sigma X_C)$$

Проверка эквивалентной емкости расчетом :

$$C_\Sigma = C_1 + C_2 + C_3$$

Соберите цепь согласно схеме (рис. 4.5.2), подключите к ней регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами: $U = 5$ В и $f = 1$ кГц.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Измерьте виртуальными приборами $V0$, $A1$ и осциллограф.

«Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

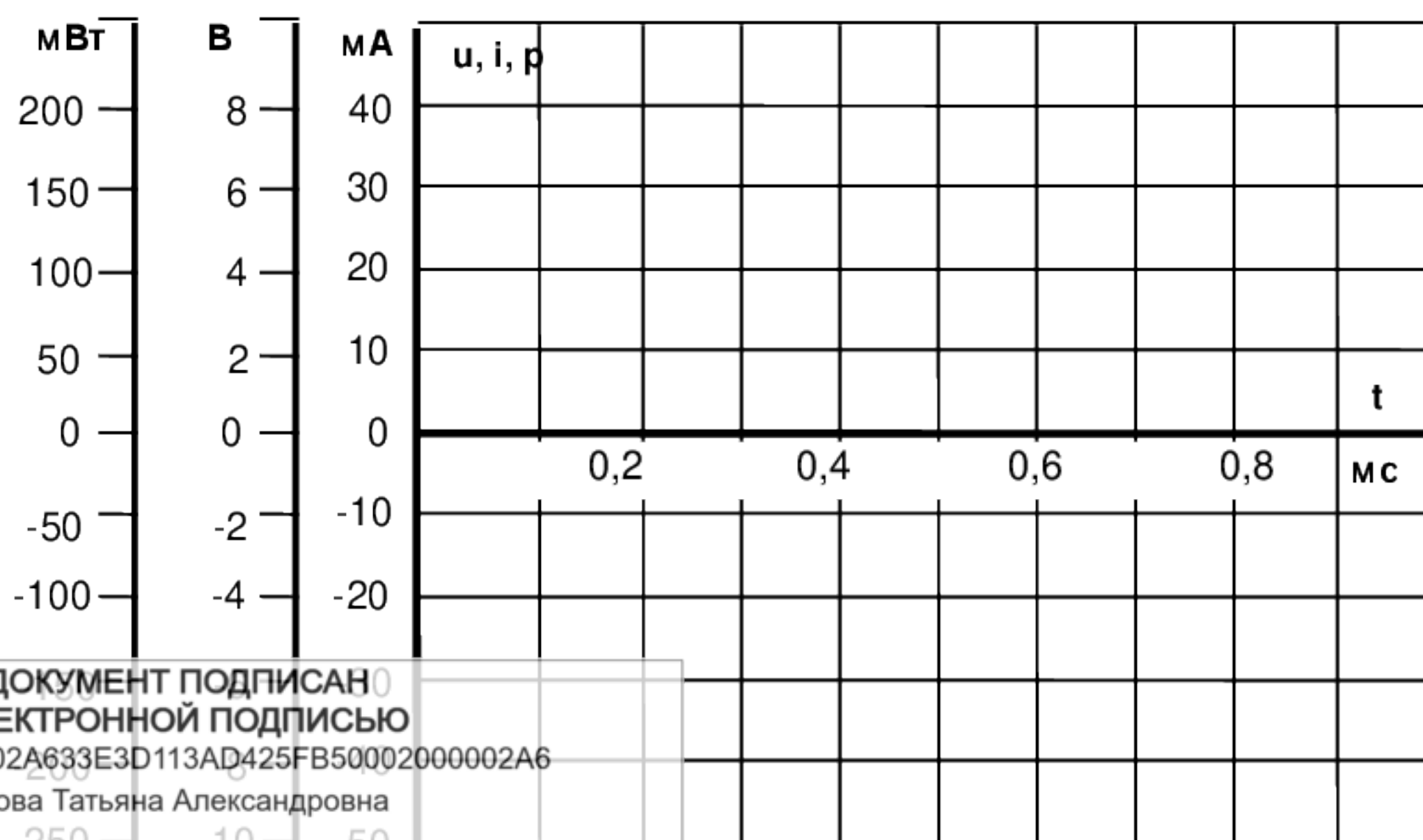
Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.

Включите блок «Приборы II», выберите из меню функции «Активная мощность» и «Реактивная мощность», подключите их к V1 и A1, запишите значения реактивной мощности Q_C и убедитесь, что активная мощность близка к нулю.

Занесите данные осциллографирования напряжения и тока конденсатора в табл. соответственно указанным моментам времени. Выполните вычисления мгновенных значений мощности.

Время t , мс	Ток i_C , мА	Напряжение u_C , В	$p = u_C \cdot i_C$, мВт
0			
0,1			
0,2			
0,3			
0,4			
0,5			
0,6			
0,7			
0,8			
0,9			
1,0			

Перенесите данные табл. 4.5.1 на график (рис.4.5.3).



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

По графику $p(t)$ определите максимальное значение (реактивную мощность) и сравните ее с реактивной мощностью, измеренной варметром.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как зависит емкостное сопротивление от частоты?

Лабораторная работа №5. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Резонанс напряжений

Цель работы: Опытная проверка основных соотношений для последовательной цепи переменного тока, обладающей активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.

Основы теории:

Пусть в цепь переменного тока с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ включена катушка, обладающая индуктивностью L и активным сопротивлением r (рис. 2.1).

При протекании по катушке переменного тока i_L в пространстве, окружающем витки, будет создаваться магнитный поток Φ и потокосцепление с витками катушки:

$$\psi = w \cdot \Phi$$

где w – число витков катушки.

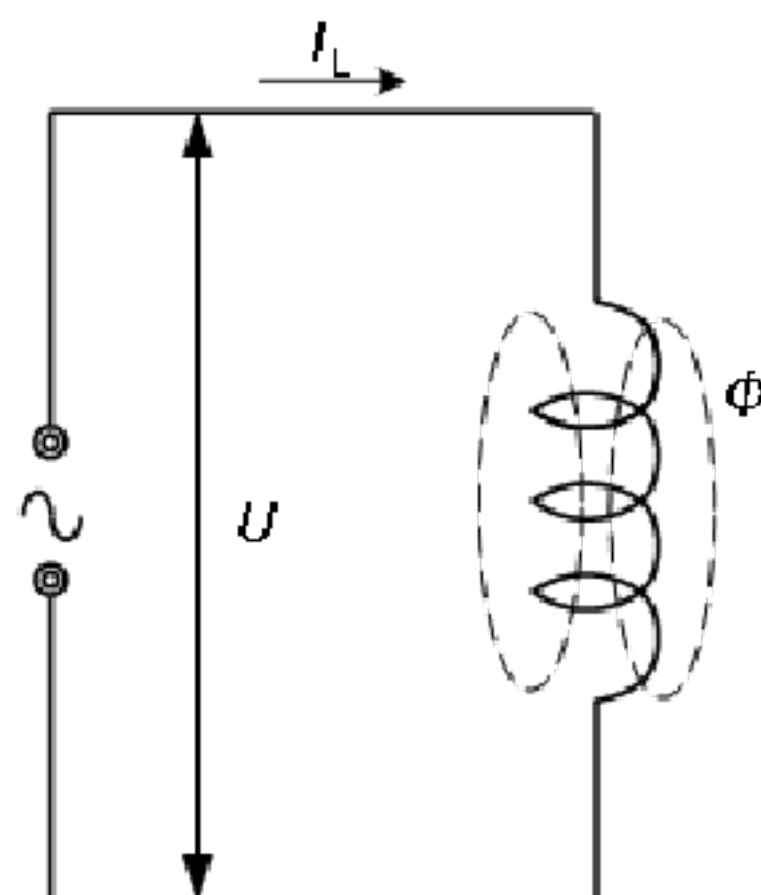


Рисунок 2.1 – Схема с индуктивностью

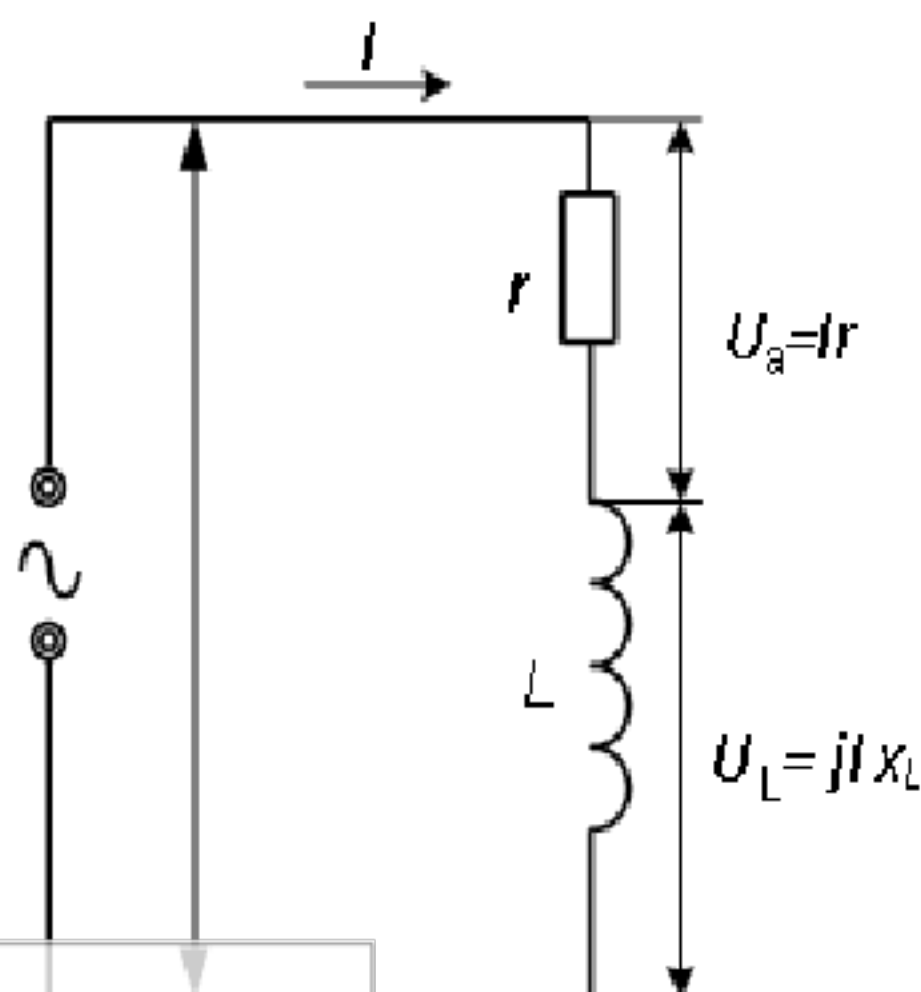


Рисунок 2.2 – Схема последовательного соединения R и L

Отношение потокосцепления катушки к току катушки i_L называется собственной индуктивностью или индуктивностью:

$$L = \frac{\psi}{i_L} = \frac{w \cdot \Phi}{i_L}$$

Если собственное потокосцепление пропорционально току (в случае катушки без стального сердечника), то $L = \text{const}$. Основной единицей измерения индуктивности является Генри (Гн):

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}}, 1 \text{ Гн} \cdot 10^{-3} = 1 \text{ мГн}$$

Если ток в катушке изменяется (например, по синусоидальному закону), то и потокосцепление катушки изменяется и поэтому в витках катушки по закону электромагнитной индукции наводится э.д.с. самоиндукции e_L :

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di_L}{dt}$$

т.е. наводимая э.д.с. e_L препятствует изменению тока i_L . Кроме того, катушка обладает некоторым активным сопротивлением r .

Применяя второй закон Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин, можно записать:

$$u + e_L = i \cdot r$$

отсюда напряжение на зажимах цепи равно

$$u = i \cdot r - e_L = u_a + u_L$$

Падение напряжения на активном сопротивлении называют активной составляющей напряжения или активным напряжением, а падение напряжения на индуктивном сопротивлении называют индуктивной составляющей напряжения. Мгновенные значения этих величин обозначают u_a и u , а действующие – соответственно U_a и U_L . При синусоидальном законе изменения тока напряжение на зажимах цепи будет равно:

$$\begin{aligned} u &= ir - e_L = rI_m \sin \omega t + L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = rI_m \sin \omega t + \omega LI_m \cos \omega t = \\ &= U_{am} \sin \omega t + U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned}$$

т.е. между активным и индуктивным падениями напряжения имеется сдвиг по фазе

на 90° .

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

можно записать:

$$\dot{U} = \dot{U}_a + j\dot{U}_L = \dot{I}r + j\dot{I}x_L$$

где $j\dot{I}x_L = j\omega L\dot{I}$ - комплексное сопротивление индуктивного элемента;

$\dot{U}_a = \frac{U_{am}}{\sqrt{2}}$ и $\dot{U}_L = \frac{U_{Lm}}{\sqrt{2}}$ - действующие значения активного и индуктивного напряжений.

Таким образом, напряжение на зажимах цепи $\dot{U}$ можно представить в виде суммы двух синусоид $\dot{U}_a$ и $j\dot{U}_L$. Известно, что всякую синусоидально изменяющуюся величину можно представить в виде вектора (например, тока $\dot{I}$), вращающегося в пространстве с угловой частотой ω , проекция которого на мнимую ось и дает синусоидальную величину (рис. 2.3).

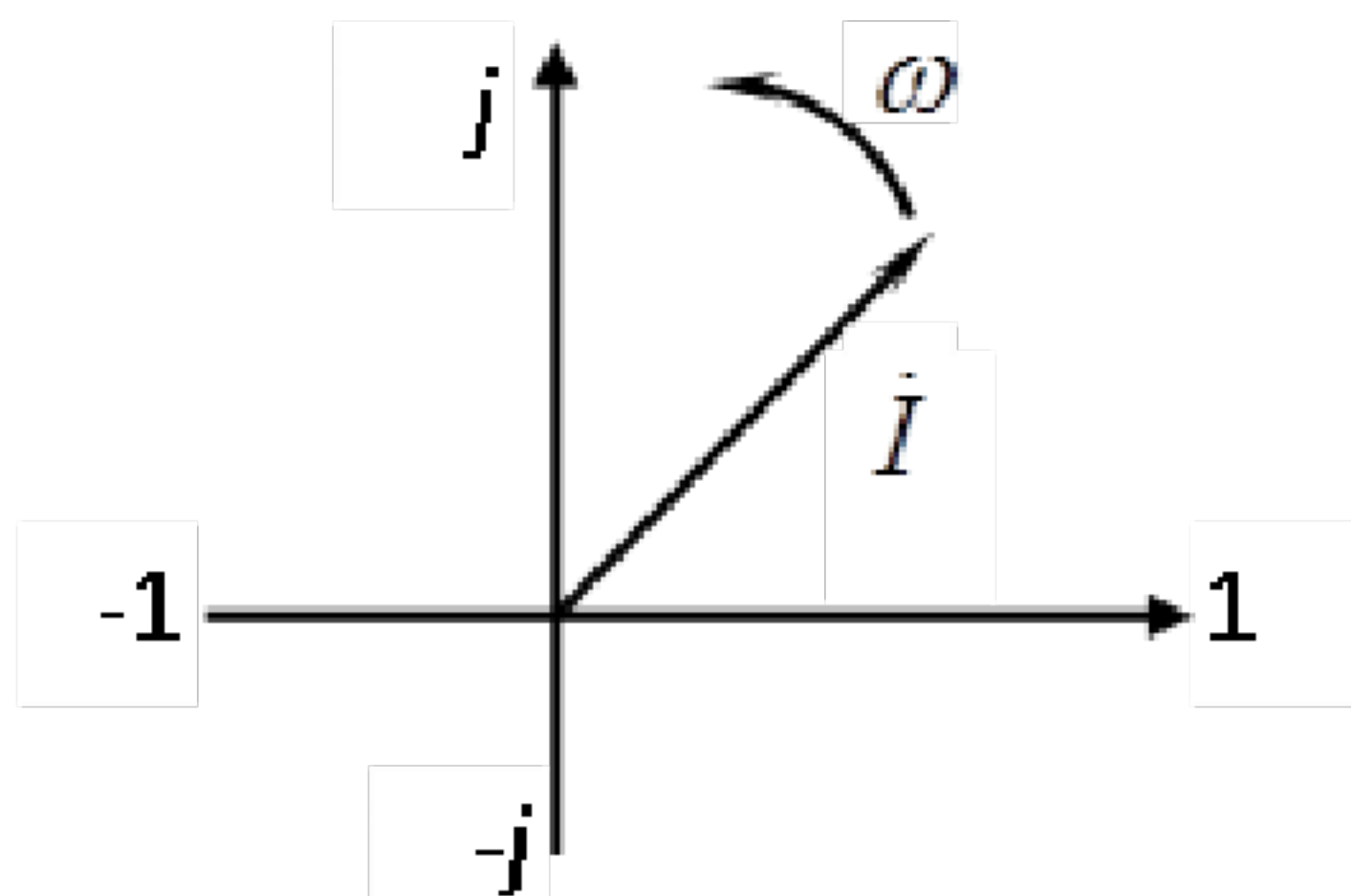
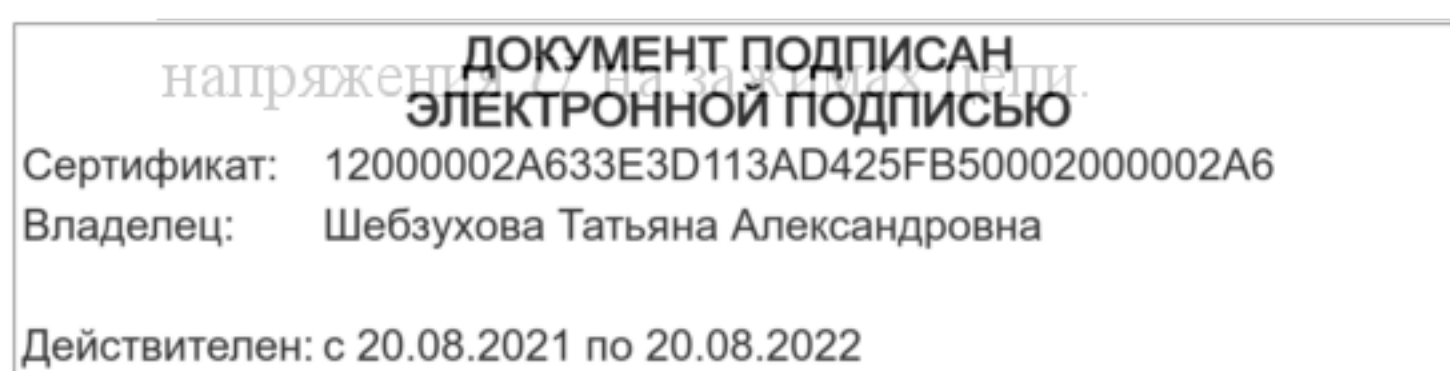


Рисунок 2.3 – Изображение синусоидального изменяющейся величины тока в виде вектора

Определим напряжения на зажимах цепи при помощи векторной диаграммы. Вектор тока $\dot{I}$ отложим в произвольном направлении, например, горизонтально (рис. 2.4). Все остальные векторы будут жестко привязаны к вектору $\dot{I}$, т.е. их сдвиг по фазе будет строго определенным.

Вектор активного напряжения $\dot{U}_a = \dot{I} \cdot r$ будет совпадать по направлению с вектором $\dot{I}$. Вектор индуктивной составляющей напряжения $\dot{U}_L = j \cdot \dot{I} \cdot x_L$ будет опережать на 90° вектор $\dot{I}$. Складывая геометрически векторы $\dot{U}_a$ и $\dot{U}_L$, получим вектор



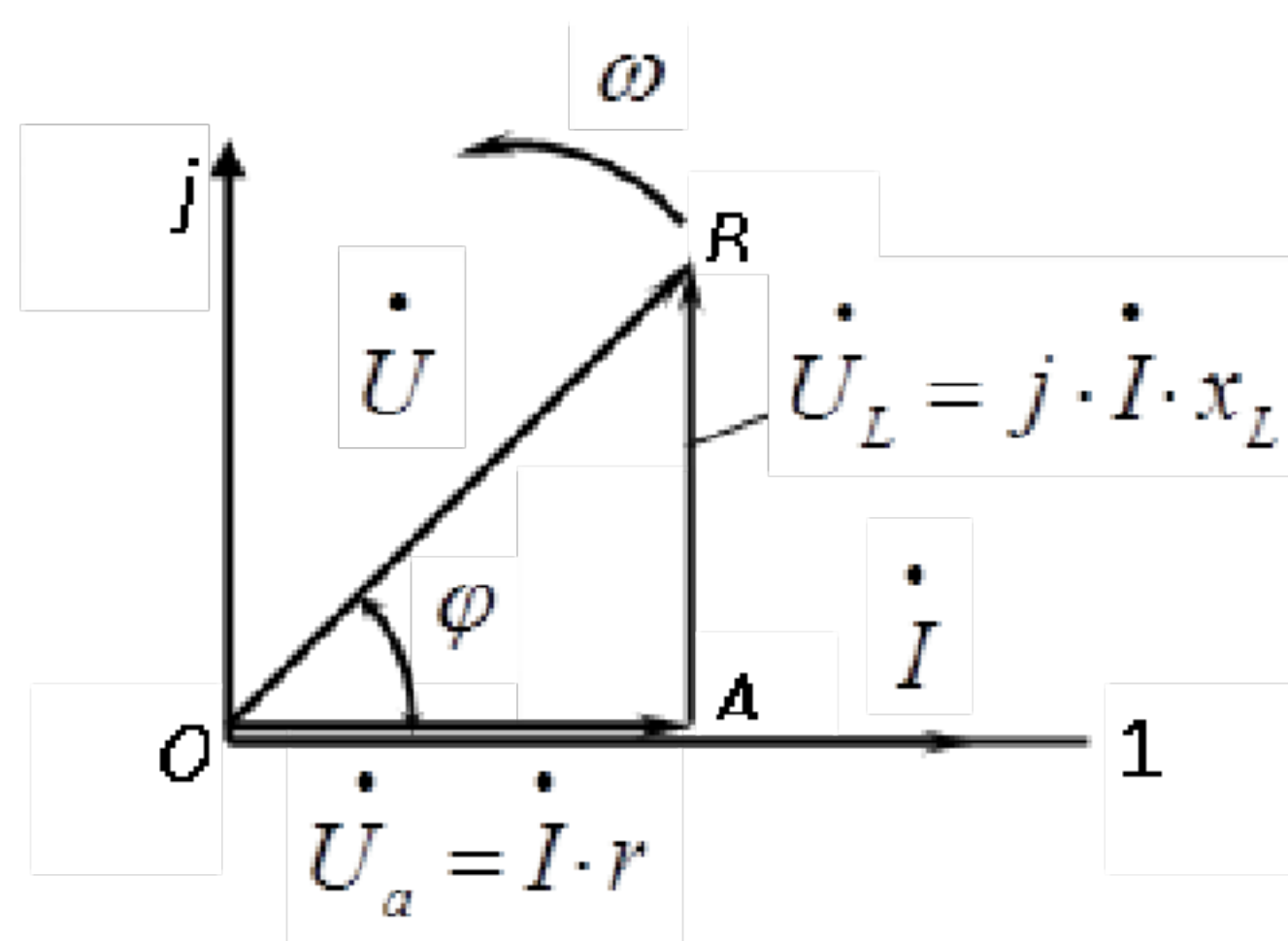


Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма при последовательном соединении R и L

Величина $x_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$ называется *индуктивным сопротивлением* и измеряется в *Ом*. Сопротивление x_L зависит от частоты и при включении катушки индуктивности в цепь постоянного тока ($f = 0$) ток катушки будет ограничен только ее активным сопротивлением и окажется намного больше. Поэтому катушки индуктивности, предназначенные для работы на переменном токе, нельзя включать в цепи постоянного тока.

Треугольник OAB (рис. 4) прямоугольный и называется *треугольником напряжений*. Из треугольника OAB имеем:

$$\begin{aligned} \dot{U}^2 &= \dot{U}_a^2 + \dot{U}_L^2 \\ \dot{U}^2 &= (\dot{I} \cdot r)^2 + (\dot{I} \cdot x_L)^2 = I^2 (r^2 + x_L^2) \end{aligned}$$

Извлекая из обеих частей корень, получим

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

Величина $\sqrt{r^2 + x_L^2}$, имеющая размерность сопротивления, называется *полным сопротивлением* цепи и обозначается z :

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

и закон Ома для цепи переменного тока имеет вид:

$$i = \frac{\dot{U}}{z} \text{ и } \dot{U} = \dot{I}z$$

Косинус угла сдвига фаз φ между током I и напряжением U равен:

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{I \cdot r}{I \cdot z} = \frac{r}{z}$$

Из треугольника мощностей, который можно получить из треугольника напряжений умножением его сторон на ток I , получим активную мощность:

$$P = I^2 r = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Реактивная мощность:

$$Q = I^2 x_L = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Полная мощность:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}$$

Если цепь переменного тока обладает активным сопротивлением r и емкостью C (рис. 1.5), то по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин можно записать:

$$u = i \cdot r + u_c$$

где u – мгновенное значение приложенного к цепи напряжения;

i - мгновенное значение тока цепи;

u_c - мгновенное значение напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора и представляющего собой падение напряжения на емкости.

Если ток изменяется во времени по синусоидальному закону, т.е. $i = I_m \sin \omega t$, то предыдущее уравнение будет иметь вид:

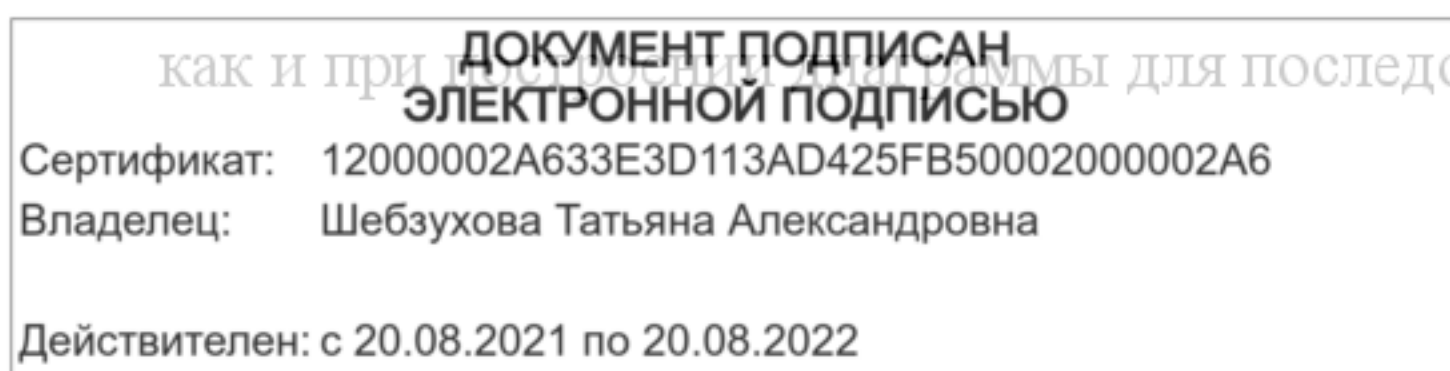
$$U = r I_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Из этой формулы видно, что приложенное к цепи напряжение состоит из двух составляющих: активной или активного напряжения $u_a = r I_m \sin \omega t$ совпадающей по фазе с током, и реактивной или емкостной составляющей $U_c = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$, отстающей от тока на 90° (рис. 1.6). Тогда

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_c$$

Построим векторную диаграмму для данного случая, пользуясь теми же правилами,

как и при построении диаграммы для последовательного соединения r и L (см. рис. 2.4).



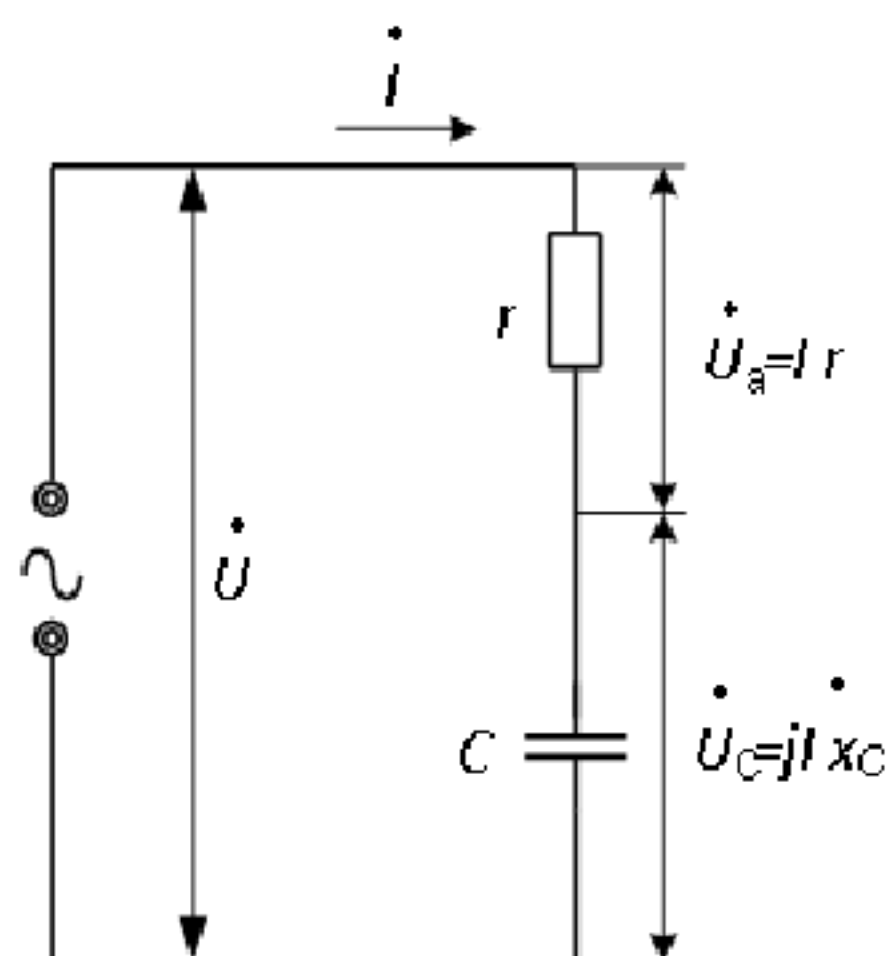


Рисунок 2.5 – Последовательное соединение R и C

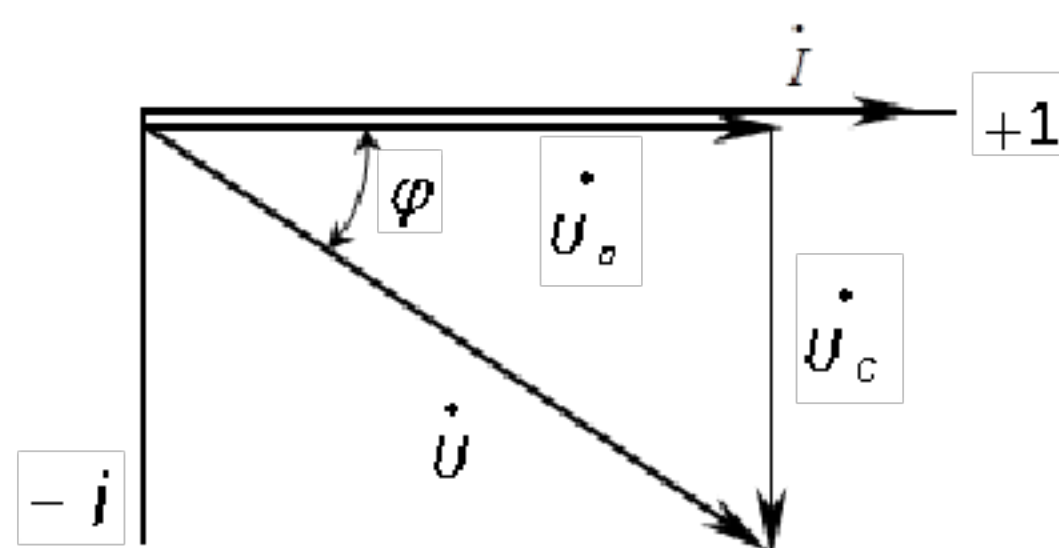


Рисунок 2.6 – Векторная диаграмма для последовательного соединения R и C

При этом необходимо иметь в виду, что вектор напряжения $\dot{U}_C$ отстает от тока $\dot{I}$ на 90° (рис 2.6).

Из треугольника OAB на рисунке 6 имеем:

$$U^2 = U_a^2 + U_C^2$$

или

$$U^2 = (Ir)^2 + \left(\frac{I}{\omega C}\right)^2 = I^2 \left(r^2 + \frac{1}{\omega C}\right)^2.$$

Извлекая квадратный корень из обеих частей, получим:

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_C^2}}.$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
В ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Емкостное сопротивление называется емкостным сопротивлением и измеряется в Ом.
Емкостное сопротивление зависит от частоты напряжения сети и от емкости конденсатора.

Величина $\sqrt{r^2 + x_C^2}$ называется полным сопротивлением и обозначается z . Закон Ома применительно к данной цепи переменного тока будет иметь вид:

$$I = \frac{U}{z},$$

где $z = \sqrt{r^2 + x_C^2}$.

Если все стороны треугольника напряжений OAB разделить на ток I , то получим треугольник сопротивлений с катетами r и x_C и гипотенузой z .

При последовательном соединении r , L и C будут справедливы все выводы, полученные для цепи с $r-L$ и цепи с $r-C$. При этом возможны следующие комбинации:

а) $x_L > x_C$; б) $x_L < x_C$; в) $x_L = x_C$.

Рассмотрим с помощью векторных диаграмм каждый из этих вариантов.

а) Имеем цепь из последовательно соединенных r , L и C , причем

$x_L > x_C$. По всем трем сопротивлениям будет протекать один и тот же ток $\dot{I}$, вектор которого отложим в выбранном масштабе произвольно, например, горизонтально, т.е. направление первого вектора выбирается произвольно (рис. 2.7).

Вектор падения напряжения на активном сопротивлении будет совпадать с направлением тока, а падение напряжения на индуктивном элементе или $\dot{U}_L$ будет опережать вектор $\dot{I}$ на $\pi/2$. Падение напряжения на емкостном элементе $\dot{U}_C$ будет отставать от вектора тока на $\pi/2$ и согласно условию

$$\dot{U}_C < \dot{U}_L.$$

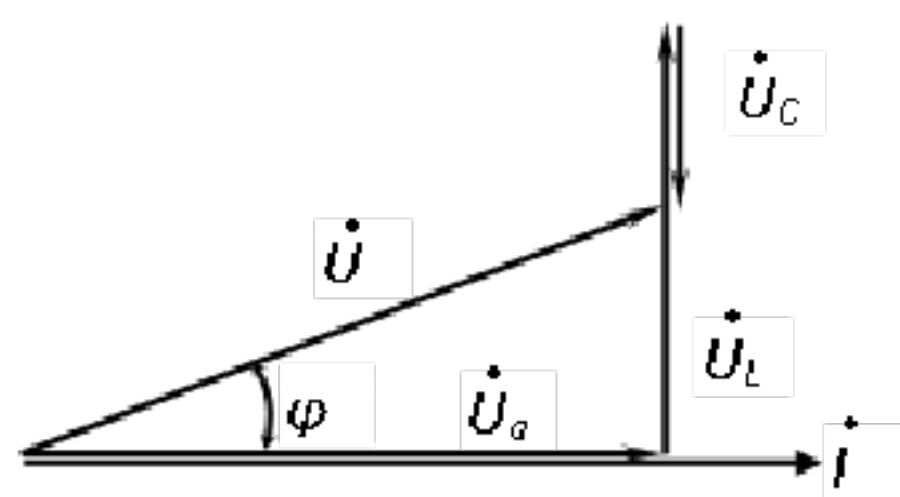


Рисунок 2.7 – Векторная диаграмма напряжений при $x_L > x_C$

Общее напряжение цепи будет равно сумме

$$\dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{U}.$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Из векторной диаграммы видно, что между током цепи $\dot{i}$ и напряжением $\dot{U}$ есть угол φ и ток имеет отстающий характер, а $\cos \varphi < 1,0$.

б) При $x_L < x_C$ падение напряжения на индуктивном сопротивлении будет меньше падения напряжения на емкостном сопротивлении, поэтому векторная диаграмма будет иметь вид (рис. 2.8):

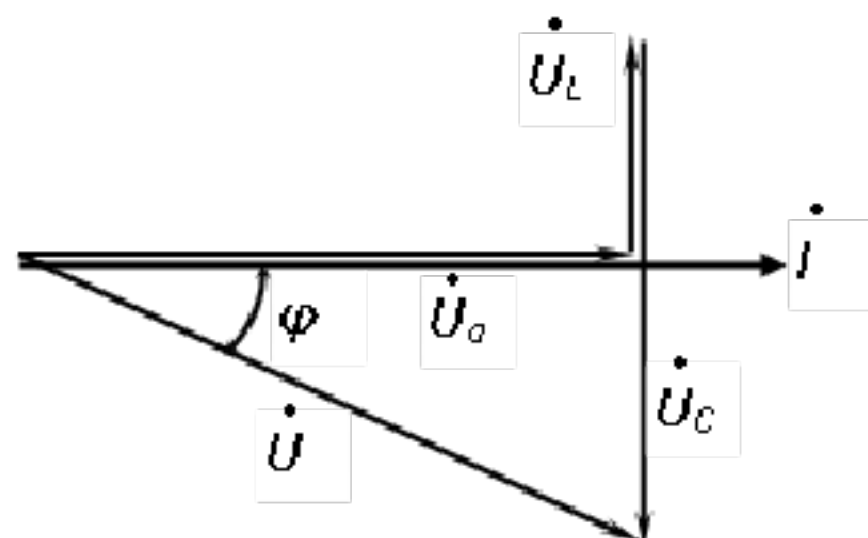


Рисунок 2.8 – Векторная диаграмма напряжений при $\dot{U}_C > \dot{U}_L$

в) При $x_L = x_C$ имеет место *резонанс напряжений*, т.е. $\dot{U}_C = \dot{U}_L$ и это будет при $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. При этом векторы $\dot{U}_L$ и $\dot{U}_C$ равны по модулю и противоположно направлены (рис. 2.9), поэтому их сумма равна нулю. Ток цепи при резонансе напряжений определяется только активным сопротивлением, поэтому угол сдвига фаз между током и напряжением цепи равен нулю, а $\cos \varphi = 1$. При этом надо иметь в виду, что результирующее сопротивление цепи резко уменьшится до значения $z = r$ и ток цепи при резонансе может резко возрастать.

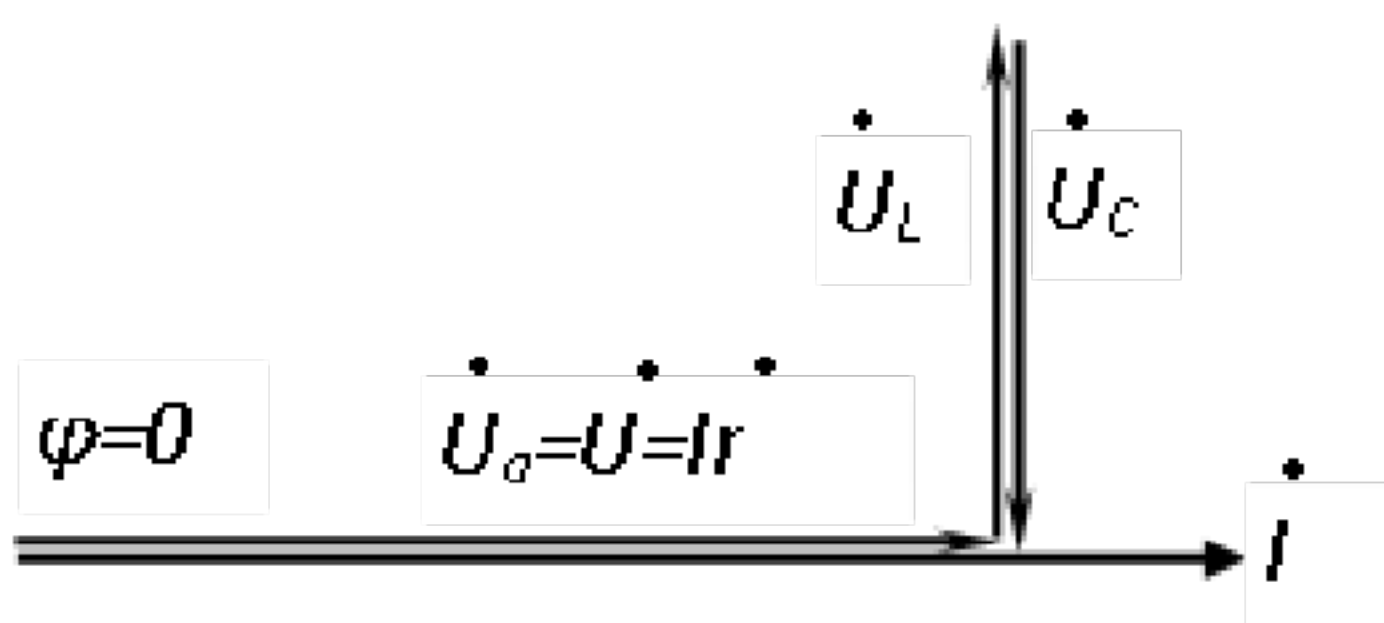


Рисунок 2.9 – Векторная диаграмма напряжений при резонансе

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены

Указания по выполнению лабораторной работы:

Собрать схему с последовательным соединением R , L и C (рис. 2.10). В качестве активного сопротивления используется регулировочный реостат R , а в качестве емкости C – батарея конденсаторов.

Вольтметром V_1 измеряют входное (общее) напряжение цепи, а вольтметром V_2 с помощью щупов поочередно измеряют падение напряжения на активном сопротивлении R (в точках а и б), на индуктивности L (в точках в и г) и емкости C (в точках г и д).

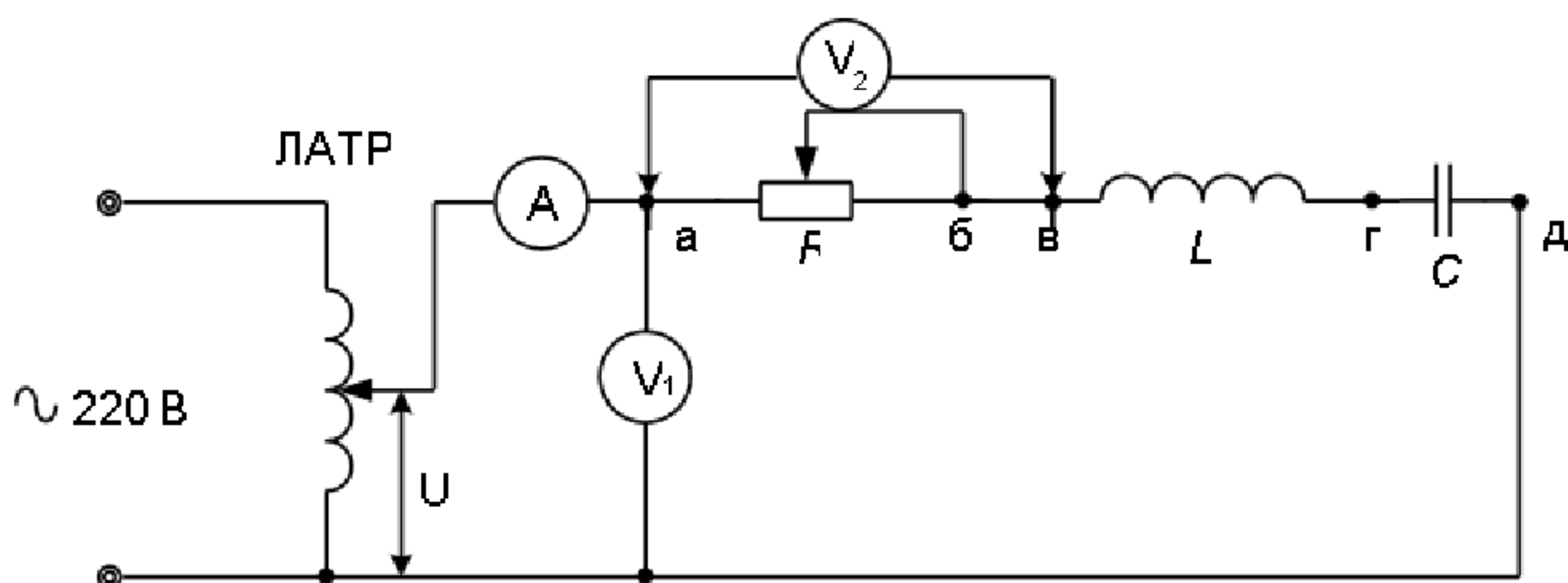


Рисунок 2.10 – Схема с последовательным соединением R , L и C

Измерения необходимо выполнять для трех режимов:

- 1) $U_L > U_C$; 2) $U_L < U_C$; 3) $U_L = U_C$.

Для каждого из режимов выполнить расчеты и вместе с результатами измерений занести в таблицу 2.1. По результатам расчетов для каждого из режимов построить векторную диаграмму напряжений, для чего необходимо выбрать масштаб напряжения m_U таким образом, чтобы вектор напряжения цепи U был примерно равен 8 – 12 см.

Таблица 2.1 – Результаты измерений и вычислений

№ опыта	Измеренные величины					Вычисленные величины			
	U	I	U_R	U_L	U_C	$\cos \varphi$	S	P	Q
	B	A	B	B	B	-	BA	Bm	BAp
1									
2									
3									

Внимание! При резонансе напряжений ток цепи определяется активным сопротивлением R , поэтому амперметр может зашкаливать. В этом случае необходимо подобрать

амперметр с меньшим пределом измерения и при резонансе переключить его на боль-

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что понимают под индуктивностью и как она определяется?
2. Как и почему изменяется индуктивность при введении в катушку стального сердечника?
3. Что понимают под емкостью и как она определяется?
4. Что называют угловой частотой ω ?
5. По каким формулам определяют r ; x_L ; x_C и z цепи переменного тока?
6. Каковы основные соотношения и векторные диаграммы в цепях с активной, индуктивной и емкостной нагрузкой?
7. При каких условиях возникает резонанс напряжений?
8. Чему равен коэффициент мощности $\cos \varphi$ при различных условиях и как он определяется?

Лабораторная работа №6. Электрическая цепь синусоидального тока при параллельном включении активного и реактивных сопротивлений

Цель работы: Экспериментальная проверка зависимости активного и реактивных сопротивлений от частоты, а также соотношений между напряжением, сопротивлениями, проводимостями и токами в цепи с параллельно включенными активным сопротивлением, катушкой индуктивности и конденсатором.

Основы теории:

При параллельном включении активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора (рис. 3.1) на все три элемента электрической цепи подаётся одно и то же напряжение u . Мгновенное значение тока i в не-разветвлённой части цепи равно сумме мгновенных значений токов резистора i_r , катушки i_k и конденсатора i_c :

$$i = i_r + i_k + i_c$$

Соответствующее равенство справедливо для комплексов токов:

$$\dot{I} = \dot{I}_r + \dot{I}_k + \dot{I}_c$$

Комплексы токов определяются комплексом напряжения $\dot{U}$ и комплексными сопротивлениями соответствующих элементов цепи:

$$\dot{I}_r = \dot{U}/r, \quad \dot{I}_k = \dot{U}/Z_k, \quad \dot{I}_c = \dot{U}/Z_c$$

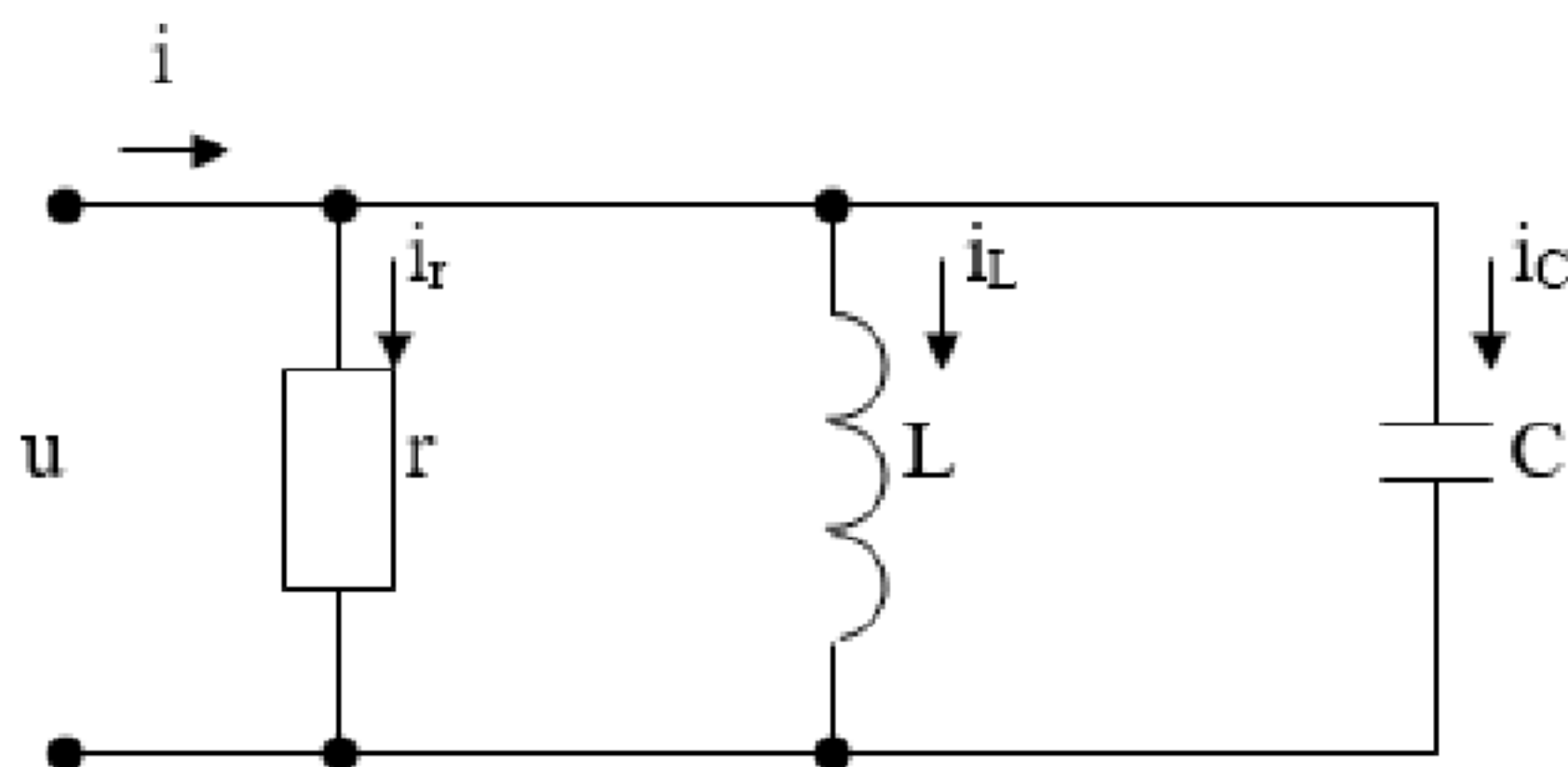
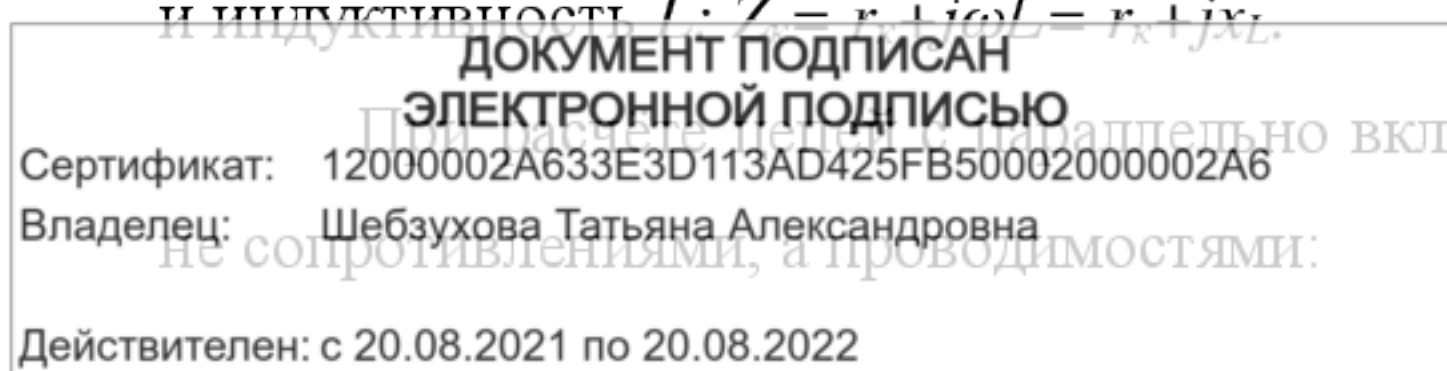


Рисунок 3.1 – Параллельное включение активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора

Комплексное сопротивление резистора равно его активному сопротивлению r , комплексное сопротивление катушки индуктивности учитывает её активное сопротивление r_k и индуктивность L : $Z = r + j\omega L = r_k + jx_L$.

Параллельно включёнными элементами удобнее пользоваться не сопротивлениями, а проводимостями:



$$Y_r = 1/r = g_r,$$

$$Y_k = 1/Z_k = 1/(r_k + j\omega L) = r/(r^2 + x_L^2) - jx_L/(r^2 + x_L^2) = g_k - jb_k$$

Комплексная проводимость конденсатора с учётом проводимости изоляции между обкладками g_c :

$$Y_c = g_c + j\omega C = g_c + jb_c$$

$$\dot{I} = \dot{U}[(g_r + g_k + g_c) + j(b_c - b_k)] = \dot{U}Y$$

Ток, протекающий через катушку индуктивности, можно представить в виде двух составляющих: активной $\dot{I}_{ak} = \dot{U}g_k$, по фазе, совпадающей с напряжением, и реактивной $\dot{I}_L = -j\dot{U}b_L$, отстающей по фазе от напряжения на 90° .

Ток, протекающий через конденсатор, также можно представить в виде суммы активной $\dot{I}_{ac} = \dot{U}g_c$ и реактивной $\dot{I}_{pc} = j\dot{U}b_c$ составляющих; реактивная составляющая опережает по фазе напряжение на 90° . Схема замещения при замене сопротивлений проводимостями имеет вид, изображённый на рис.3.2.

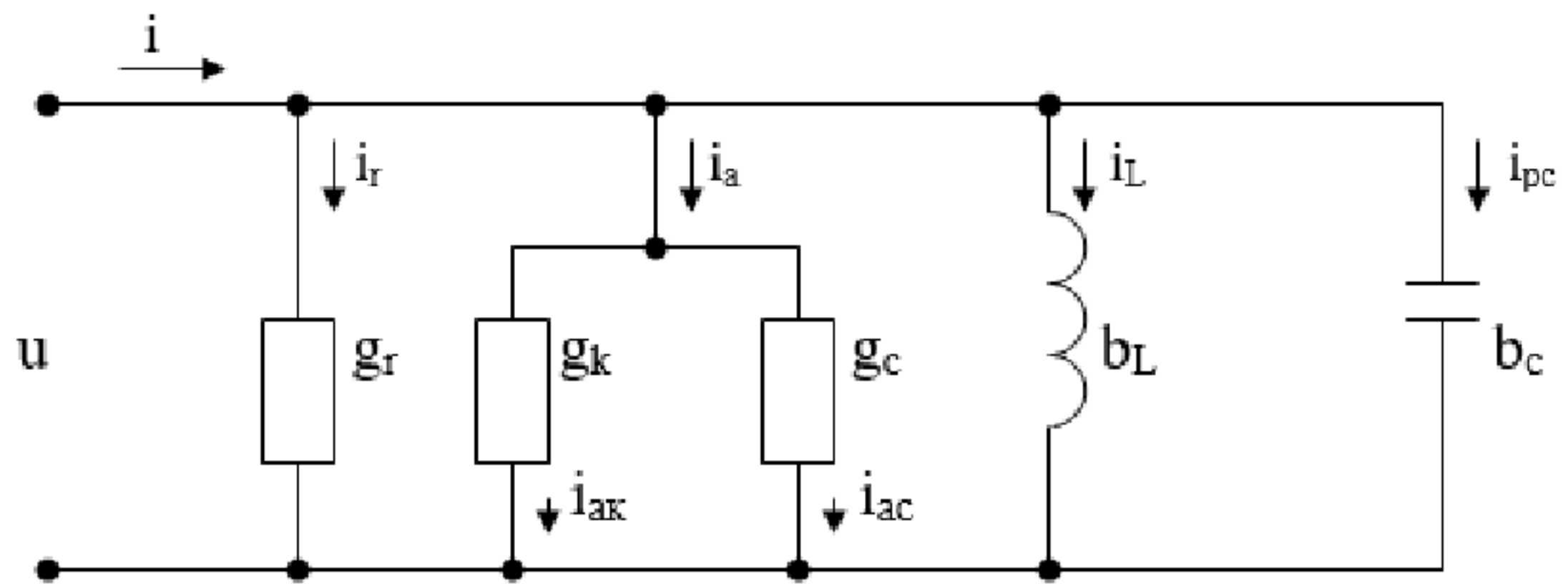


Рисунок 3.2 – Схема замещения

Вид векторных диаграмм напряжения и токов рассматриваемой схемы зависит от соотношения проводимостей b_k и b_c (рис.3.3).

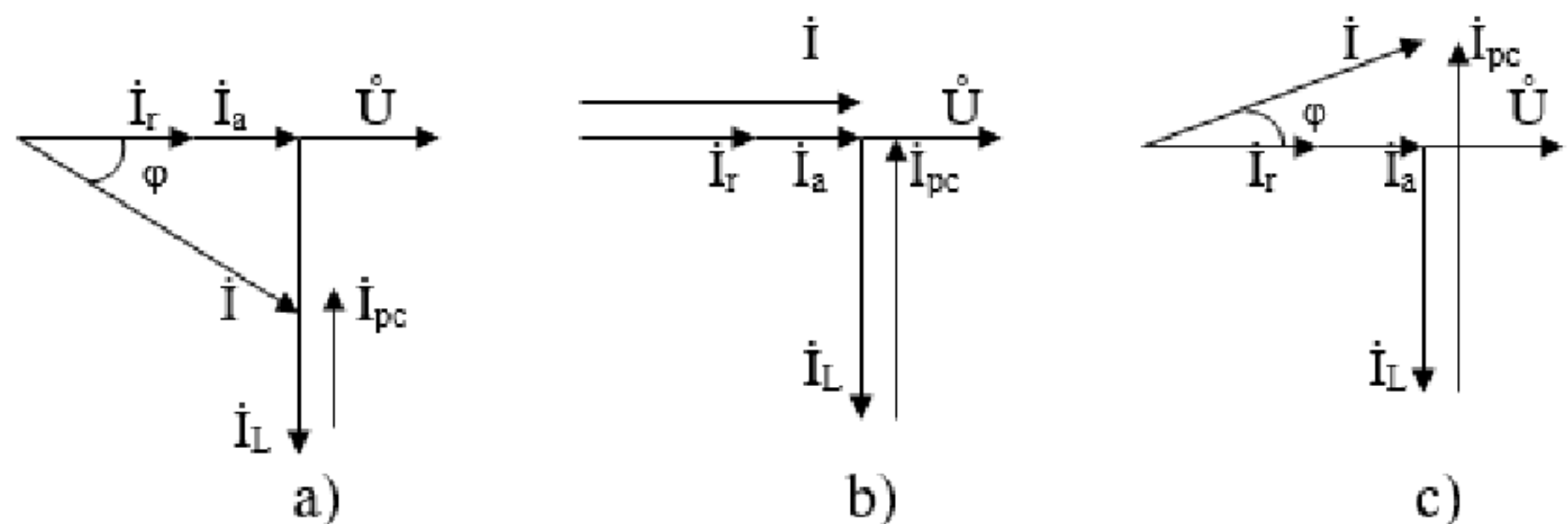


Рисунок 3.3 – Векторная диаграмма

Если $b_L > b_C$, то ток через индуктивность больше, чем через ёмкость, и ток в неразветвленной части цепи по фазе отстаёт от напряжения (рис. 4.3а). Если $b_L < b_C$, то ток через индуктивность меньше, чем ток через ёмкость, а ток в неразветвленной части цепи по фазе опережает напряжение (рис. 3.3с).

При равенстве индуктивной и ёмкостной проводимостей величина тока в неразветвленной части цепи определяется только суммой активных проводимостей $g_r + g_k + g_c = g$, при этом ток по фазе совпадает с напряжением (рис. 4.3б):

$$\dot{I} = \dot{U}g.$$

Векторная диаграмма, изображённая на рис. 4.3б соответствует режиму резонанса токов, в этом режиме токи через индуктивность и через ёмкость равны по величине и противоположны по фазе, в неразветвлённой части цепи ток принимает минимальное значение.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Детально ознакомившись с основными теоретическими положениями, собрать схему, изображённую на рис. 3.4.

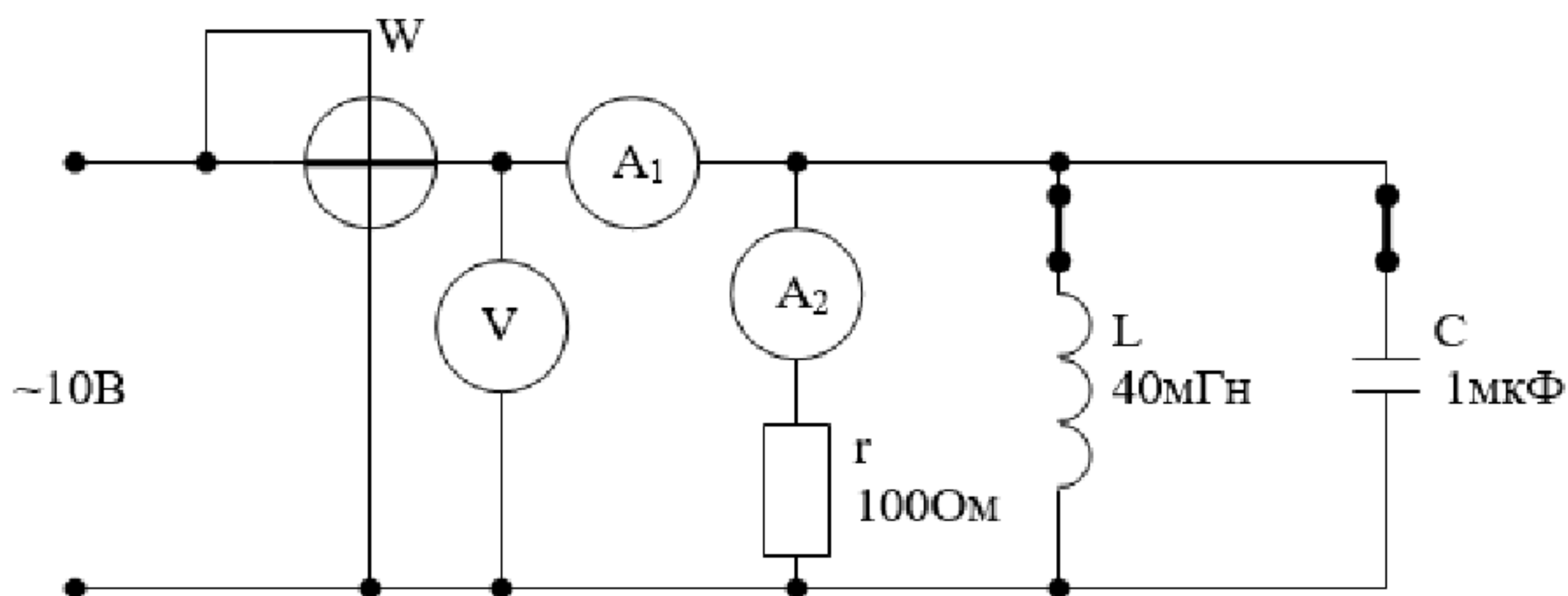
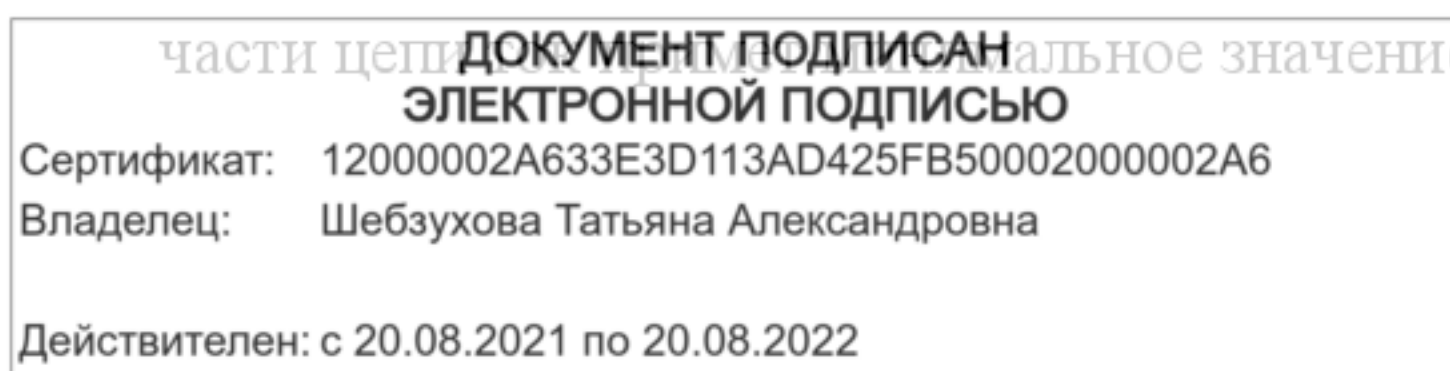


Рисунок 3.4 – Схема с параллельным соединением R, L и C

Установить пределы измерений: вольтметра – 20В, амперметров – 200мА.

Подать напряжение питания и установить частоту f_0 , при которой в неразветвлённой части цепи ток принимает минимальное значение. Значение частоты f_0 занести в таблицу 3.1.



2. Убрать перемычки в цепи катушки и конденсатора, по показаниям амперметра и вольтметра или амперметра и ваттметра проверить сопротивление и вычислить проводимость резистора.

$$r=U/I=P/I^2, g_r=1/r=I/U=P/U^2.$$

3. Разорвать цепь резистора и установить перемычку в цепи катушки, по показаниям приборов вычислить сопротивления и проводимости катушки.

$$r=P/I^2, z_k=U/I, x_L=\sqrt{(z_k^2-r^2)},$$

$$g_k=P/U^2, y_k=I/U, b_L=\sqrt{(y_k^2-g_k^2)}.$$

4. Разорвать цепь катушки и установить перемычку в цепи конденсатора, используя формулы, аналогичные формулам п.3, по показаниям приборов вычислить сопротивления и проводимости конденсатора. Вычисленные значения сопротивлений и проводимостей занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

f ₀ , Гц	Резистор		Катушка					Конденсатор					g, См
	r, Ом	g _r , См	r _k , Ом	g _k , См	x _L , Ом	b _L , См	L, Гн	r _c , Ом	g _c , См	x _c , Ом	b _c , См	C, мкФ	

5. Установить все перемычки, подключить амперметр А2, при частоте f₀ измерить потребляемую мощность, напряжение, ток в неразветвлённой части цепи и токи отдельных ветвей. Результаты замеров занести в таблицу 3.2.

6. Вычислить значения активных и реактивных составляющих токов через катушку и через конденсатор и коэффициент мощности, пользуясь выражениями:

$$I_{ak}=g_k U, I_{ac}=g_c U, I_a=I_{ak}+I_{ac}, I_L=\sqrt{(I_k^2-I_{ak}^2)}, I_{pc}=\sqrt{(I_c^2-I_{ac}^2)},$$

$$\cos\varphi=(I_r+I_{ak}+I_{ac})/I.$$

Результаты вычислений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

f, Гц	U, В	I, мА	I _r , мА	I _k , мА	I _c , мА	P, мВт	y, См	b, См	I _a , мА	I _L , мА	I _{pc} , мА	cosφ
f ₁ =												
f ₀ =												
f ₂ =												

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Численность: 1
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

при частоте f₁=f₀-200 Гц и f₂=f₀+200 Гц произвести те же измерения и вычисления, что и при частоте f₀, результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.2.

При выполнении расчётов не следует забывать, что сопротивления и проводимости индуктивности и ёмкости зависят от частоты.

8. По результатам измерений и вычислений построить векторные диаграммы, аналогичные представленным на рис.2.3.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как определить активную и реактивную проводимости катушки, если известны её активное и индуктивное сопротивления?
2. Как зависят реактивные проводимости катушки индуктивности и конденсатора от частоты?
3. Как определить активную проводимость катушки индуктивности или конденсатора, пользуясь показаниями ваттметра, амперметра и вольтметра?
4. Как определить полную проводимость участка электрической цепи по показаниям электроизмерительных приборов?
5. Как отличаются по фазе приложенное напряжение и ток, протекающий по катушке индуктивности? через конденсатор?
6. Почему и как изменится ток через конденсатор (через катушку индуктивности) при увеличении частоты приложенного напряжения?
7. В какой электрической цепи может возникнуть режим резонанса токов? Каково условие его возникновения? Поясните физическую сущность режима резонанса токов.

Лабораторная работа №7. Исследование трехфазной системы при соединении потребителей звездой

Цель работы: Ознакомиться опытным путем с особенностями соединения звездой приемников электрической энергии в цепи трехфазного тока. Исследовать режимы равномерной и неравномерной нагрузок, а также работу системы при обрыве одной из фаз. Получить практические навыки расчета и испытания трехфазных цепей, а также построения векторных диаграмм.

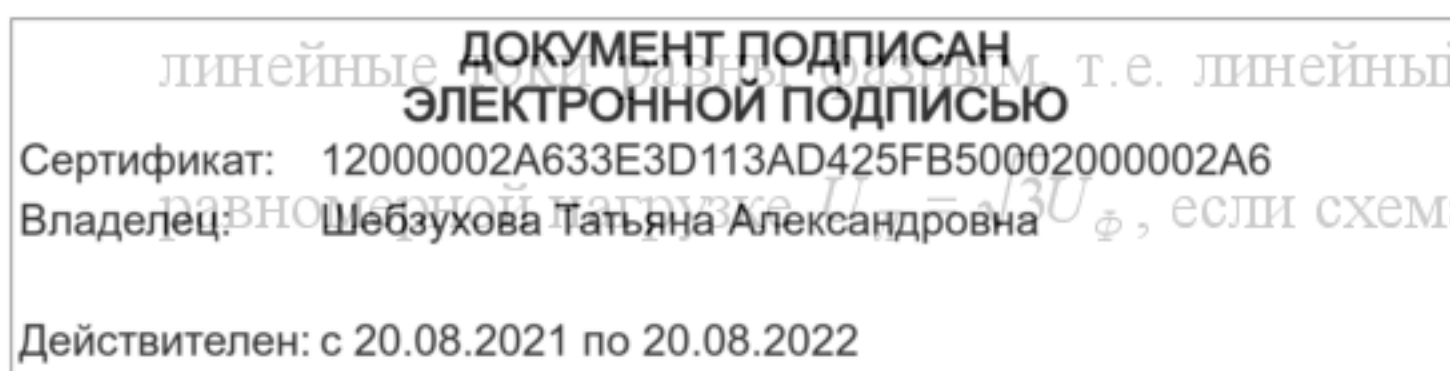
Основы теории:

Трехфазной системой электрических цепей называется система, состоящая из трех однофазных электрических цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные э.д.с. одинаковой частоты, но сдвинутые друг относительно друга на $1/3$ периода (120°) и создаваемые общим (трехфазным) источником электрической энергии.

Отдельные электрические цепи, входящие в состав трехфазной системы, называют *фазами*. Если э.д.с. каждой из фаз равны по величине, а полные сопротивления нагрузок всех трех фаз по величине и характеру нагрузки (по величине и знаку фазового сдвига) одинаковы, то такой режим называют *симметричным*. Невыполнение данных условий является причиной *несимметричного* режима. Нагрузка трехфазных цепей редко бывает симметричной, как правило, она в той или иной степени несимметрична из-за наличия однофазных потребителей.

Трехфазные генераторы создают симметричную систему э.д.с., поэтому несимметричный режим возникает из-за несимметричной нагрузки фаз. Если концы обмоток фаз синхронного генератора или трансформатора соединить вместе звездой, а к началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии, которые тоже соединить звездой, то получим трехфазную систему (рис. 1). Провод, соединяющий нулевые точки источника и потребителя называется нулевым. Такую систему называют *четырёхпроводной*. В цепях трехфазного тока независимо от способа соединения обмоток генератора и потребителей различают напряжения – линейные U_L и фазные U_Φ , а также токи – линейные I_L и фазные I_Φ . Напряжение между линейным и нулевым проводом называется *фазным*, а между линейными проводами – *линейным*. Токи, протекающие в линейных проводах, называют *линейными*, а протекающие в фазах нагрузки или источника – *фазными*. В схеме (рис. 4.1)

линейные ток одновременно является и фазным. При равномерной нагрузке $I_L = I_\Phi$, если схема соединения - звезда.



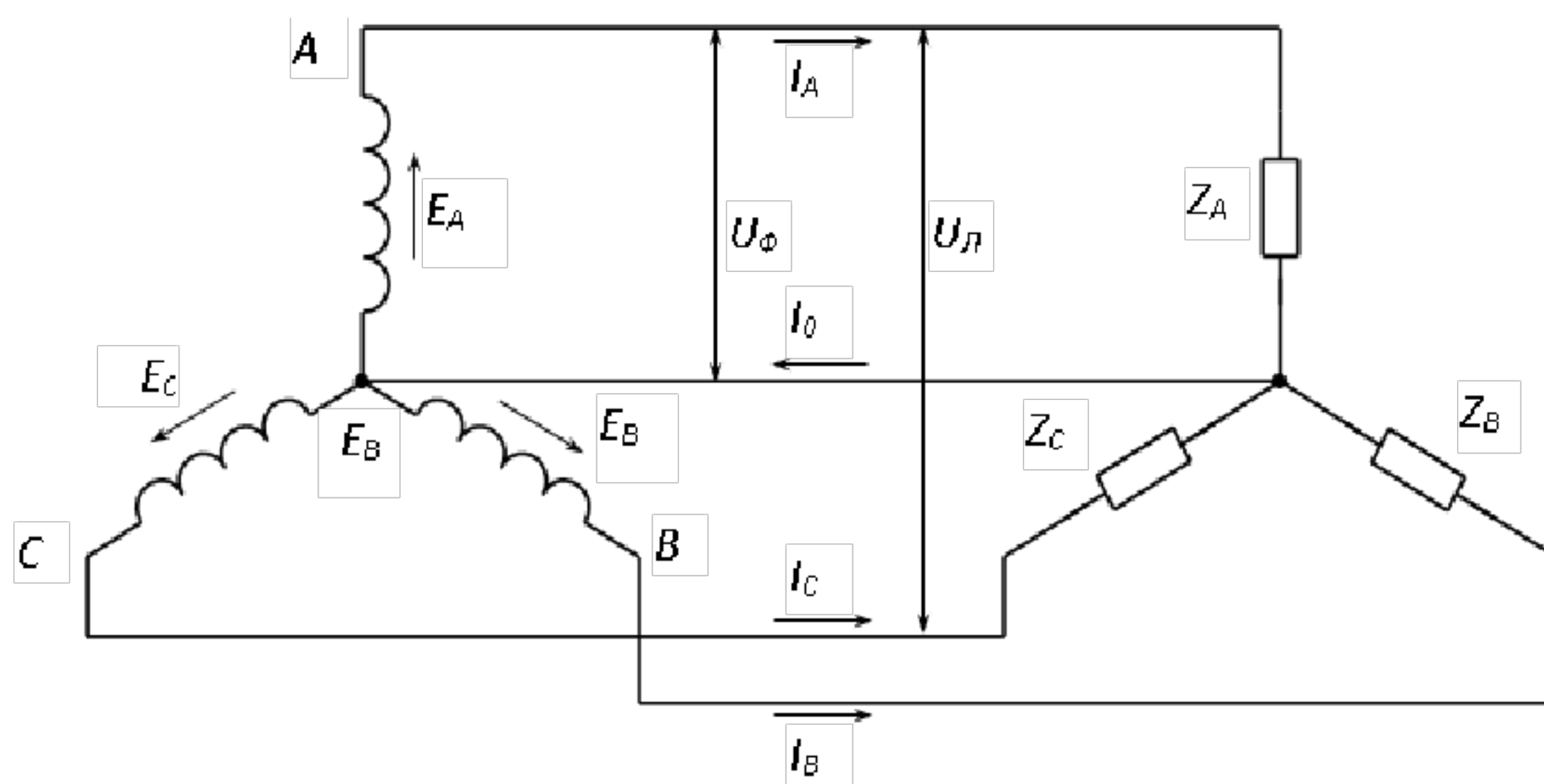


Рисунок 4.1 – Схема трехфазной четырехпроводной цепи при соединении звездой

При неравномерной нагрузке фаз в схеме с нулевым проводом (рис. 4.1), в нулевом проводе появляется ток, величина которого определяется по первому закону Кирхгофа:

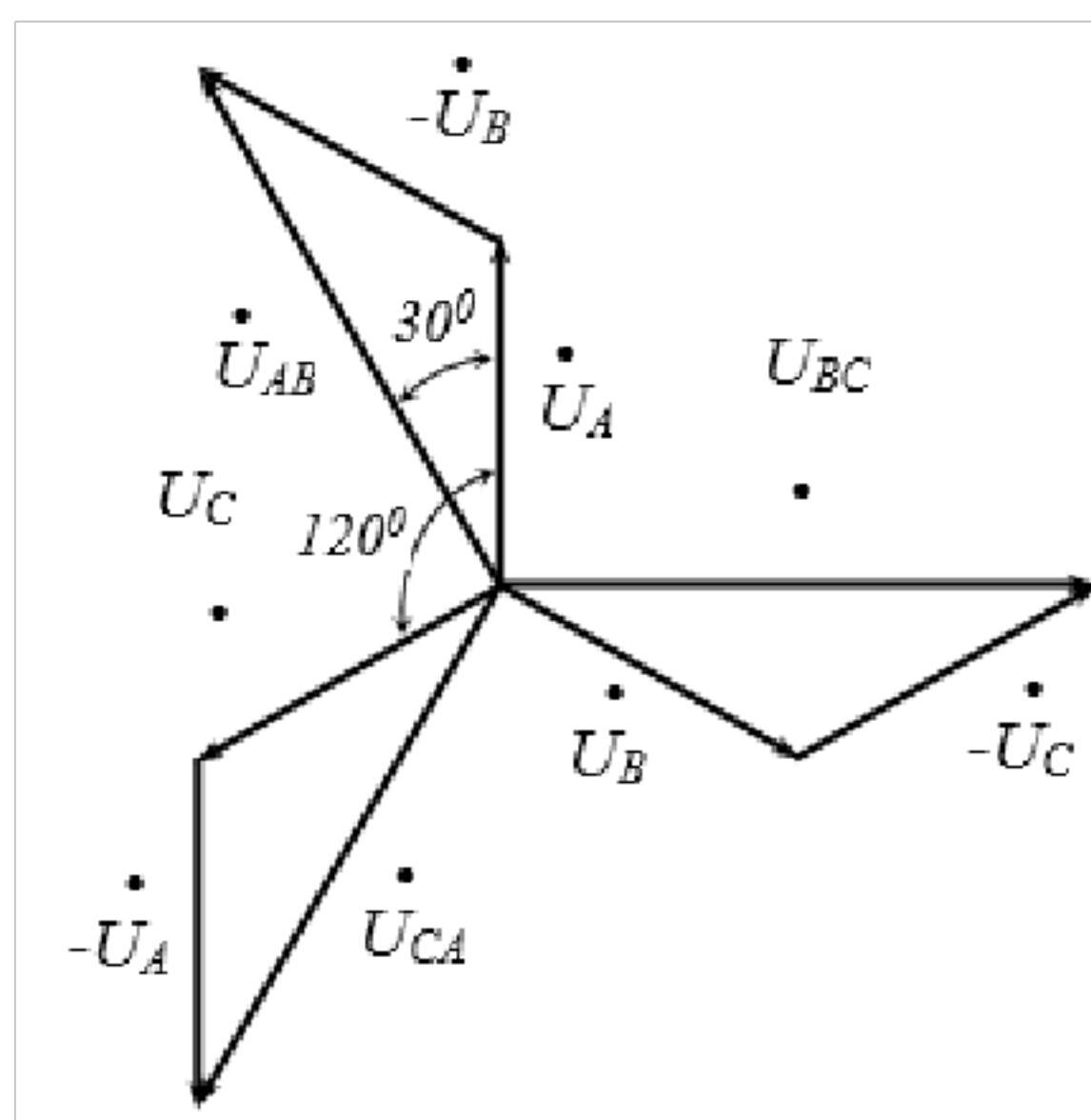


Рисунок 4.2 – Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

Наличие тока в нулевом проводе вызывает незначительное падение напряжения в нем, которым можно пренебречь и считать, что между нулевой точкой источника и приемника разность потенциалов отсутствует.

На рис. 4.2 показано графическое определение линейных напряжений с помощью векторной диаграммы. Отложим для произвольного момента времени комплексы фазных

напряжений, смещенные относительно друг друга на 120° .

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B ,$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C ,$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A ,$$

Для получения линейных напряжений сложим геометрически векторы $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ с векторами $-\dot{U}_B$, $-\dot{U}_C$, $-\dot{U}_A$, которые равны соответственно $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$, $\dot{U}_A$, но противоположно направлены.

Векторная диаграмма линейных напряжений также может быть получена из векторной диаграммы фазных напряжений (рис. 3). Таким образом, звезда линейных напряжений опережает звезду фазных на 30° . Найдем соотношение между фазными и линейными напряжениями, учитывая, что все напряжения симметричны:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_\Phi$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{CA} = \dot{U}_\text{Л} .$$

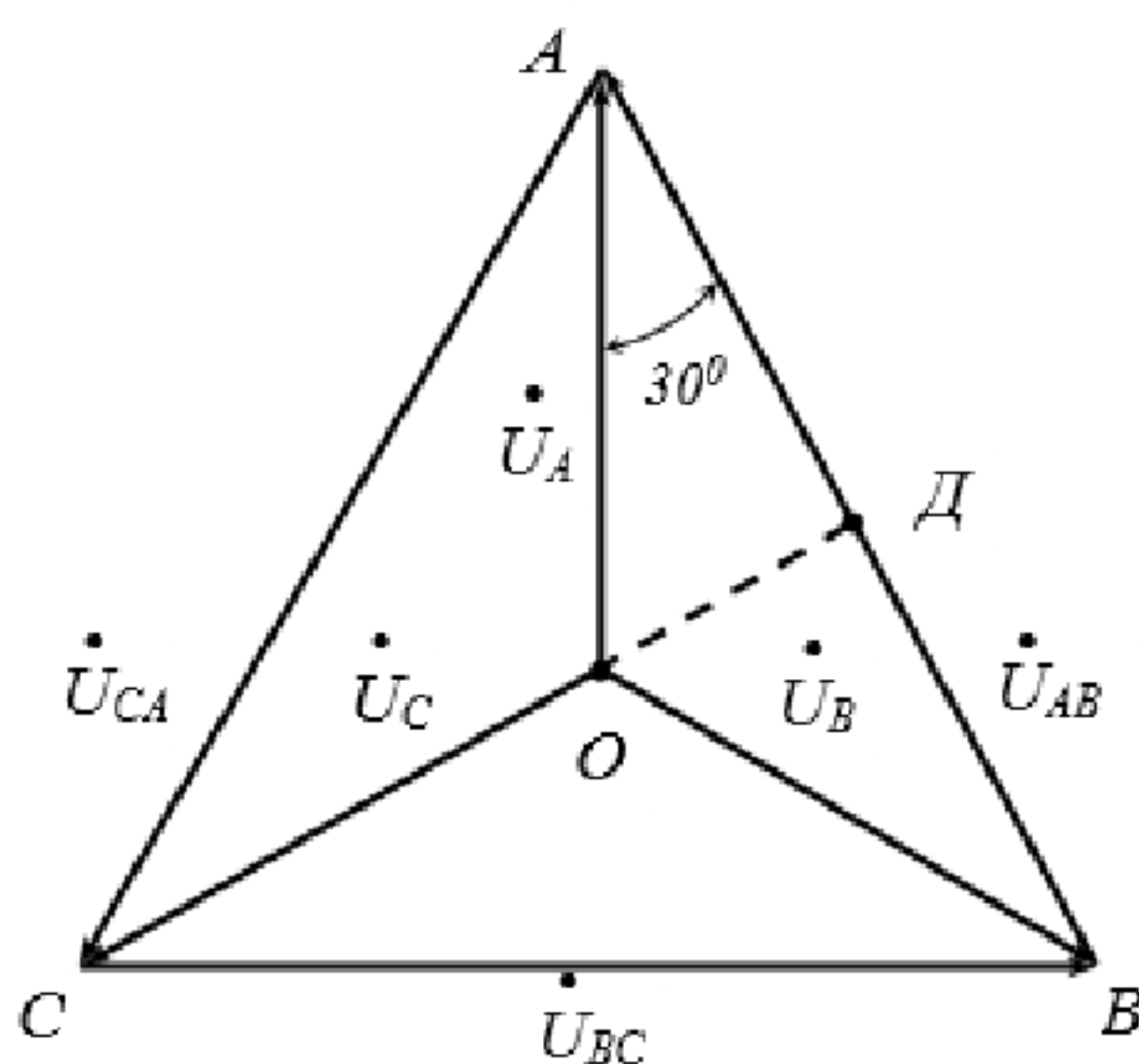
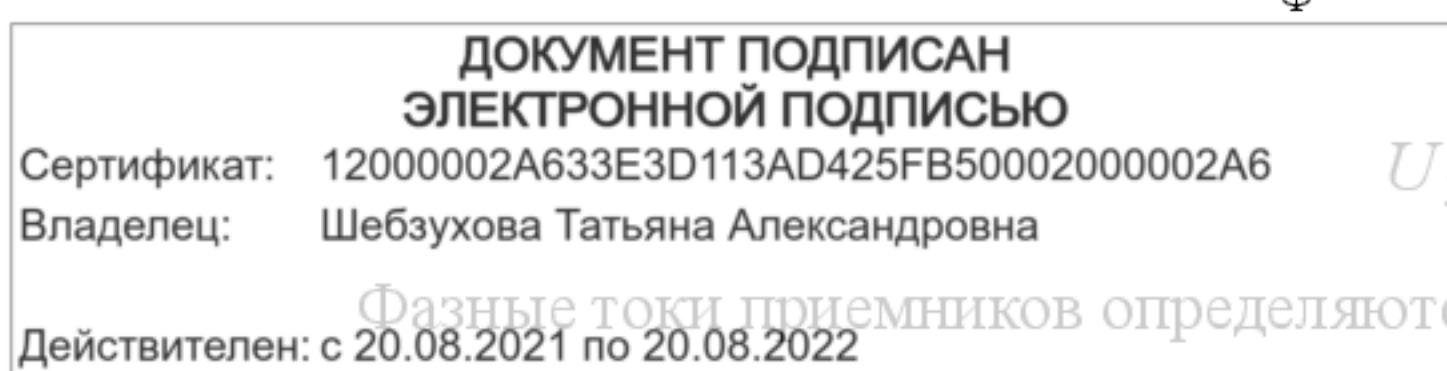


Рисунок 4.3 – Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой

Из прямоугольного треугольника OAD имеем:

$$\begin{aligned} \frac{U_\text{Л}}{2} &= \frac{U_{AB}}{2} = U_A \cdot \cos 30^\circ = \\ &= U_\Phi \cdot \cos 30^\circ = U_\Phi \frac{\sqrt{3}}{2} , \end{aligned}$$

$$U_\text{Л} = \sqrt{3}U_\Phi$$



Фазные токи приемников определяются так же, как и в однофазных цепях:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_A} = \frac{\dot{U}_A}{\sqrt{r_A^2 + x_A^2}};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{z_B} = \frac{\dot{U}_B}{\sqrt{r_B^2 + x_B^2}};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{z_C} = \frac{\dot{U}_C}{\sqrt{r_C^2 + x_C^2}},$$

Углы сдвига между напряжениями и токами фаз можно определить из формул:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{z_A}; \quad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B}; \quad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C}.$$

Если приемники обладают чисто активными сопротивлениями, то $z_A = r_A$, $z_B = r_B$, $z_C = r_C$, а углы сдвига между токами и напряжениями во всех трех фазах будут нулевыми. На рис. 4 представлена топографическая диаграмма напряжений и токов при активной несимметричной нагрузке.

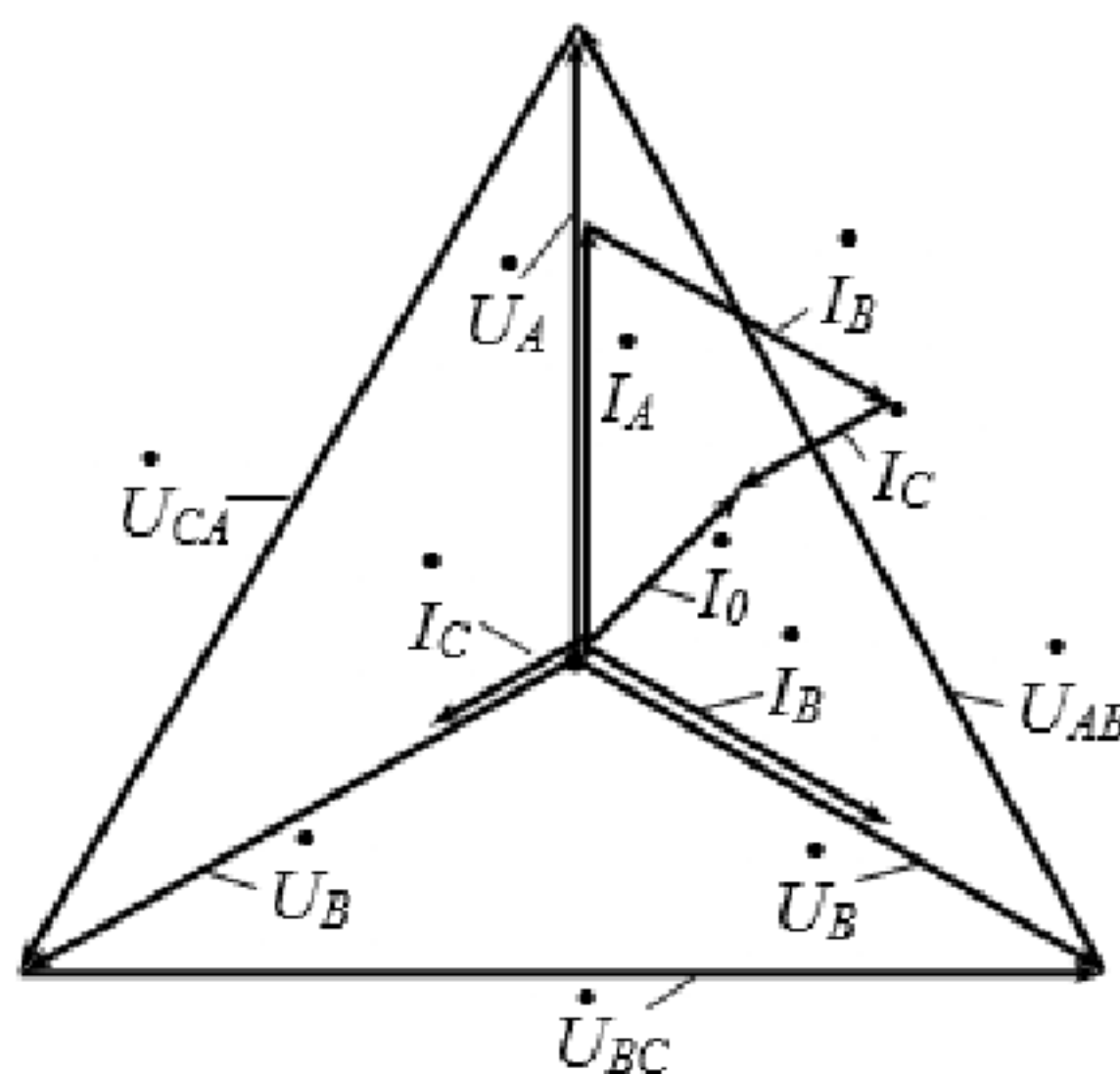


Рисунок 4.4 – Векторная диаграмма напряжений и токов четырехпроводной цепи при активной несимметричной нагрузке фаз

Ток нулевого провода $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$

Сечение нулевого провода зависит от степени несимметрии нагрузки фаз, но обычно его принимают равным 50% от сечения линейного провода.

При наличии нейтрали (нулевого провода) напряжения на фазах приемников остаются неизменными и равными фазным напряжениям источника даже при неравномерной

нагрузке, если пренебречь сопротивлением проводов линии и нулевого провода. Предельным случаем неравномерной нагрузки фаз в четырехпроводной системе трехфазного приемника, включенного звездой, можно считать обрыв одной из фаз. Например, если фаза A будет оборвана, то не будет напряжения и тока у потребителя, включенного в эту фазу, а в оставшихся под напряжением фазах режим работы не изменится. Что касается нулевого провода, то если до обрыва одной из фаз ток был равен $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ (рис. 4.4), то теперь он изменится и будет определяться по первому закону Кирхгофа: $\dot{I}_0 + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, откуда $\dot{I}_0 = -\dot{I}_B - \dot{I}_C$ (рис. 4.5)

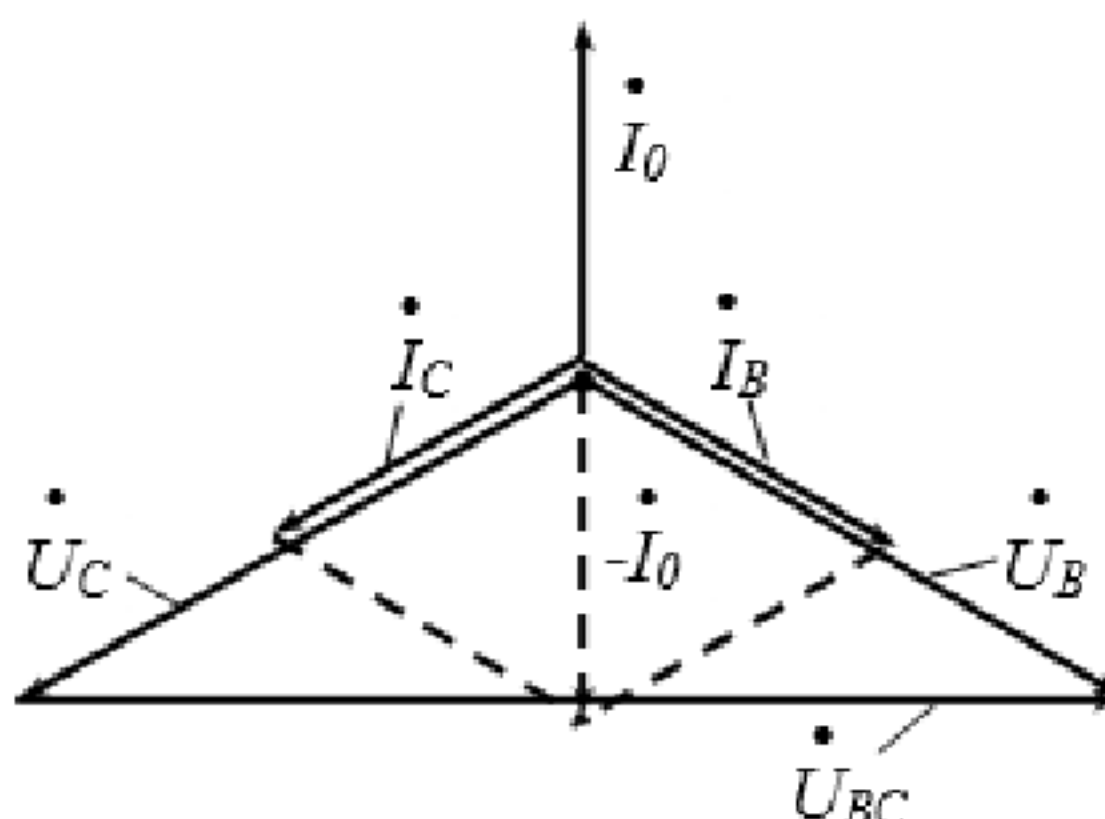


Рисунок 4.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы A

При обрыве или отсутствии в схеме нулевого провода энергетические соотношения в этой цепи изменятся.

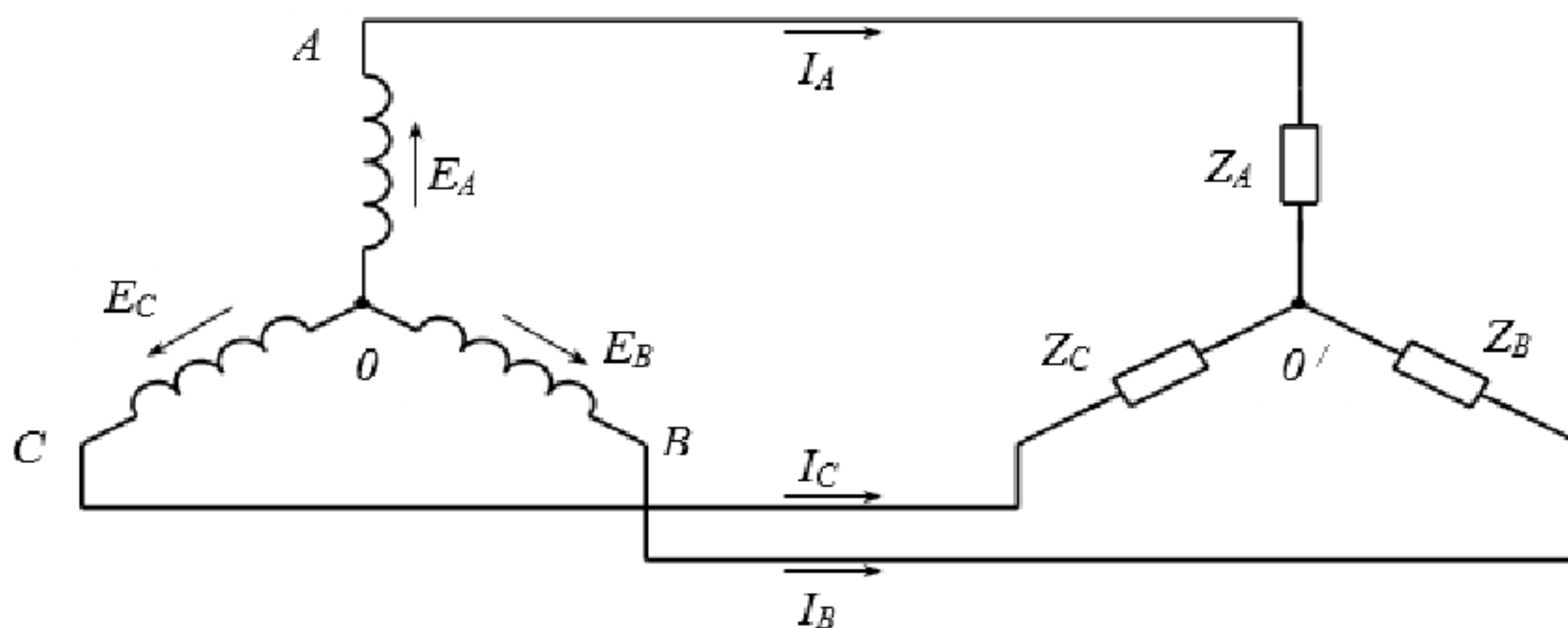


Рисунок 4.6 – Схема трехпроводной цепи трехфазного тока

При симметричной нагрузке в трехпроводной трехфазной системе (рис. 4.6) напряжение между нулевыми точками источника и приемника равно нулю и каждую фазу си-

СТЕМЫ МОЖНО РАССМОТРЕТЬ КАК ЗАМКНУТЫЙ КОНТУР.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

При неравномерной нагрузке и отсутствии нулевого провода фазные напряжения будут изменяться прямо пропорционально сопротивлениям фаз. Если бы система была четырехпроводной, то по нулевому проводу протекал бы ток I_0 и таким образом практически выравнивались бы фазные напряжения. На рис. 4.7 изображена векторная диаграмма напряжений и токов при неравномерной нагрузке всех трех фаз и отсутствии нулевого провода.

Треугольник линейных напряжений остается таким же, а звезда фазных напряжений и точка O' могут быть легко получены методом засечек из вершин линейных напряжений.

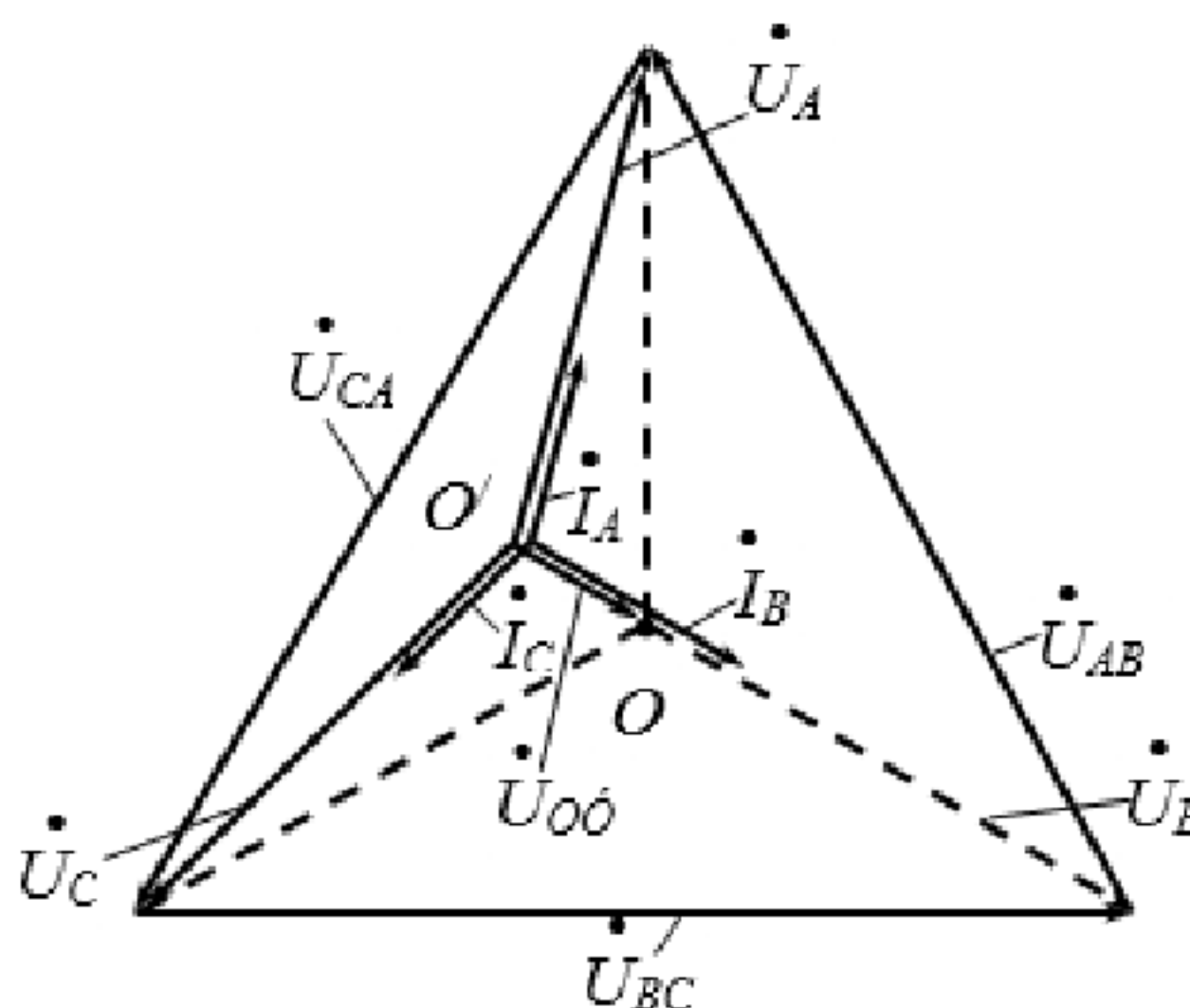


Рисунок 4.7 – Векторная диаграмма токов и напряжений при неравномерной нагрузке и отсутствие нулевого провода

Если одна из фаз, например, А, оборвется или все потребители этой фазы будут выключены, то при отсутствии нулевого провода оставшиеся под напряжением фазы В и С окажутся включенными последовательно. Фазные токи I_B и I_C , протекающие через последовательно включенные сопротивления приемника, в этом случае будут одинаковыми, а фазные напряжения будут пропорциональны сопротивлениям фаз (рис. 4.8). Поэтому на векторной диаграмме точка O' переместится на вектор линейного напряжения U_{BC} и будет делить его на части, равные фазным напряжениям U_B и U_C (в нашем случае $U_B = U_C$)

$$\dot{U}_C = \dot{U}_B = \frac{1}{2} \dot{U}_L = \frac{1}{2} \sqrt{3} \dot{U}_\phi = 0,87 \dot{U}_\phi$$

Напряжение фазы А возрастет:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AB} \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,5 \dot{U}_\phi$$

При коротком замыкании какой-либо фазы, например, C , нулевая точка O' приобретает потенциал линейного провода BC , а фазы A и B оказываются под линейным напряжением. Векторная диаграмма для этого случая представлена на рис. 4.9. Точка O' перемещается в точку C .

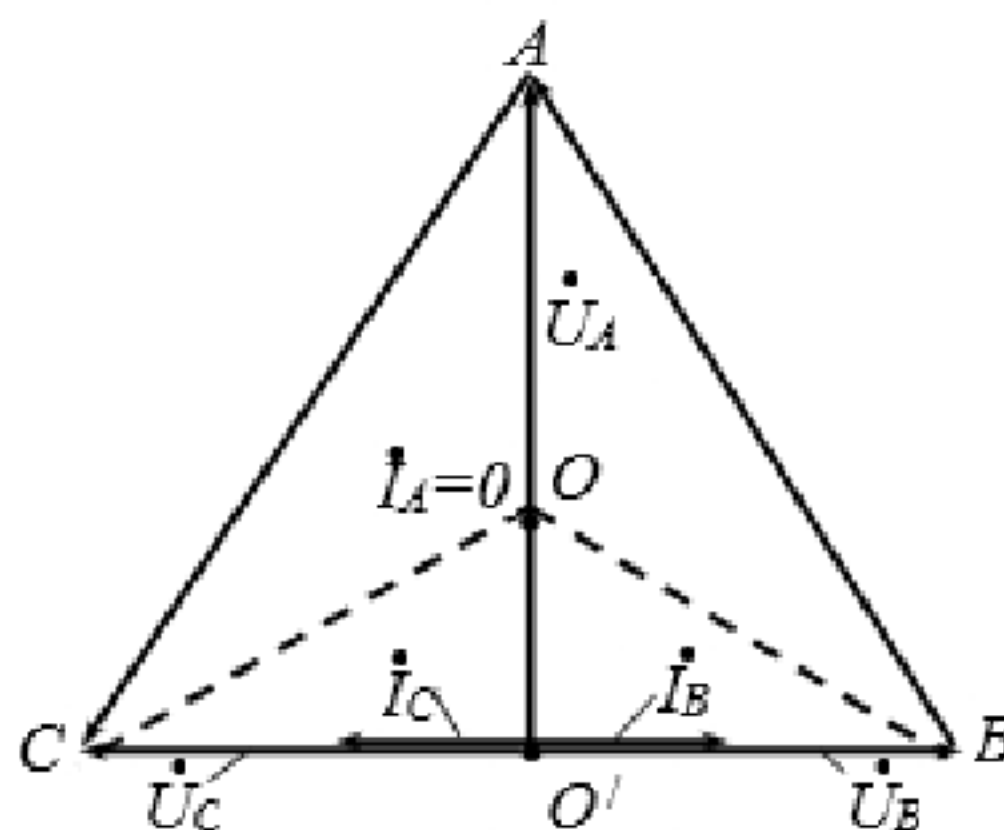


Рисунок 4.8 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы в схеме без нулевого провода

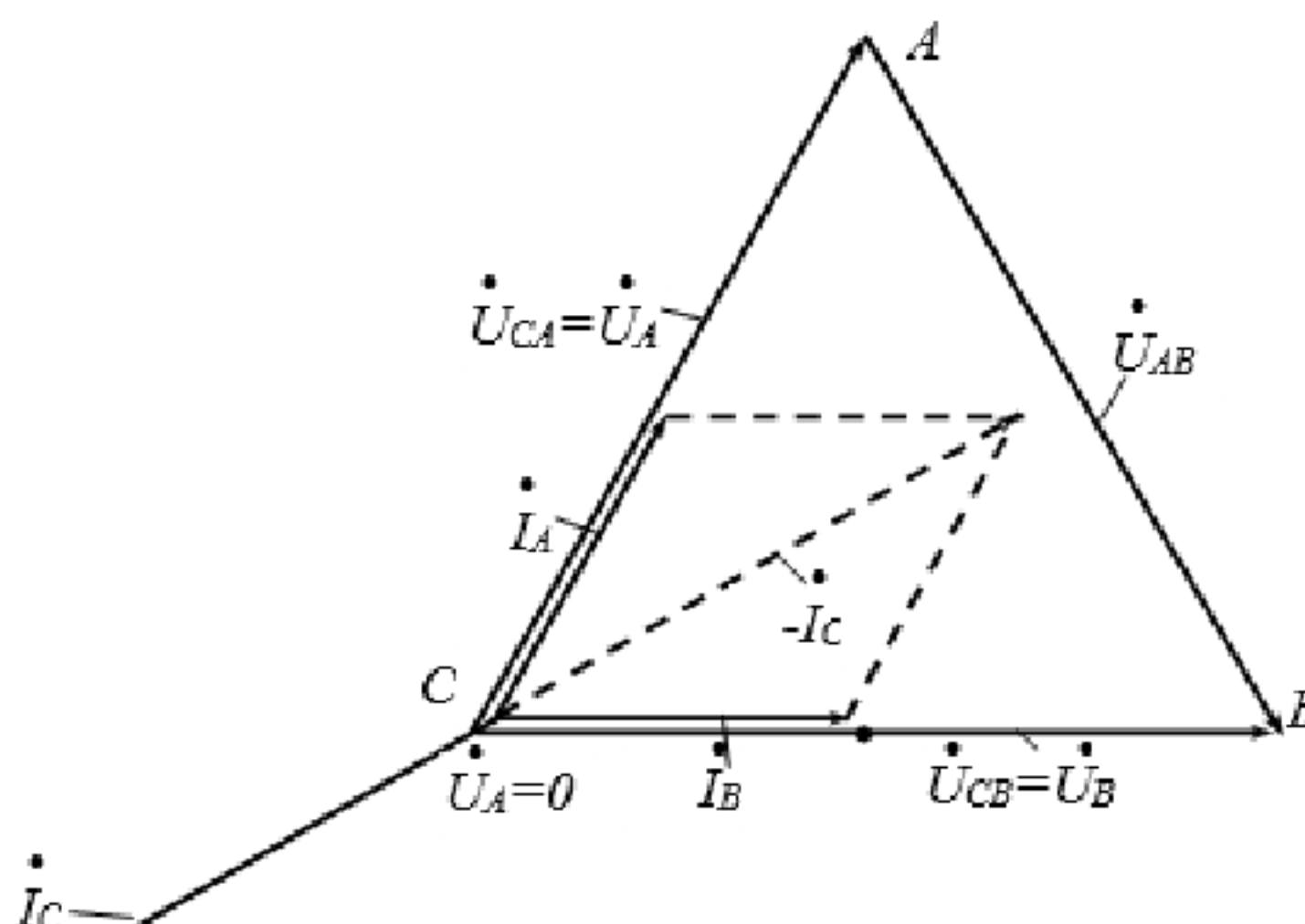
Напряжения фаз A и B становятся равными линейным (рис. 4.9):

$$U_A = U_{CA} = U_L = U_\Phi \cdot \sqrt{3},$$

$$U_B = U_{BC} = U_L = U_\Phi \cdot \sqrt{3},$$

$$U_C = 0.$$

Ток короткого замыкания фазы C распределяется на фазы B и A , т.е. $I_C = I_K = -(I_A + I_B)$. Таким образом, две фазы приемника оказываются под линейным напряжением, на которое они не рассчитаны, и они могут выйти из строя.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 4.9 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании фазы C приемника трёхпроводной системе

В цепи трехфазного тока активная мощность равна сумме активных мощностей фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = I_A \cdot U_A \cdot \cos \varphi_A + I_B \cdot U_B \cdot \cos \varphi_B + I_C \cdot U_C \cdot \cos \varphi_C$$

Для измерения мощности в четырехпроводной цепи можно использовать три однофазных ваттметра, суммируя их показания, или использовать однофазный ваттметр с переключением его поочередно во все три фазы. Этот метод может быть использован как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы и записать их технические данные.
2. Собрать схему (рис. 4.10) для исследования четырехпроводной цепи при соединении звездой.
3. Произвести испытания при следующих условиях:
 - а) при равномерной нагрузке всех фаз ($R_A=R_B=R_C$), используя в качестве нагрузки фаз ламповые реостаты;
 - б) при неравномерной нагрузке фаз ламповыми реостатами (в одной фазе 4 лампы, во второй – 3 и в третьей – 2 лампы);
 - в) при обрыве фазы А (в одной фазе все лампы отключены, а в двух других – включены).
4. Собрать схему для исследования трехпроводной трехфазной цепи при соединении звездой (рис. 4.11).
5. Произвести испытания при следующих режимах работы:
 - а) равномерная нагрузка всех фаз ламповыми реостатами;
 - б) неравномерная нагрузка фаз (аналогично 4,б)
 - в) обрыв фазы (в одной фазе все лампы отключены, а в двух других – включены);

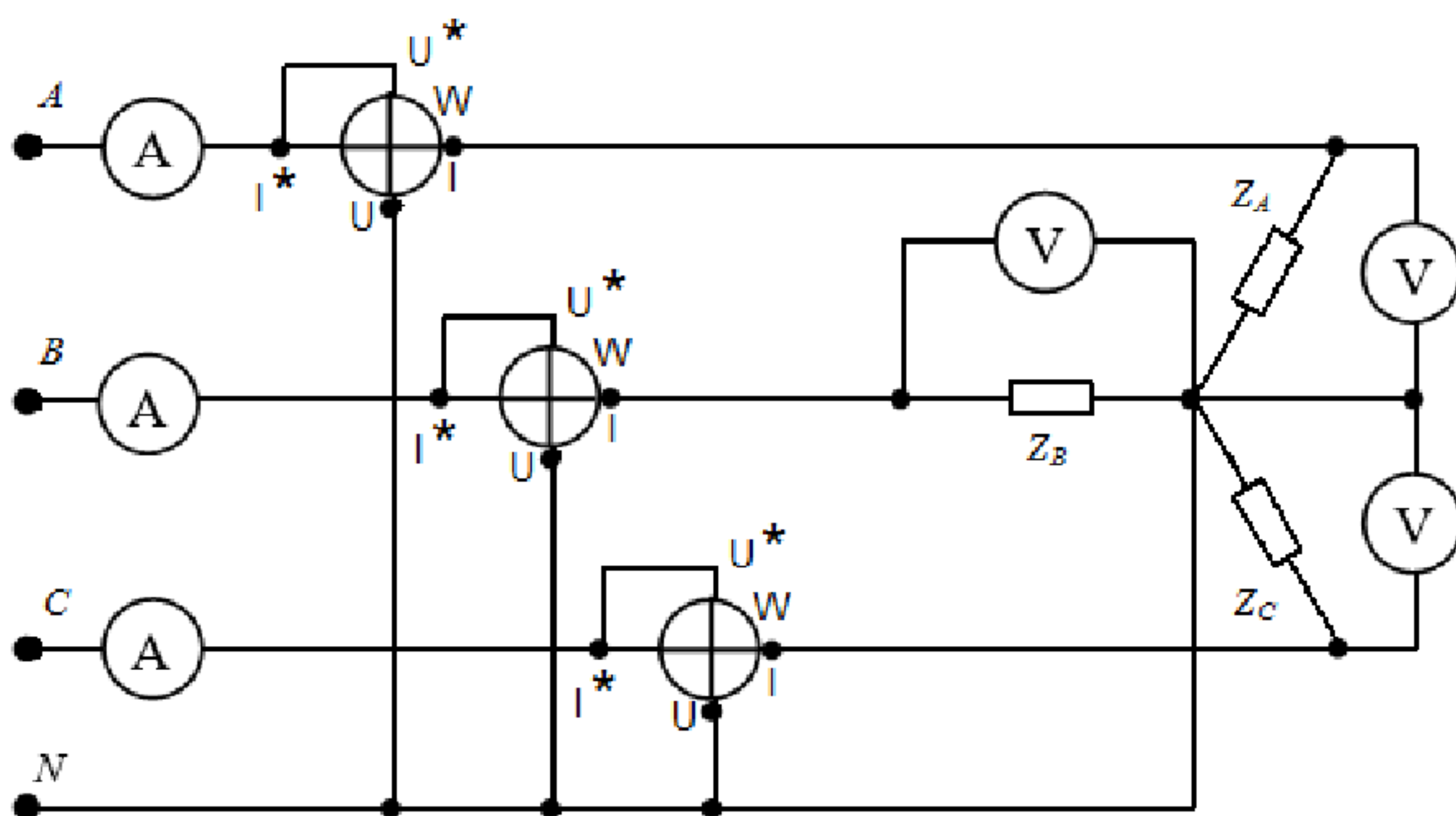


Рисунок 4.10 – Схема для исследования четырехпроводной трехфазной цепи при соединении звездой

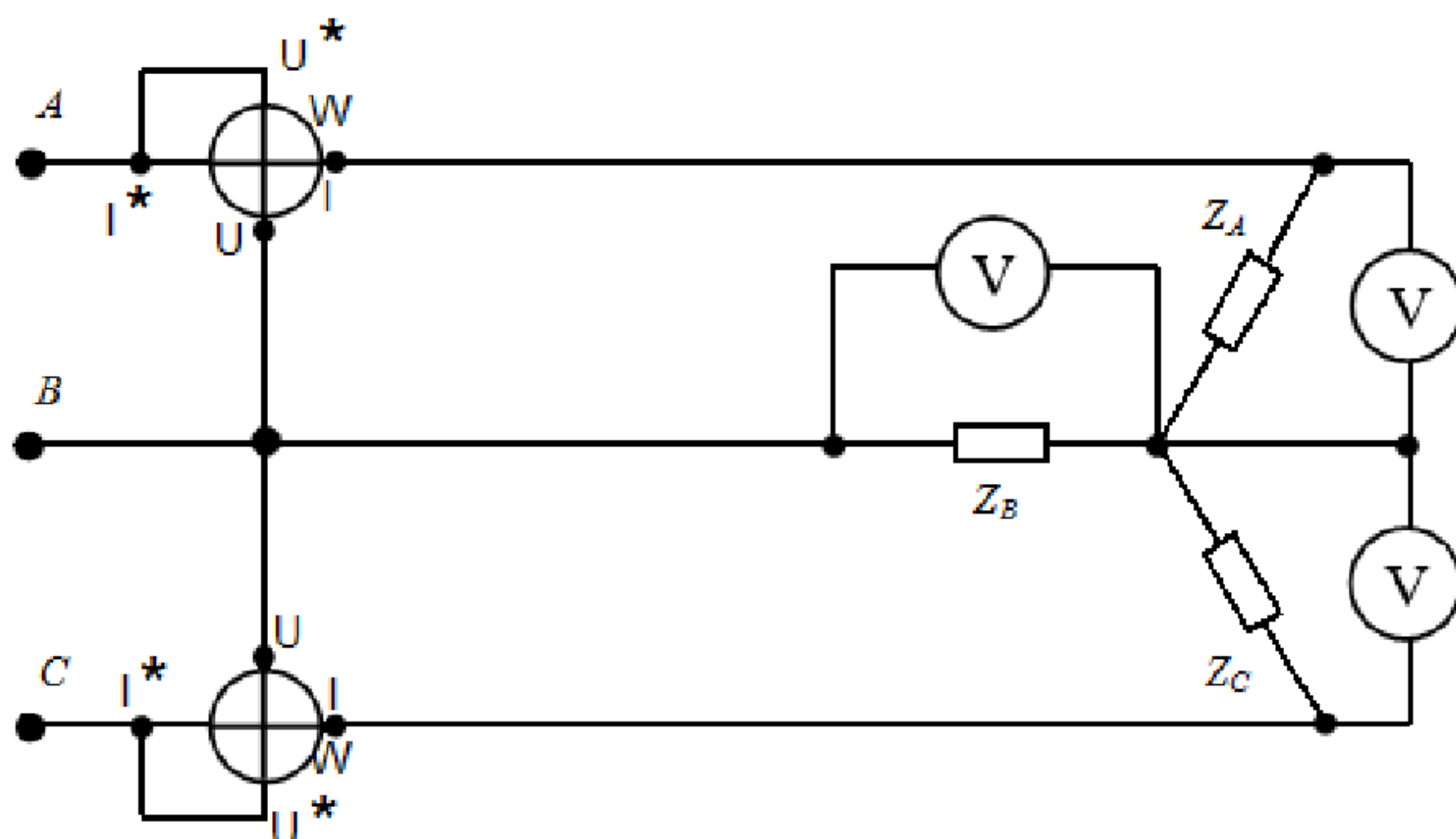


Рисунок 4.11 – Схема для исследования трехпроводной трехфазной цепи при соединении звездой

Показания приборов записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 Результаты измерений и вычислений

Величины	Параметр	Режим работы						
		С нулевым проводом			Без нулевого провода			
Измеренные величины		а	б	в	а	б	в	г
	I_A, A							
	$P_A, Вт$							
	I_B, A							
	$P_B, Вт$							
	I_C, A							
	$P_C, Вт$							
	I_0, A							
	$U_A, В$							
	$U_B, В$							
	$U_C, В$							
	$U_{AB}, В$							
	$U_{BC}, В$							
	$U_{CA}, В$							
Вычисленные величины	$r_A, Ом$							
	$r_B, Ом$							
	$r_C, Ом$							
	$P_3, Вт$							
Величины, найденные из диаграмм	I_0, A				-	-	-	-
	$U_{00'}, В$							

Сопротивление нагрузки фаз вычислять по формулам:

$$r_A = \frac{U_A}{I_A}; \quad r_B = \frac{U_B}{I_B}; \quad r_C = \frac{U_C}{I_C}.$$

Мощность цепи определять по формулам:

$$P_3 = I_A \cdot U_A + I_B \cdot U_B + I_C \cdot U_C$$

$$P_3 = I_A \cdot U_{AC} + I_B \cdot U_{BC}$$

Ввиду того, что в данной лабораторной работе используется измерительный комплекс К505, все измерения и вычисления проводятся аналогично четырехпроводной схеме.

По результатам измерений построить в масштабе векторные диаграммы для всех рассмотренных случаев. Определить на векторных диаграммах I_0 и $U_{00'}$ и занести результаты в таблицу 4.1.

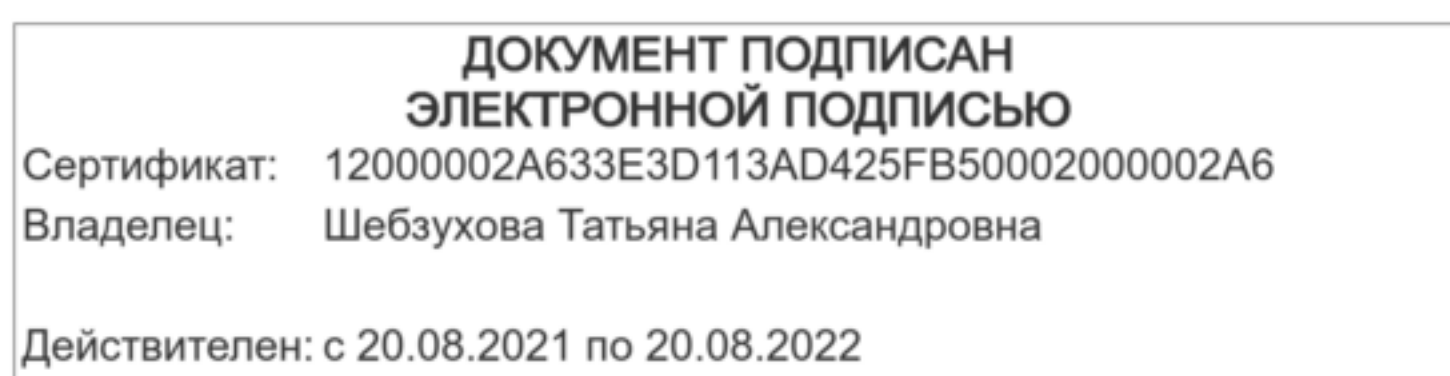
Содержание отчета:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Какое соединение называется соединением звездой?
2. Как строится векторная диаграмма токов и напряжений при симметричной нагрузке?
3. В каком случае отсутствует ток в нулевом проводе?
4. Почему на нулевой провод не ставят предохранитель?
5. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при неравномерной нагрузке фаз систем с нулевым проводом?
6. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при обрыве фазы систем с нулевым проводом или без него?
7. Как измеряют мощность трехфазного тока в четырехпроводной схеме?



Лабораторная работа №8. Трехфазная цепь при соединении потребителей по схеме треугольник

Цель работы: Исследовать особенности работы трехфазной цепи при соединении симметричного и несимметричного потребителей треугольником, усвоить построение векторных диаграмм по результатам эксперимента.

Основы теории:

Потребители электрической энергии при питании от трехфазного источника, как и источники электрической энергии, могут быть соединены в треугольник (рис. 5.1). Следует помнить, что схема включения обмоток трехфазного генератора не предопределяет схему соединения нагрузки. Так, при соединении фаз генератора в звезду нагрузка может быть соединена в звезду с нейтральным проводом, в звезду без нейтрального провода или в треугольник.

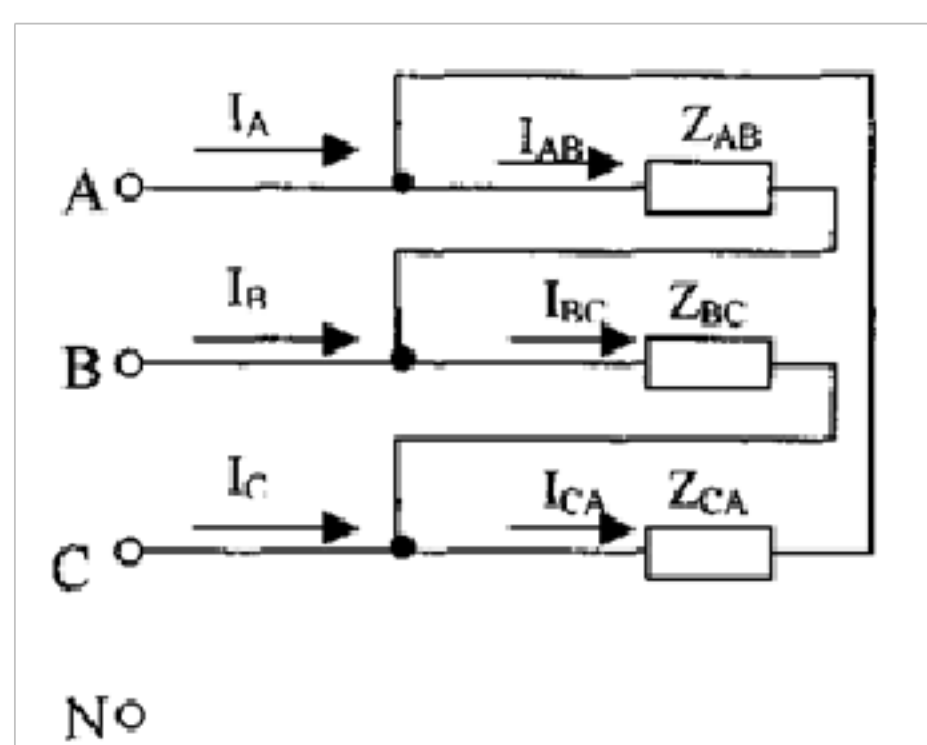


Рисунок 5.1 – Схема соединения фаз в «треугольник»

При соединении в треугольник симметричной трехфазной нагрузки линейные напряжения оказываются равными фазным напряжениям $U_\phi = U_\Delta$, а линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше, чем токи в фазах потребителя:

$$I_\Delta = \sqrt{3} \cdot I_\phi$$

При этом все фазные токи равны по величине и отличаются друг от друга по фазе на 120° . То же самое относится и к линейным токам (рис. 5.2).

При несимметричной нагрузке связь между линейными и фазными токами выражается уравнениями, записанными на основании первого закона Кирхгофа в комплексной или векторной форме:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}, \vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}, \vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}$$

При соединении в треугольник нулевой провод отсутствует, но все фазные потребители в этом случае должны быть рассчитаны на номинальное линейное напряжение

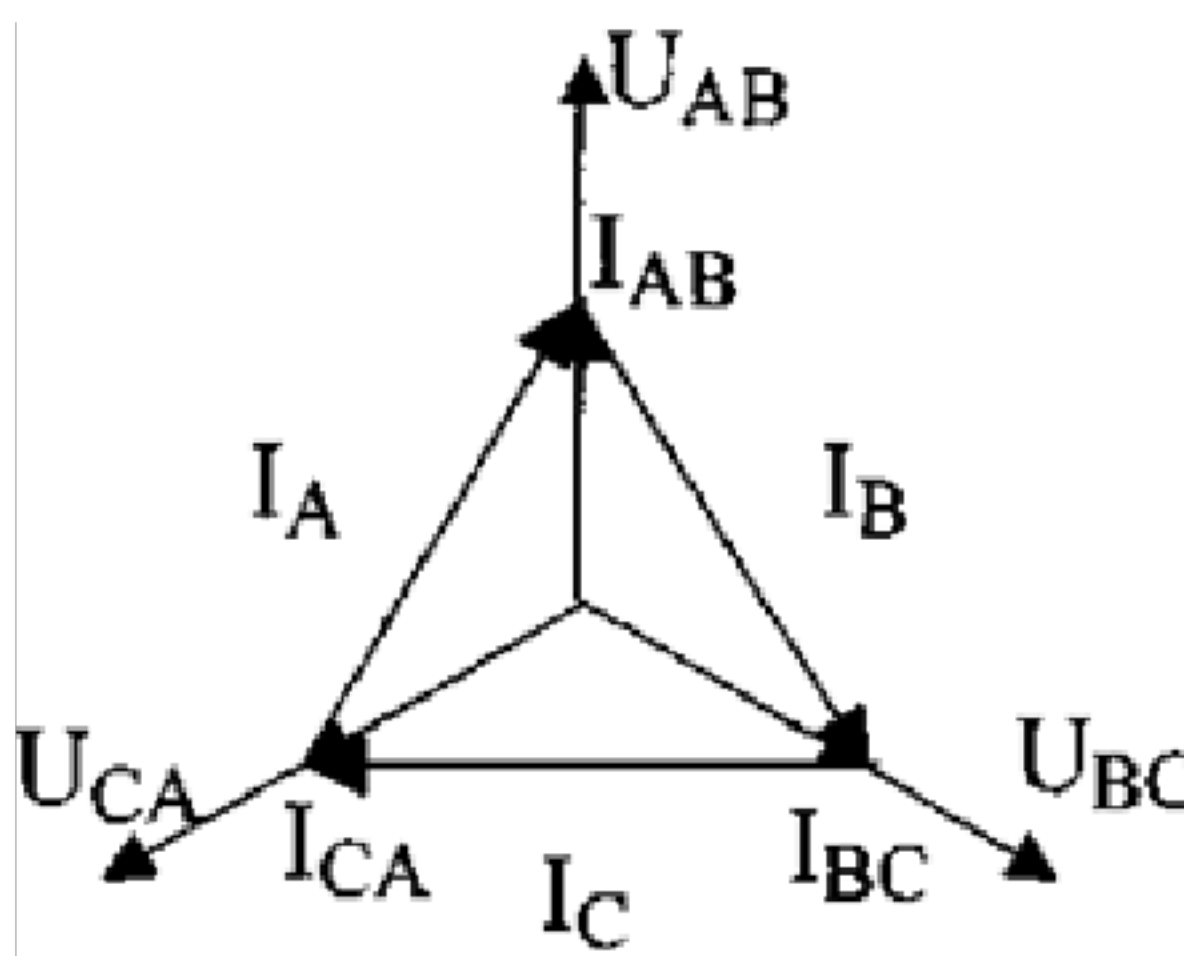


Рисунок 5.2 – Векторная диаграмма трехфазного напряжения

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль трехфазного трансформатора, модуль резисторов, модуль амперметров переменного тока, модуль вольтметров).
2. Включить модуль питания модуль трехфазного трансформатора (выключатель QF1).
3. Измерить стрелочным вольтметром на модуле трехфазного трансформатора линейные напряжения источника питания на холостом ходу (при разомкнутой цепи). Результаты измерений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$U_{AB}, \text{В}$	$U_{BC}, \text{В}$	$U_{CA}, \text{В}$

4. В соответствии с рис. 3. собрать схему соединений потребителей в треугольник. Предъявить схему для проверки.
5. Установить в фазах потребителя по указанию преподавателя одинаковые значения сопротивлений резисторов (симметричную нагрузку). Измерить фазные и линейные токи. Результаты занести в табл. 5.2.
6. Разомкнуть поочередно линейный провод фазы «А» и фазы «В» и провести измерения фазных и линейных токов. Результаты занести в табл. 2.

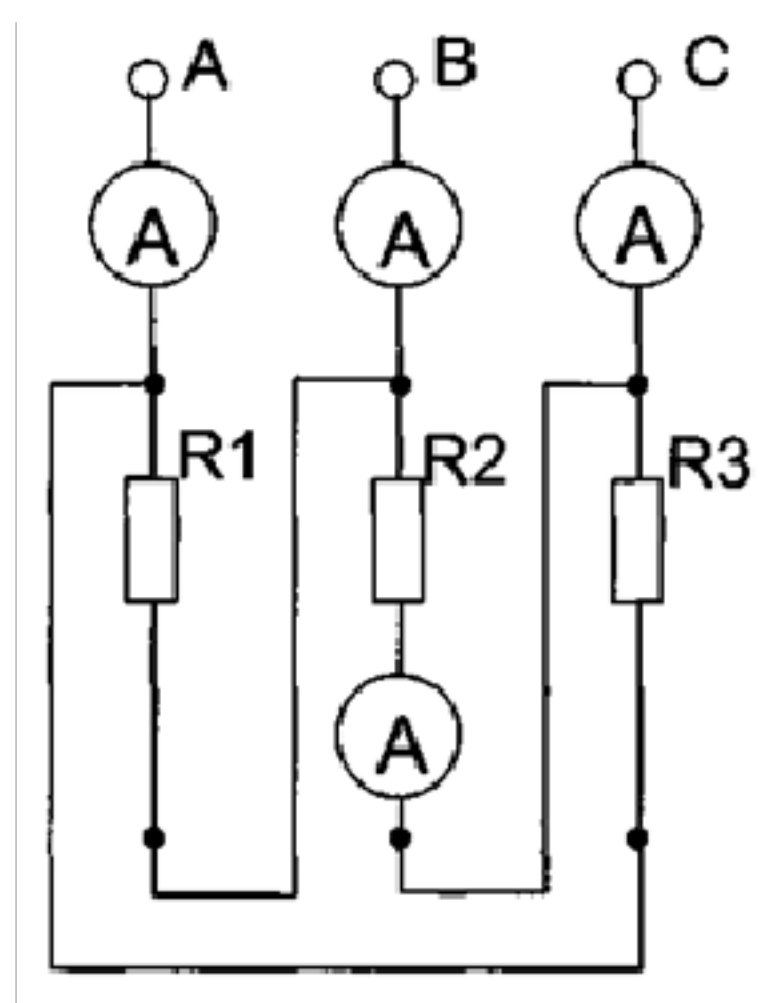


Рисунок 5.3 – Схема соединений потребителей «треугольником»

7. По указанию преподавателя изменить нагрузку в фазах потребителя так, чтобы в каждой фазе были включены различные значения сопротивлений. Результаты записать в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Режим нагрузки	Ток нагрузки, А					
	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}
Симметричная нагрузка						
Обрыв линейного провода «А»						
Обрыв линейного провода «В»						
Обрыв фазы потребителя «АВ»						
Несимметричная нагрузка						

8. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы.
9. Сравнить результаты измерений линейных и фазных токов при соединении в треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке.
10. Проанализировать влияние обрыва линейного провода на режим работы потребителей.
11. Сравнить режимы работы при включении потребителей в звезду и треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке.

Содержание отчета:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Каким образом три однофазных потребителя соединяют в треугольник?
2. Куда следует подключать вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжения трехфазного потребителя?
3. В каком соотношении находятся фазные и линейные напряжения симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
4. Какое соотношение между фазными и линейными токами симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
5. Всегда ли справедливы при соединении в треугольник соотношения:

$$\overline{I_A} = \overline{I_{AB}} - \overline{I_{CA}}, \quad \overline{I_B} = \overline{I_{BC}} - \overline{I_{AB}}, \quad \overline{I_C} = \overline{I_{CA}} + \overline{I_{BC}}$$
6. Всегда ли при соединении в треугольник справедливо $\overline{I_A} + \overline{I_B} + \overline{I_C} = 0$
7. Как отразится отключение одной фазы потребителя на режим работы других фаз и на режим работы всей трехфазной цепи, соединенной в треугольник?

Лабораторная работа №9. Частотные характеристики последовательного резонансного контура

Цель работы: Исследовать частотные характеристики последовательного резонансного контура

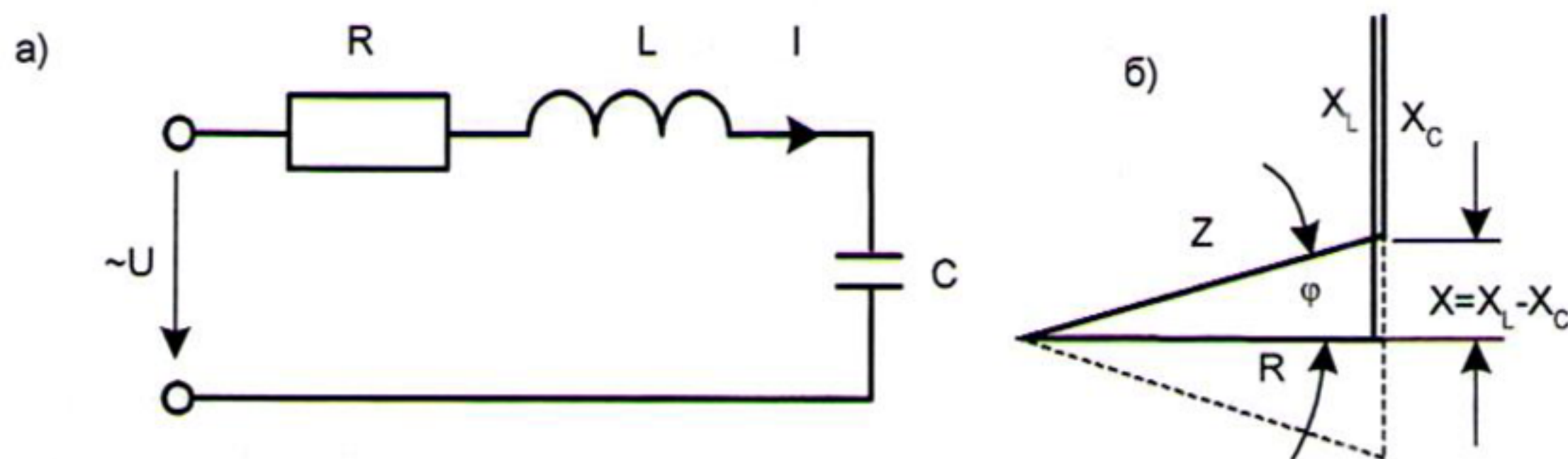
Основы теории:

Частотными характеристиками называют зависимости сопротивлений и проводимостей электрической цепи от частоты приложенного синусоидального напряжения. К ним также относят зависимости от частоты токов, напряжений, фазовых сдвигов и мощности. В последовательном резонансном контуре, изображенном на рис, активное сопротивление не зависит от частоты, а индуктивное, емкостное и реактивное сопротивления изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$X_L(\omega) = \omega L, \quad X_C(\omega) = 1/\omega C, \quad X(\omega) = X_L(\omega) - X_C(\omega).$$

Полное сопротивление контура, как следует из треугольника сопротивлений (рис.6.1,б):

$$z(\omega) = \sqrt{R^2 + X^2}$$



При равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений имеет место режим резонанса напряжений, при котором напряжения на ёмкости и индуктивности равны по величине и противоположны по фазе. В этом режиме величина тока в контуре равна отношению приложенного напряжения к активному сопротивлению цепи, т.к. реактивное сопротивление равно нулю.

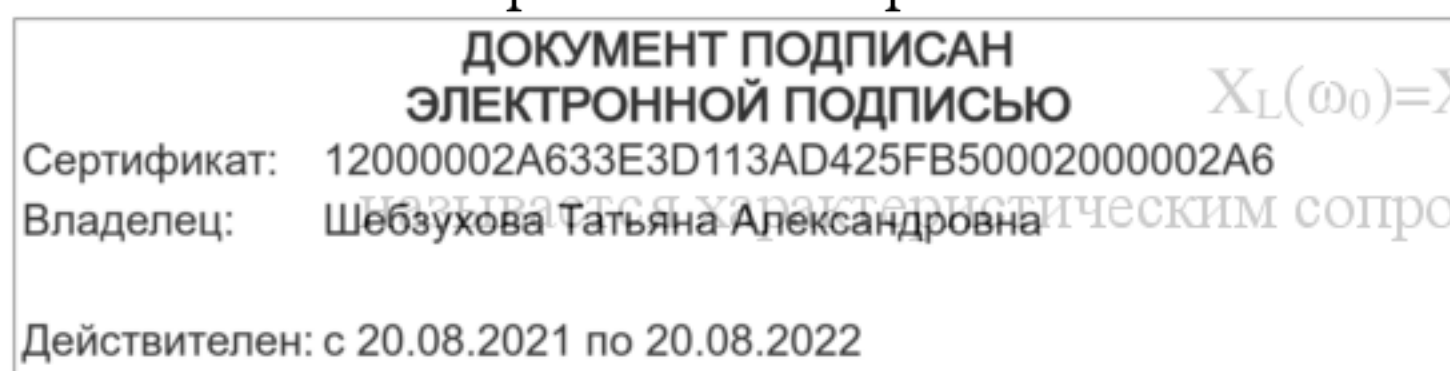
Частота, при которой возникает резонанс, называется резонансной

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC},$$

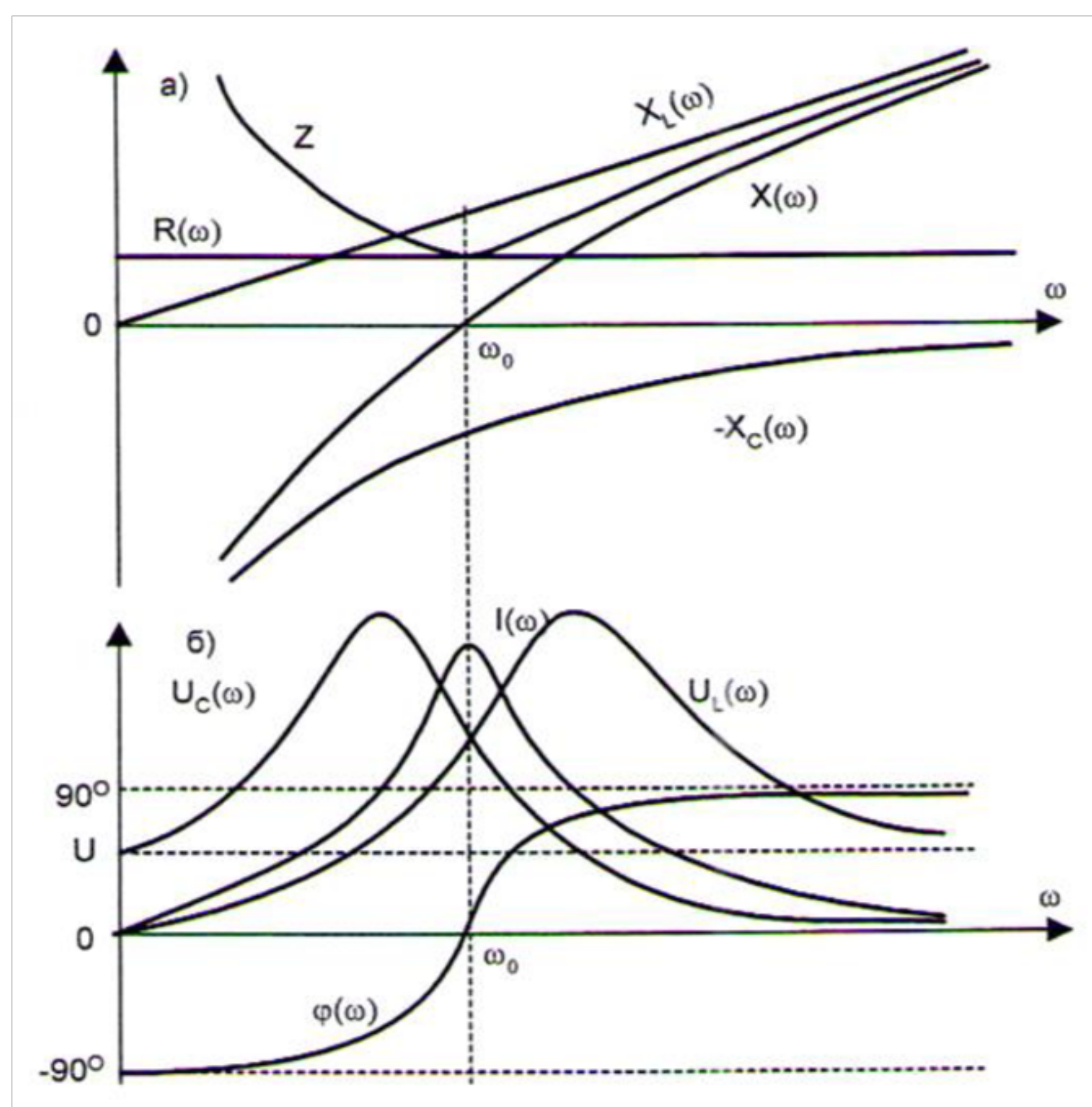
а сопротивление при этой частоте

$$X_L(\omega_0) = X_C(\omega_0) = \sqrt{L/C} = \rho$$

называется характеристическим сопротивлением резонансного контура.



Отношение сопротивлений $\rho/R=Q$ называется добротностью резонансного контура.



На рис. показаны графики изменения сопротивлений рассматриваемого контура от частоты. На рис. представлены графики зависимости от частоты тока, напряжений на элементах контура и угла фазового сдвига между током и приложенным напряжением, которое остаётся постоянным по амплитуде при всех частотах. Эти величины изменяются в соответствии с выражениями:

$$I(\omega)=U/Z(\omega); \quad U_L(\omega)=\omega L \cdot I(\omega); \quad U_C=I(\omega)/(\omega C);$$

$$\varphi(\omega)=\arctg[(\omega L-1/(\omega C))/R].$$

Если добротность $Q>1$, то при резонансе напряжения на индуктивности и ёмкости превышают приложенное напряжение в Q раз.

При $\omega < \omega_0$ $\varphi(\omega) < 0$, т.е. ток по фазе опережает напряжение и цепь носит ёмкостный характер, при $\omega > \omega_0$ $\varphi(\omega) > 0$, т.е. цепь носит индуктивный характер.

В режиме резонанса $\varphi(\omega)=0$, коэффициент мощности $\cos\varphi=1$.

Указание по технике безопасности:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены

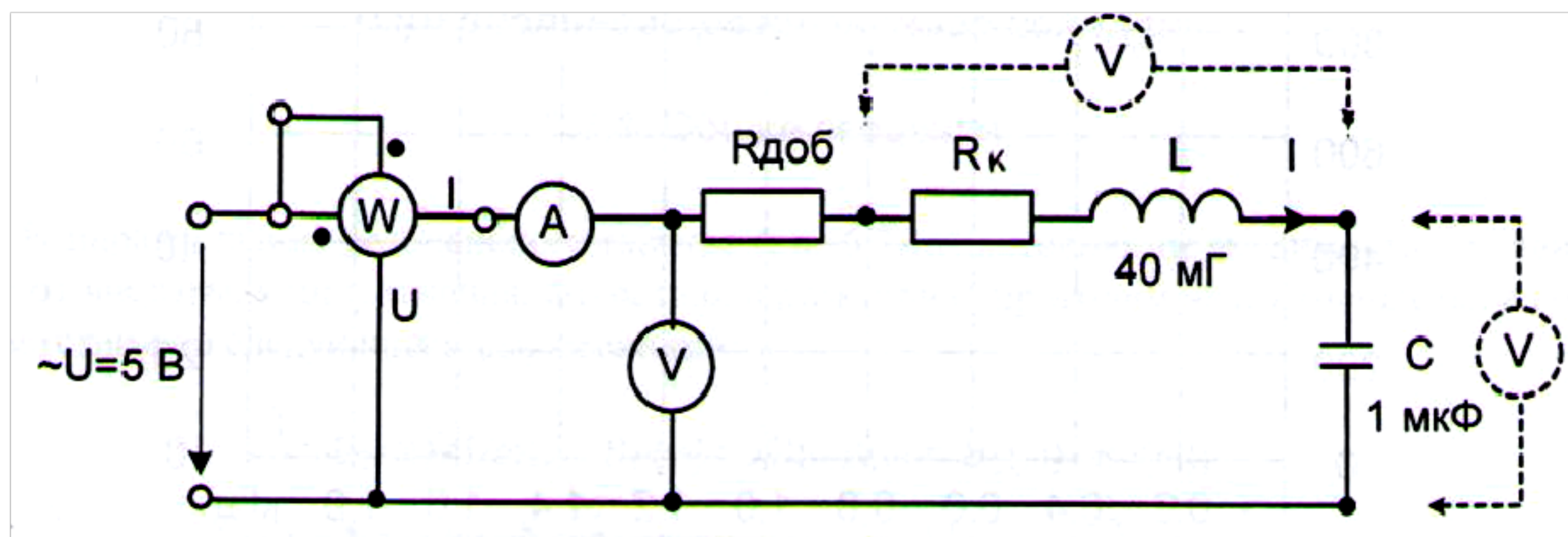
Указания по выполнению лабораторной работы:

В данной лабораторной работе необходимо получить экспериментальным путём частотные характеристики последовательного резонансного контура:

$$R(\omega), X(\omega), Z(\omega), I(\omega), U_L(\omega), U_C(\omega), \varphi(\omega).$$

Порядок выполнения работы следующий.

Соберите схему, изображённую на рисунке



Используйте добавочное сопротивление 100 Ом. Установите пределы измерения: тока – 200 мА, напряжения – 20 В.

Омметром измерьте сумму сопротивлений $R = R_k + R_{доб}$.

Вычислите резонансную частоту и добротность контура, соответствующие измеренному сопротивлению и $C = 1 \text{ мкФ}$ и $L = 0,04 \text{ Гн}$:

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} = \quad \text{Гц}, \quad \rho = \sqrt{L/C} = \quad \text{Ом}, \quad Q = \rho/R =$$

Подайте напряжение на приборы и на генератор синусоидального напряжения. Изменяя частоту напряжения, подайте такое её значение, при котором ток в цепи примет максимальное значение. Сравните вычисленное и экспериментальное значения резонансной частоты.

Изменяя частоту от 0,3 до 1,5 кГц с интервалом 0,1 кГц, запишите в таблицу 6.1 значения частоты, мощности, тока, напряжений на конденсаторе и на катушке индуктивности совместно с добавочным сопротивлением. Напряжения измеряйте поочерёдно одним и тем же вольтметром. При каждой частоте проверяйте величину поданного напряжения, которое должно равняться 5 В.

6. По экспериментальным данным рассчитайте

$$Z = U/I, \quad Z_{RL} = U_{RL}/I, \quad X_L = \sqrt{Z_{RL}^2 - R^2}, \quad X_C = U_C/I, \\ X = X_L - X_C, \quad U_L = I X_L, \quad \varphi(\omega) = \arccos P/(UI).$$

Вычисленные значения внесите в таблицу.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

f , Гц	P , мВт	I , мА	U_C , В	U_{RL} , В	Z , Ом	Z_{RL} , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	U_L , В	X , Ом	φ , град
0,3											
0,4											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
f_0											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1,5											

Постройте графики частотных характеристик по экспериментально полученным и вычисленным значениям сопротивлений, напряжений, тока и угла фазового сдвига, аналогичные представленным на рис.

Включите в цепь добавочное сопротивление 220 Ом и убедитесь, что резонансная частота не изменилась, а ток и напряжения на катушке индуктивности и на конденсаторе стали меньше. Запишите их значения.

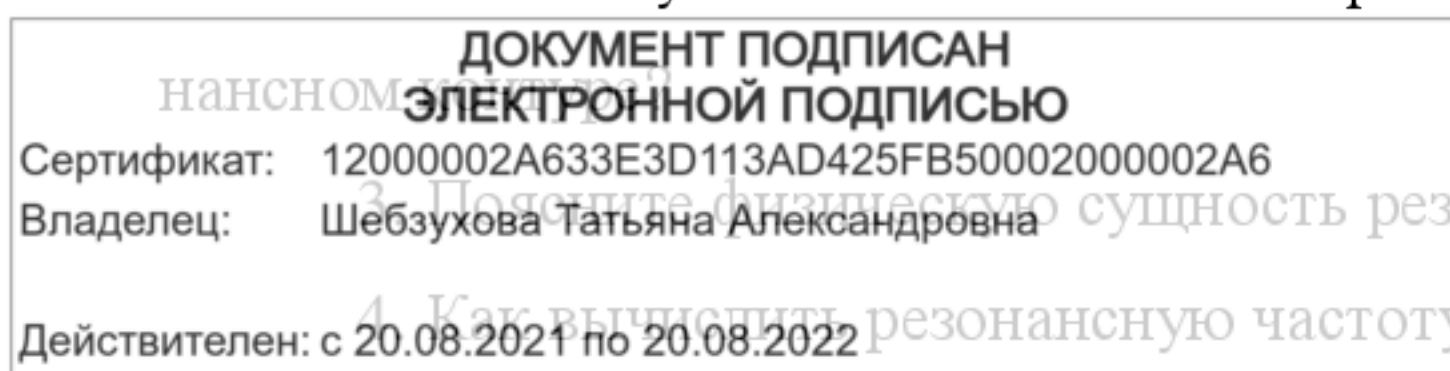
Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как зависят от частоты сопротивления катушки индуктивности и конденсатора?
2. Каково условие возникновения резонанса напряжений в последовательном резонансе?



3. Поясните физическую сущность резонанса напряжений.
4. Как вычислить резонансную частоту?

5. Что понимают под добротностью резонансного контура?
6. Как изменяется в последовательном резонансном контуре угол фазового сдвига между током и приложенным к контуру напряжением при изменении частоты?
7. Как вычислить значения индуктивности катушки и ёмкости конденсатора по измеренным значениям тока и напряжений и заданному значению частоты?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

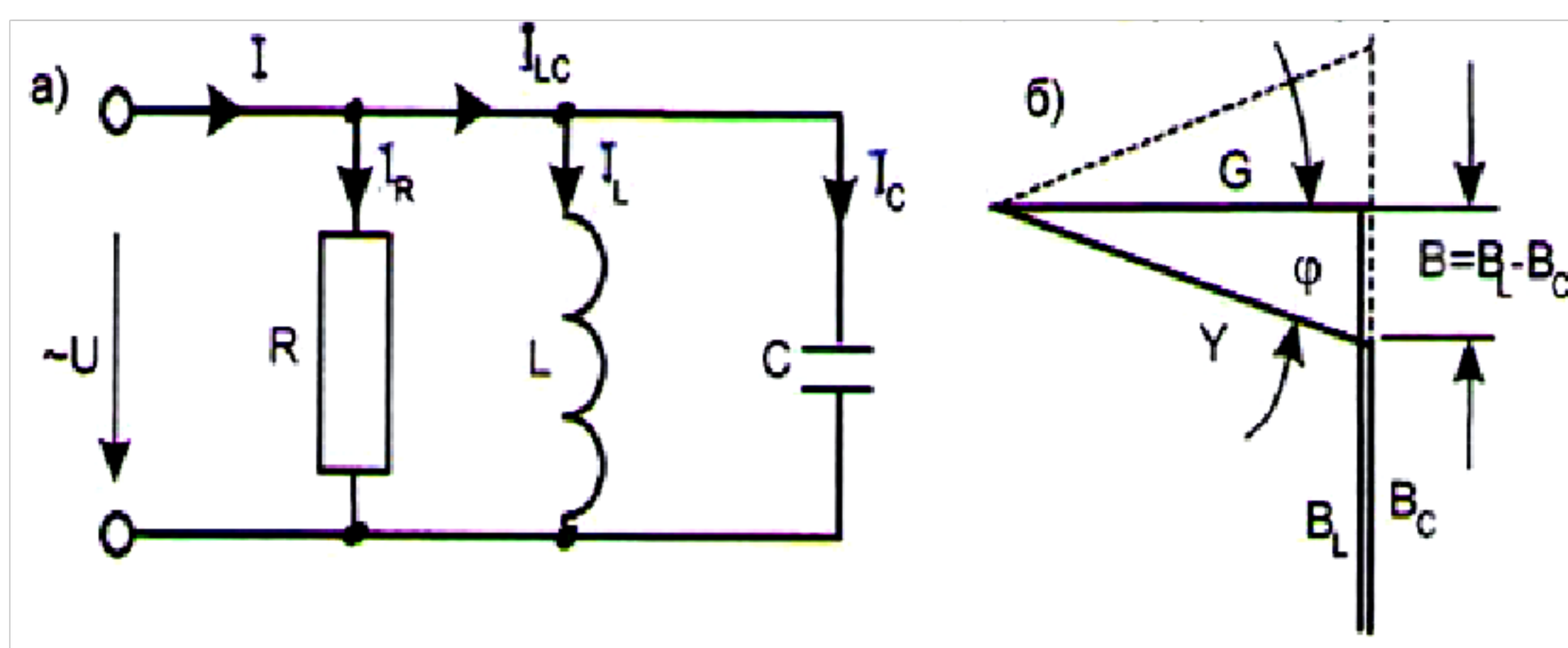
Лабораторная работа №10. Частотные характеристики параллельного резонансного контура

Цель работы: Исследовать частотные характеристики параллельного резонансного контура

Основы теории:

В параллельном резонансном контуре активная проводимость G не зависит от частоты, а индуктивная B_L , емкостная B_C и реактивная B изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$B_L(\omega) = \frac{1}{\omega L}; \quad B_C(\omega) = \omega C; \quad B(\omega) = B_L(\omega) - B_C(\omega).$$



Полная проводимость, как следует из треугольника проводимостей рис.

$$Y(\omega) = \sqrt{G^2 + B^2}.$$

Вид этих зависимостей представлен на рис.7.2. При *резонансной* частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ индуктивная и емкостная проводимости равны друг другу:

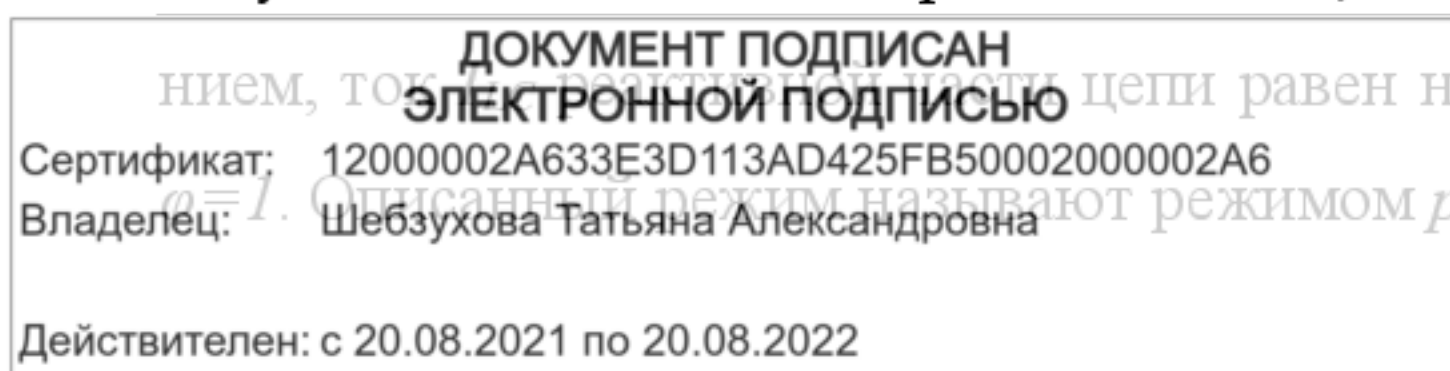
$$B_L(\omega_0) = B_C(\omega_0) = \sqrt{C/L} = \gamma.$$

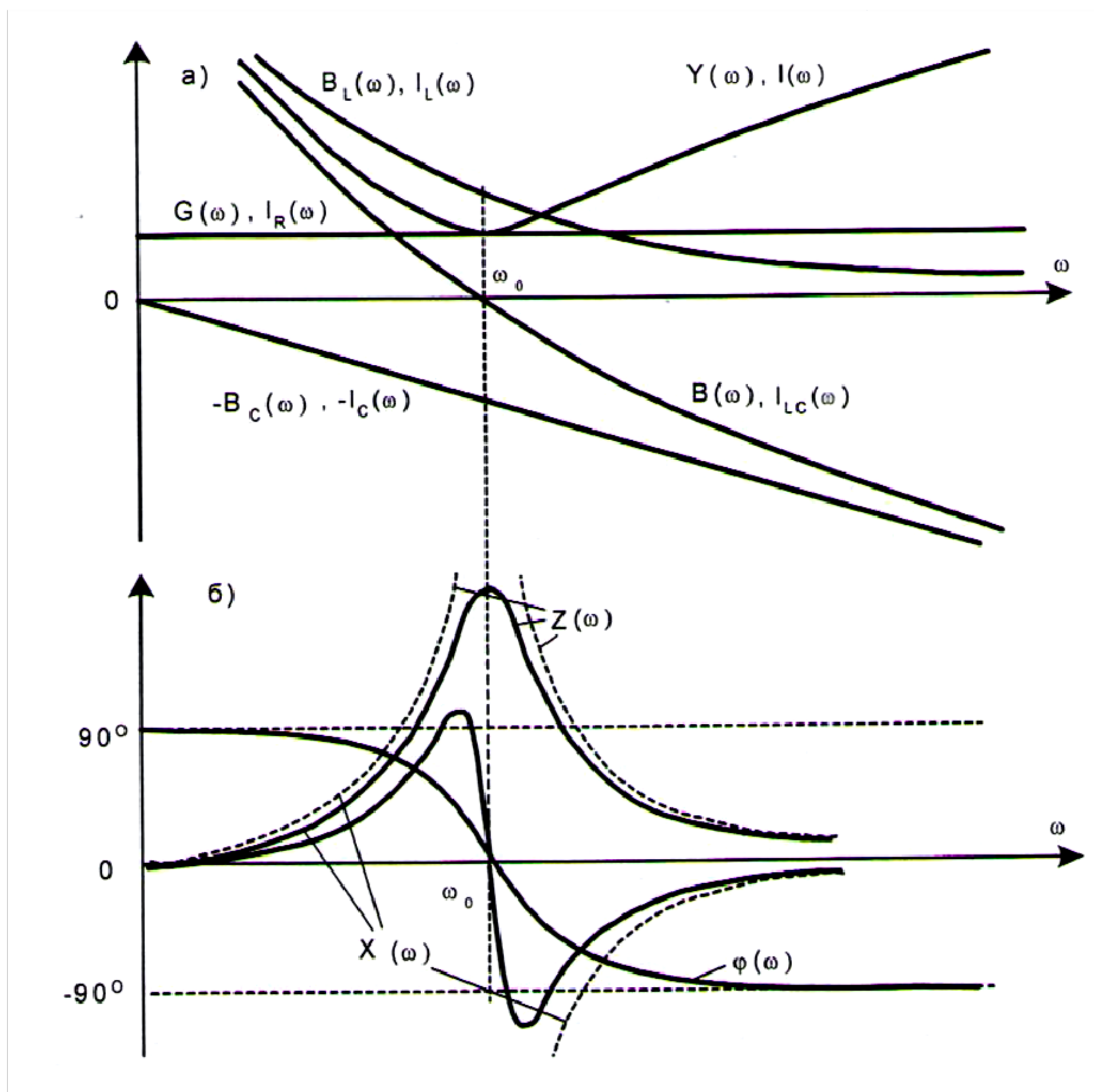
Проводимость γ называют *характеристической проводимостью* параллельного резонансного контура, а отношение

$$\gamma/G = Q$$

называют *добротностью* резонансного контура.

При резонансе в рассматриваемом контуре токи через ёмкость и через индуктивность равны друг другу и противоположны по фазе, ток, потребляемый от источника, равен току в ветви с активной проводимостью, по фазе он совпадает с приложенным напряжением, ток I_{LC} равен нулю, угол $\varphi = 0$, коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$. Описанный режим называют режимом *резонанса токов*.





При изменении частоты приложенного к цепи напряжения и неизменной его амплитуде токи изменяются пропорционально соответствующим проводимостям:

$$I(\omega) = U \cdot Y(\omega), \quad I_L(\omega) = U / (\omega L), \quad I_C(\omega) = U \cdot \omega C, \\ I_{LC}(\omega) = U \cdot B(\omega).$$

Угол фазового сдвига между током в неразветвлённой части цепи и приложенным напряжением изменяется в соответствии с выражением:

$$\varphi = \arctg[(1/(L \omega) - \omega C)/G].$$

Графики изменения токов, проводимостей, сопротивлений контура и угла фазового сдвига представлены на рис.

При $\omega < \omega_0$ цепь носит индуктивный характер (ток по фазе отстаёт от напряжения), при $\omega = \omega_0$ - активный, при $\omega > \omega_0$ - емкостный (ток по фазе опережает напряжение).

Если добротность $Q > 1$, то при резонансе токи в индуктивной и емкостной ветвях превышают потребляемый от источника ток в Q раз.

На рис. представлены также зависимости полного Z и реактивного X сопротивлений цепи от частоты. В общем случае

$$Z(\omega) = 1/Y(\omega) = 1/\sqrt{G^2 + B^2}, \quad X(\omega) = B/(G^2 + B^2).$$

Пунктирные кривые на рисунке соответствуют идеализированному случаю, когда активная проводимость контура равна нулю. В этом случае при резонансной частоте кривые $Z(\omega)$ и $X(\omega)$ имеют разрыв.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

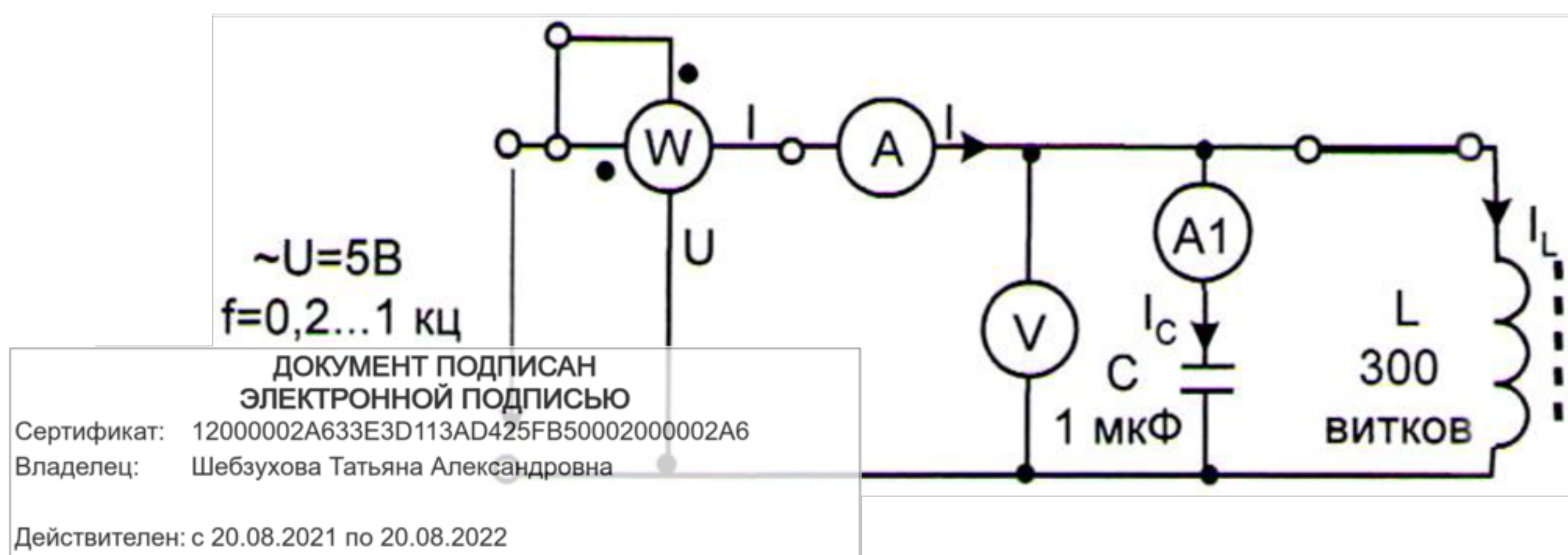
Указания по выполнению лабораторной работы:

В данной лабораторной работе необходимо получить экспериментальным путём частотные характеристики параллельного резонансного контура:

$$I(\omega), I_L(\omega), I_C(\omega), B(\omega), X(\omega), Z(\omega), \varphi(\omega).$$

Порядок выполнения работы следующий.

Соберите схему, изображенную на рис. В качестве катушки индуктивности с малым активным сопротивлением используйте обмотку трансформатора с числом витков $w=300$. В зазоры разъемного сердечника вставьте полоски бумаги в один слой. Используйте конденсатор емкостью 1 мкФ . В цепи предусмотрите перемычки для измерения токов мультиметров. Установите следующие пределы измерения: для вольтметра – 20 В , для амперметра – 200 мА . Питание на схему подайте от генератора переменного синусоидального напряжения.



Омметром измерьте сопротивление катушки R.

Подайте напряжение питания на приборы и на генератор. Установите напряжение 5В и, изменяя частоту, добейтесь резонанса токов, ориентируясь по току в неразветвлённой части цепи. Запишите значения резонансной частоты, мощности и токов.

По показаниям приборов рассчитайте:

- сопротивления и проводимости катушки

$$Z_K = U/I_K, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \quad G_K = \frac{R_K}{Z_K^2}, \quad B_K = \gamma = \frac{X_K}{Z_K^2},$$

- индуктивность катушки

$$L = 1/(2\pi f_0 B_K);$$

- резонансную частоту

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC});$$

- полное сопротивление и активную проводимость контура

$$Z = U/I, \quad G = R/Z^2;$$

- добротность контура

$$Q = \gamma/G.$$

Сравните расчётную резонансную частоту с фактической, а также добротность контура с отношением токов I_C/I .

Изменяя частоту от 0,2 до 1кГц, при постоянном напряжении 5В запишите в таблицу значения мощности P и токов I, I_k и I_c .

(ω), f, Гц	P, мВт	I, мА	IK, мА	IC, мА	Y(ω), См	BL (ω), См	BC (ω), См	B (ω), См	Z (ω), Ом	φ (ω), град	X (ω), Ом
200											
300											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
f0											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1000											

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

По результатам измерений вычислите, пренебрегая активным сопротивлением катушки (которое значительно меньше индуктивного):

$$Y(\omega) = I/U, B_L(\omega) = I_K/U, B_C(\omega) = I_C/U, B(\omega) = B_L(\omega) - B_C(\omega),$$

$$Z(\omega) = 1/Y(\omega), \varphi(\omega) = \arccos [P/(UI)], X(\omega) = Z \cdot \sin \varphi.$$

Постройте графики частотных характеристик.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

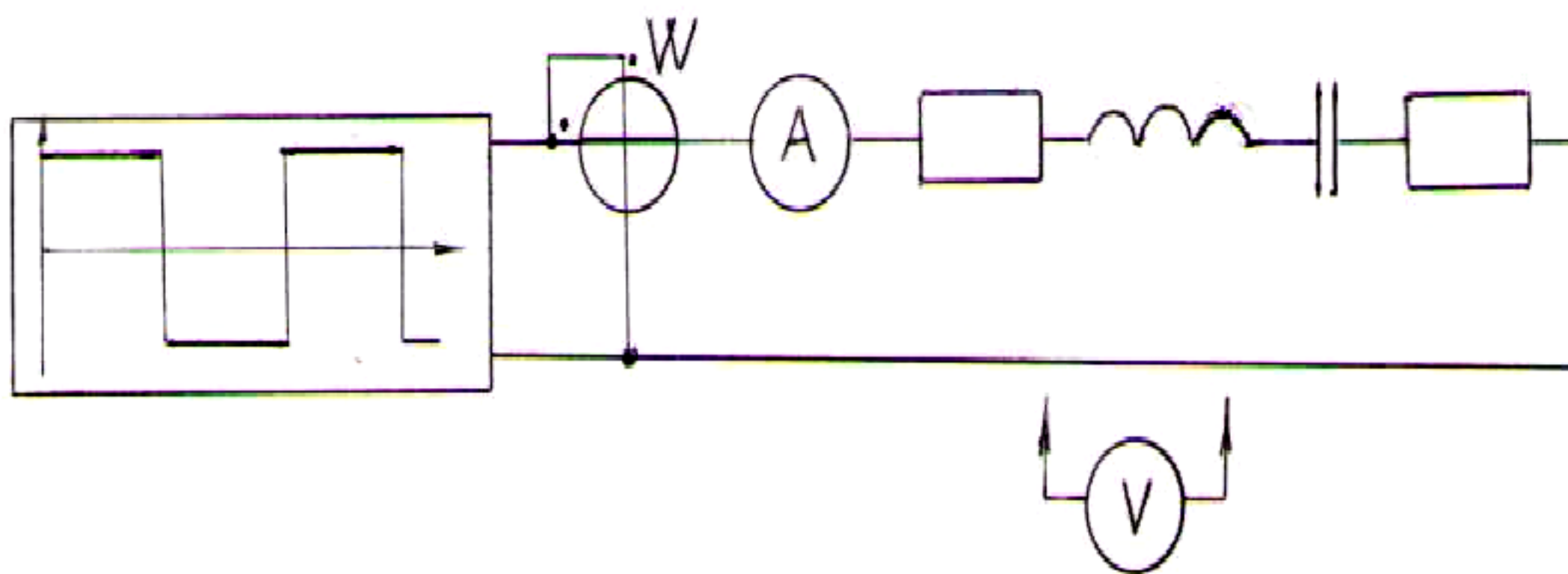
1. Как от частоты зависят проводимости катушки индуктивности и конденсатора?
2. Каково условие возникновения резонанса токов в параллельном резонансном контуре?
3. Поясните физическую сущность резонанса токов.
4. Как вычислить резонансную частоту, если известны параметры элементов резонансного контура?
5. Как вычислить добротность параллельного резонансного контура?
6. Как изменяется в параллельном резонансном контуре угол фазового сдвига между током в неразветвленной части цепи и напряжением при изменении частоты?
7. От чего и как зависит соотношение токов в реактивных элементах и в неразветвленной части цепи при резонансе токов?
8. Как с учётом активного сопротивления вычислить индуктивную проводимость и индуктивность катушки, если известны ток, протекающий по катушке, а также величина и частота приложенного напряжения?

Лабораторная работа №11. Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении

Цель работы: Приобрести практические навыки сборки и анализа линейных электрических цепей при периодическом несинусоидальном напряжении

Основы теории:

В данной лабораторной работе рассматривается электрическая цепь, представленная на рис. и состоящая из последовательно включенных индуктивного, емкостного и активного сопротивлений. На зажимы цепи подается напряжение прямоугольной формы, имеющее амплитуду U_m и частоту $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi/T$.



Представленная на рисунке функция напряжения разлагается в ряд Фурье

$$f(\omega t) = 4U_m/\pi \cdot (\sin \omega t + 1/3 \cdot \sin 3 \omega t + 1/5 \cdot \sin 5 \omega t + \dots) \quad (8.1)$$

Действующие значения гармоник:

$$U_1 = 4U_m/(\sqrt{2} \cdot \pi); U_3 = U_1/3; U_5 = U_1/5; \text{ и т.д.} \quad (8.2)$$

При сравнительно небольших значениях частоты ω когда эффект вытеснения тока незначителен, активное сопротивление цепи можно считать постоянным, в то время как индуктивное сопротивление повышается, а емкостное – снижается пропорционально кратности частот k

$$X_{Lk} = k \omega L; X_{Ck} = 1/(k \omega C) \quad (8.3)$$

Если в рассматриваемой электрической цепи при основной частоте $X_{L1} = X_{C1}$, то ток основной гармоники будет определяться только амплитудой напряжения этой гармоники и активным сопротивлением цепи:

$$I_1 = U_1/R \quad (8.4)$$

Для остальных гармоник действующие значения токов определяются соответствующими

ими значениями сопротивлений:

$$I_3 = U_3/z_3 = U_3/\sqrt{R^2 + [3\omega L - 1/(3\omega C)]^2},$$

$$I_5 = U_5/z_5 = U_5/\sqrt{R^2 + [5\omega L - 1/(5\omega C)]^2}, \quad (8.5)$$

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Чем выше гармоника, тем меньше ток и тем больше угол фазового сдвига φ_k между напряжением и током данной гармоники. Углы фазового сдвига могут быть вычислены в соответствии с выражениями:

$$\varphi_3 = \arccos(R/z_3), \quad \varphi_5 = \arccos(R/z_5), \quad (8.6)$$

Активная мощность при резонансной частоте $\omega = 1/\sqrt{LC}$:

$$P = P_1 + P_3 + P_5 + \dots = U_1 I_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + U_5 I_5 \cos \varphi_5 + \dots \quad (8.7)$$

Действующее значение несинусоидального тока

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots} \quad (8.8)$$

Следует отметить, что если в цепи имеет место резонанс напряжений для первой гармоники, то токи остальных гармоник будут незначительными, потому что напряжение на активном сопротивлении будет близким к синусоидальному, а сумма напряжений остальных гармоник будет приложена к LC-фильтру.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Собрать схему, в схеме использовать в качестве катушки индуктивности обмотку трансформатора с числом витков $w=300$, конденсатор ёмкостью $0,47 \mu\text{Ф}$ и сопротивление 100 Ом . Цепь подключить к генератору переменного напряжения. Установить предел измерения тока на мультиметре 200 мА .

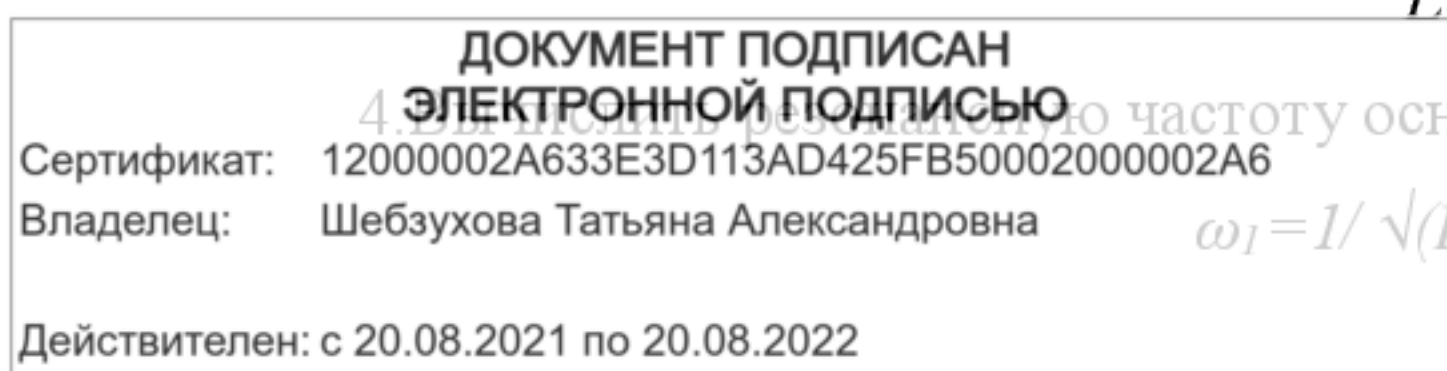
Вторым мультиметром измерить активное сопротивление катушки индуктивности R_k и сопротивление нагрузки R_n , затем переключить мультиметр для измерения напряжения, установив предел измерения 20 В .

Включить генератор синусоидального напряжения, установить частоту 500 Гц и напряжение 5 В . Измерить ток в цепи и напряжение на катушке. Вычислить индуктивность катушки, пользуясь выражениями:

$$Z_k = U/I_k,$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

$$L = X_k / (2\pi f)$$



4. Измерить резонансную частоту основной (первой) гармоники
 $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$, $f_1 = \omega_1 / (2\pi)$.

Частоту f_1 установить на генераторе, переключив его на сигнал прямоугольной формы. Медленно вращая рукоятку изменения частоты, добиться максимального тока в цепи, сравнить полученную резонансную частоту f_1' с расчётной.

Для напряжения на выходе генератора $U_m = 5$ В вычислить амплитудные и действующие значения напряжений 3-й, 5-й и 7-й гармоник, пользуясь формулами 8.1 и 8.2.

Для экспериментально найденной частоты f_1' вычислить действующие значения токов 3-й, 5-й и 7-й гармоник, пользуясь формулами 8.5.

По формулам 8.6 вычислить углы фазовых сдвигов гармоник, а затем – активную мощность.

Вычислить по 8.8 действующее значение несинусоидального тока.

Вычисленные значения тока и мощности сравнить с показаниями амперметра и ваттметра при установленном на выходе генератора напряжении 5В.

Измерить напряжение на активном сопротивлении нагрузки и сравнить его с вычисленным по 8.4 действующим напряжением первой гармоники.

Подключая осциллограф поочередно к выходу генератора, к активному сопротивлению и к последовательно включенным конденсатору и катушке индуктивности, зарисовать на кальке, приложенной к экрану, кривые напряжений. Убедиться, что кривая напряжения на выходе генератора имеет прямоугольную форму, на активном сопротивлении – близка по форме к синусоиде, а на LC-фильтре кривая представляет сумму всех высших гармонических составляющих.

Результаты вычислений и измерений занести в таблицу 8.1.

$f1$		$f1'$		Rk		Rh		X3		X5		X7		Z3		Z5		Z7	
Гц		Гц		Ом		Ом		Ом		Ом		Ом		Ом		Ом		Ом	
U1	U3	U5	U7	I1	I3	I5	I7	Iрасч.	Iэксп.	φ3	φ5	φ7	Pрасч	Pэксп					
В	В	В	В	мА	мА	мА	мА	мА	мА	град	град	град	мВт	мВт					

Сравнить по осциллографу амплитудные значения напряжений на выходе генератора и на активном сопротивлении нагрузки, найдите их отношение и сравните с числом $4/\pi = 1.273$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. Название работы;

2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

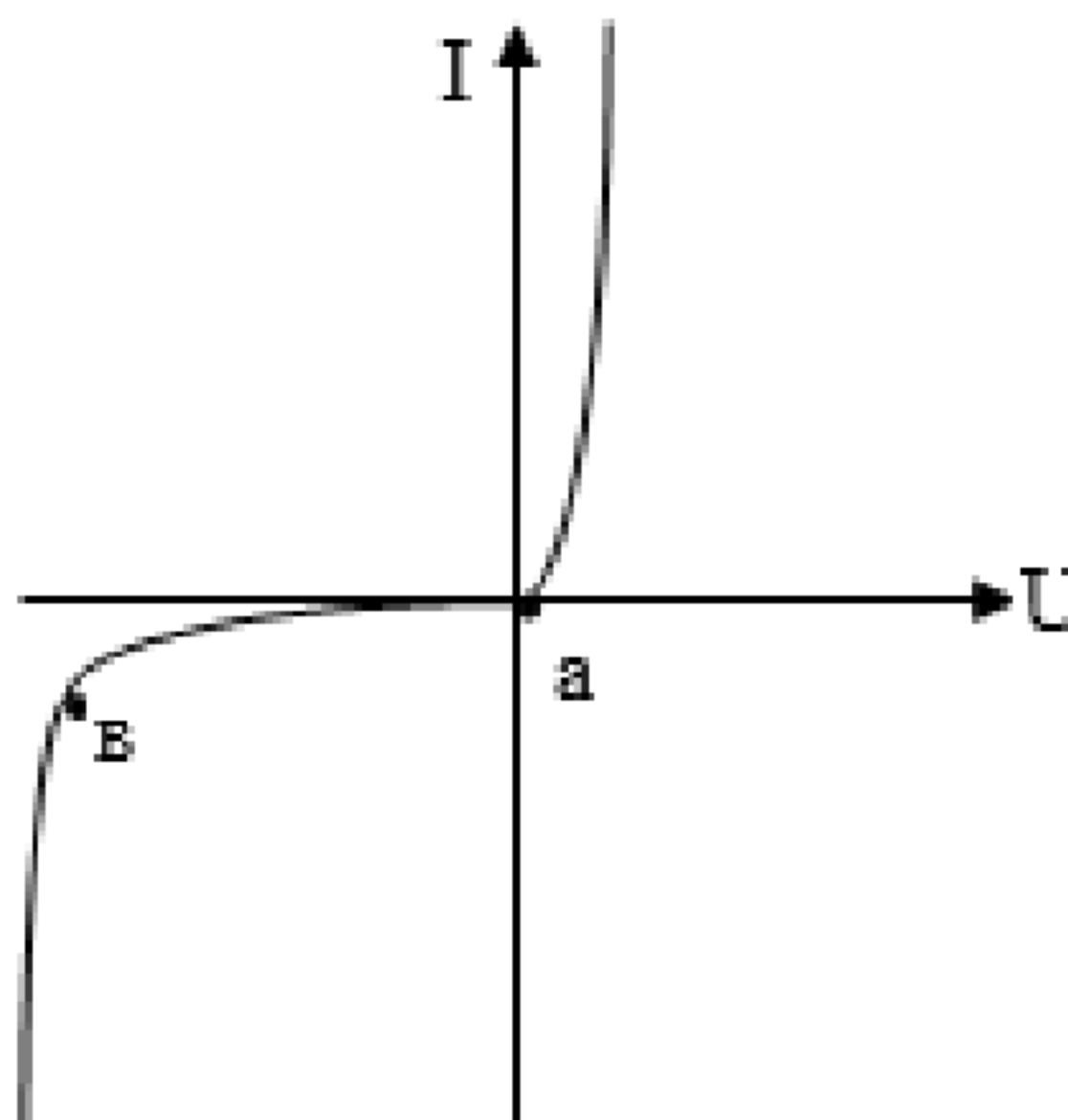
1. Какие гармоники содержит сигнал, симметричный относительно оси абсцисс?
2. Как вычислить сопротивление активно-реактивной цепи для отдельных гармоник тока?
3. Как вычислить углы фазового сдвига между током и напряжением для отдельных гармоник?
4. Как вычислить действующее значение периодического несинусоидального тока?
5. Как вычислить активную мощность в цепи периодического несинусоидального тока?
6. Как можно выделить одну из гармоник периодического несинусоидального тока или напряжения?

Лабораторная работа №12. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений

Цель работы: Изучение студентами вольтамперных характеристик диодов и биполярных транзисторов

Основы теории:

Полупроводниковый диод состоит из двух слоёв полупроводника, один из которых обладает дырочной проводимостью (р – слой), второй – электронной проводимостью (п – слой). Вследствие диффузии электронов и дырок на р-п-переходе образуется потенциальный барьер, который обуславливает нелинейные свойства диода. Вольтамперная характеристика диода представлена на рис. 9.1.



Если диод включить в электрическую цепь так, чтобы напряжение от источника э.д.с. было направлено от слоя р к слою п, то потенциальный барьер ликвидируется и по цепи потечёт ток. При этом сопротивление диода с увеличением напряжения уменьшается, так что падение напряжения на диоде не превышает долей вольта, а величина тока в цепи определяется в основном сопротивлением остальной части цепи и величиной э.д.с. источника (в.а.х. правее точки «а»). Если же напряжение от источника э.д.с. направлено от слоя п к слою р, то под действием приложенного напряжения потенциальный барьер р-п-перехода увеличивается и ток, который в напряжения потенциальный барьер р-п – перехода увеличивается и величина тока, который в этом случае обусловлен наличием неосновных по-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

малым (участок в.а.х. между точками «а» и «в»). При достижении величины обратного напряжения происходит пробой диода (участок

в.а.х. левее точки «в»). Различают три вида пробоя: лавинный, туннельный и тепловой. Лавинный пробой происходит в результате того, что при довольно высокой напряженности электрического поля, создаваемой источником э.д.с., неосновные носители зарядов (тепловые свободные электроны) разгоняются, получая энергию, достаточную для ионизации атомов кристалла кремния. Образующиеся в результате ионизации заряды, в свою очередь, тоже разгоняются и ионизируют другие атомы. Процесс ионизации нарастает лавинообразно, в результате чего сопротивление р-п –перехода резко падает, и величина тока через диод определяется сопротивлением остальной части цепи.

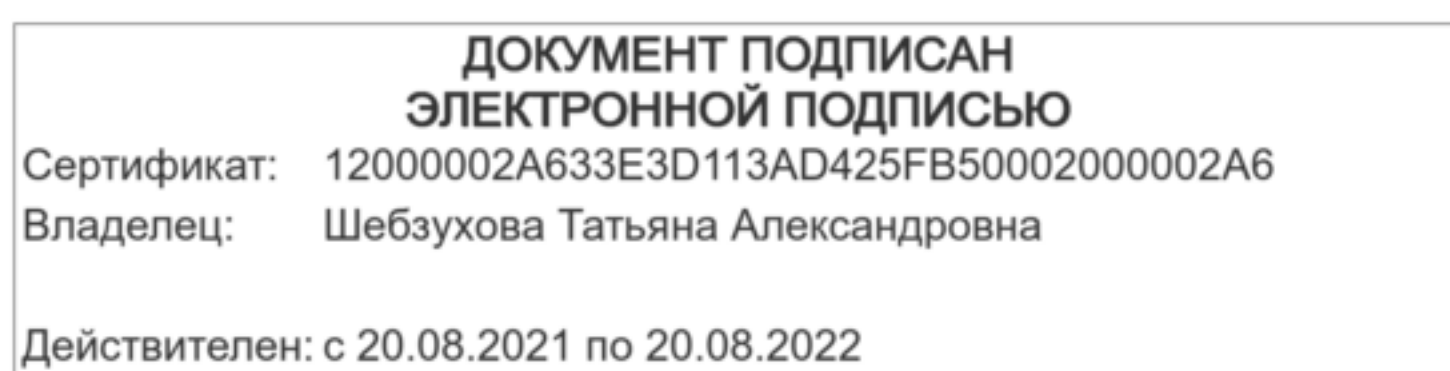
Туннельный пробой происходит у диодов с достаточно высокой концентрацией примесей, когда толщина обеднённой зоны р-п- перехода (лишенной основных носителей зарядов – электронов и дырок) мала. В этом случае под действием высокой напряженности внешнего электрического поля, создаваемого источником э.д.с., электроны преодолевают потенциальный барьер.

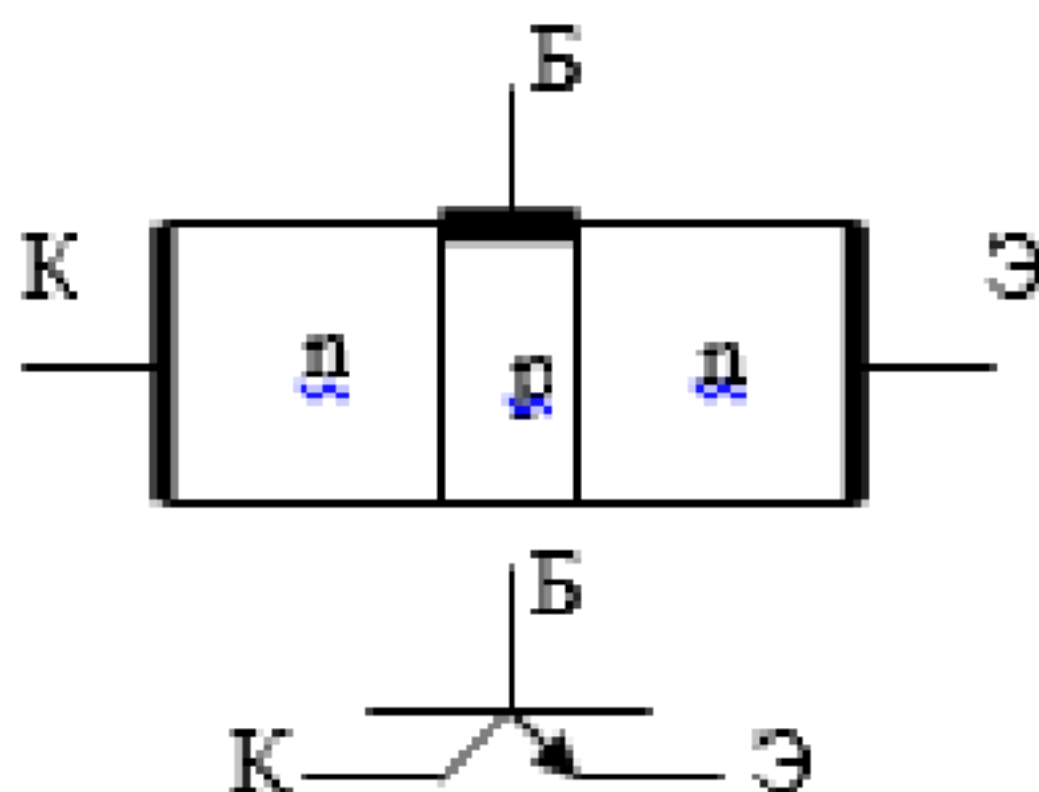
Если при пробое диода величина тока настолько велика, что количество выделяемого на диоде тепла превышает количество отводимого, то температура диода повышается, происходит тепловая ионизация, в результате которой разрушается структура полупроводника, лавинный или туннельный пробой переходит в тепловой, диод выходит из строя. Если же теплового пробоя не происходит, то все свойства диода сохраняются.

Диоды, используемые в схемах выпрямителей, преобразующих переменный ток в постоянный, работают на участке вольтамперной характеристики правее точки «в». Т.е. в этих схемах напряжение не должно превышать напряжения пробоя. На участке характеристики левее точки «в» работают диоды в схемах стабилизаторов напряжения. Эти диоды имеют специальную конструкцию, предотвращающую тепловую ионизацию при достаточно больших токах в режиме пробоя. Такие диоды называют стабилитронами.

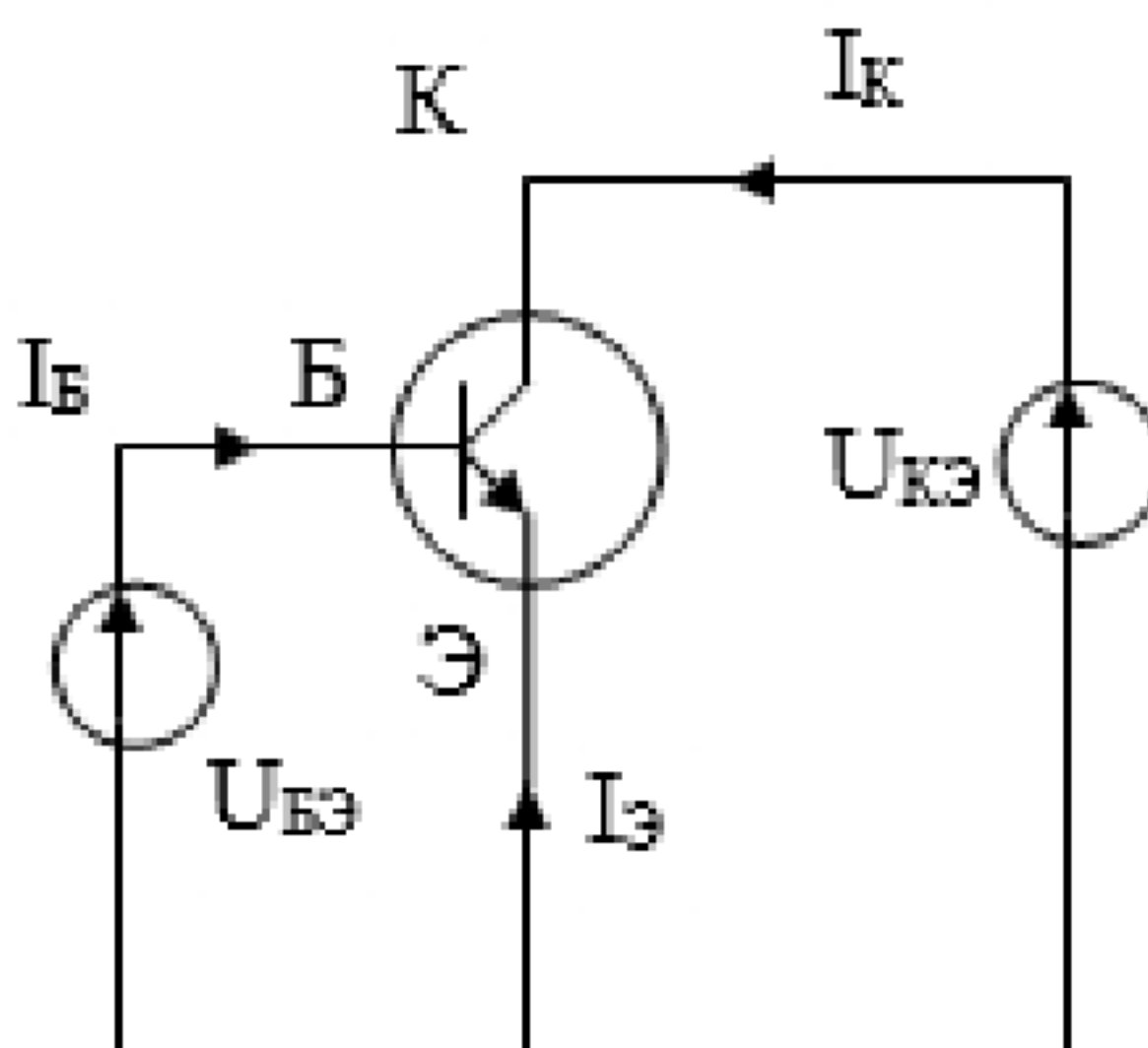
Наиболее широко используемыми управляемыми нелинейными сопротивлениями являются транзисторы, которые подразделяются на биполярные, управляемые током, и полевые, управляемые электрическим полем. В настоящей лабораторной работе рассматриваются характеристики биполярного транзистора.

Биполярные транзисторы имеют трёхслойную структуру с двумя р-п –переходами. Существуют транзисторы n-p-n типа и p-n-p типа. Схема конструкции n-p-n – транзистора представлена на рис. На этом же рисунке имеется условное графическое изображение данного транзистора.

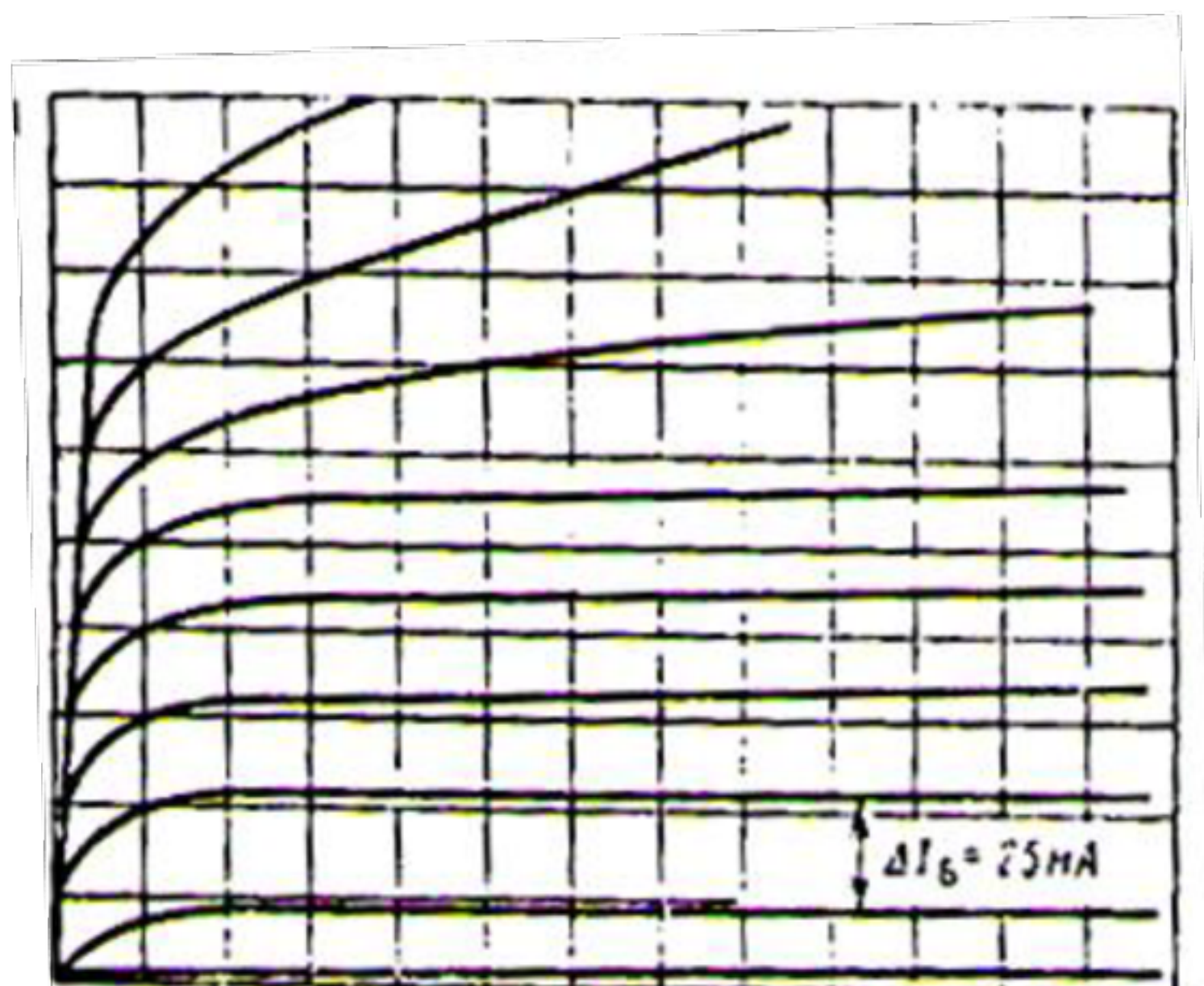




Два крайних слоя транзистора состоят из полупроводника, обладающего электронной проводимостью, средний слой – дырочной проводимостью. Каждый из трёх слоёв контактирует с металлическими электродами, которые служат для подключения транзистора к электрическим цепям. Средний слой называют базой, крайние – коллектор и эмиттер. Если между коллектором и эмиттером подать напряжение, как это показано на рис, то эмиттерный переход будет включён в проводящем направлении, а коллекторный – в непроводящем.



При отсутствии тока базы i_B транзистор между коллектором и эмиттером будет иметь достаточно большое сопротивление, ток в цепи коллектора i_K будет незначительным (это так называемый обратный ток коллектора, определяемый неосновными носителями зарядов). Если же в цепи базы создать ток, подключив источник напряжения между эмиттером и базой, то сопротивление коллекторного перехода уменьшится, в результате чего появится ток коллектора i_K . С увеличением тока базы сопротивление транзистора уменьшается.



Вольтамперные характеристики транзистора, представляющие собой зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при различных значениях тока базы, изображены на рис.

Эти характеристики называют выходными, в отличие от входных, представляющих зависимость тока базы от напряжения эмиттер-база.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

В данной лабораторной работе студенты снимают вольтамперную характеристику стабилитрона и выходные характеристики биполярного транзистора.

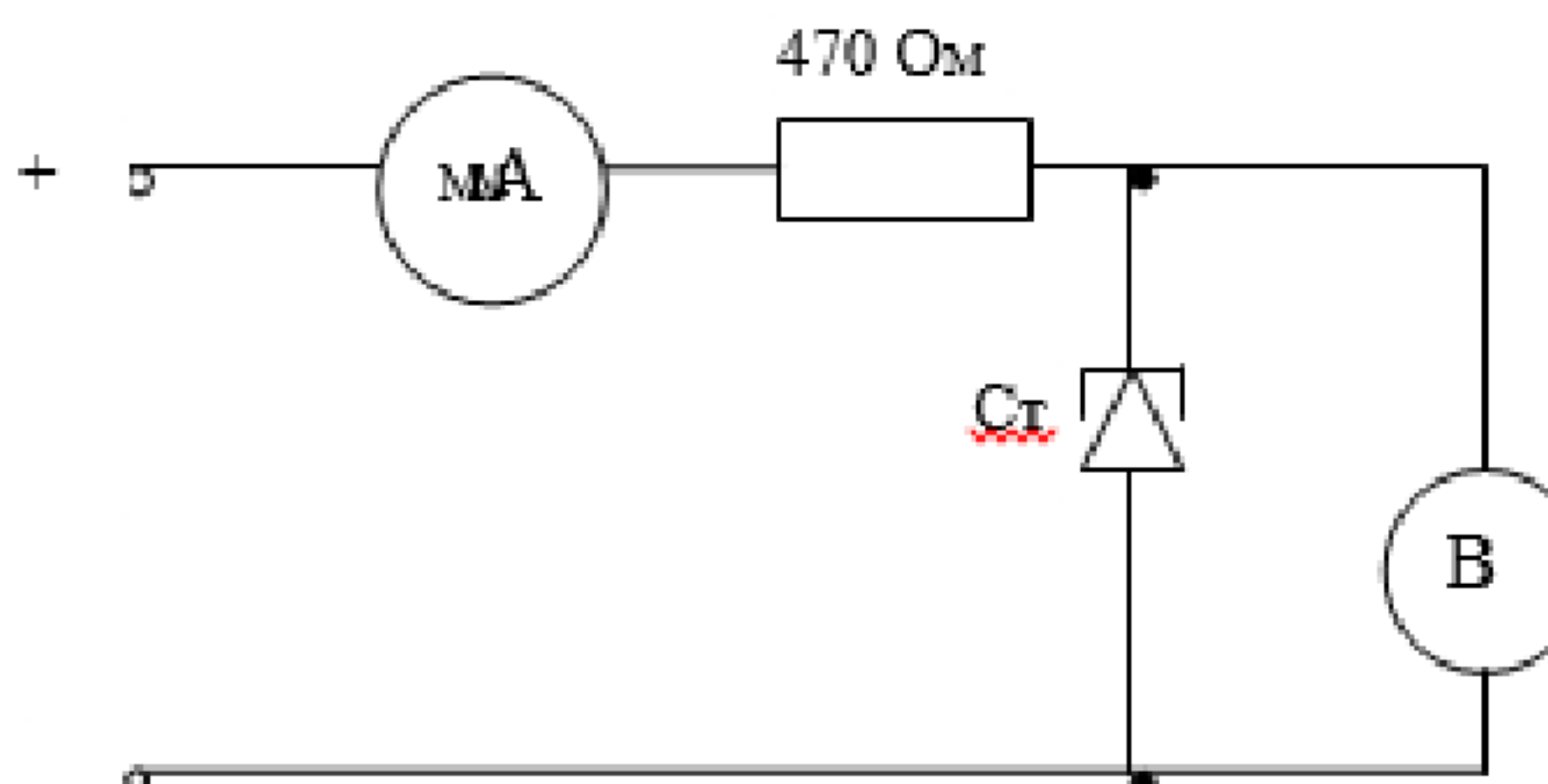
Собрать схему, представленную на рис. В качестве источника напряжения использовать регулируемый источник 0...15 В. Установить пределы измерения тока 20 мА, напряжения – 20В.

Постепенно увеличивая напряжение, зафиксировать такое его значение, при котором появится в цепи ток. В дальнейшем, повышая ток до 5 мА с интервалом в 1 мА, записать соответствующие каждому току значения напряжения. Результаты замеров записать в таблицу.

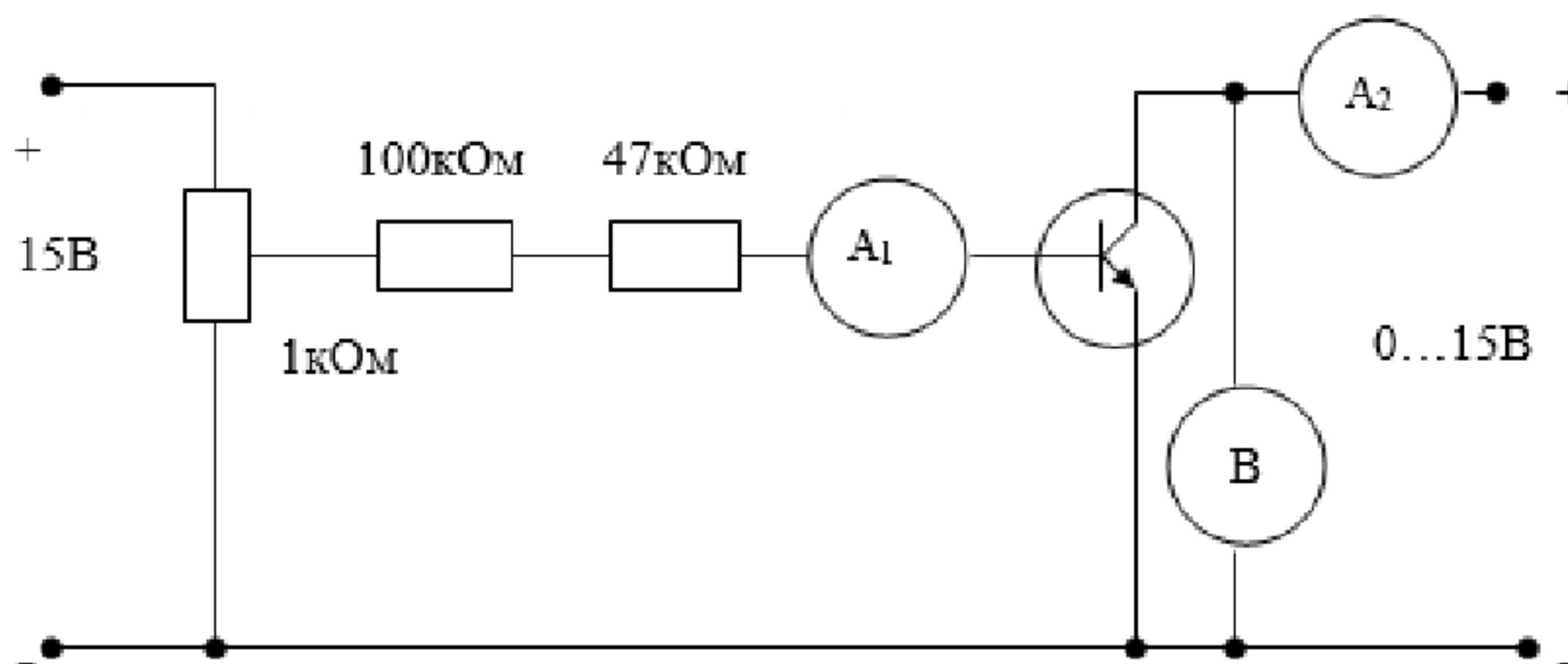
Снизить напряжение до нуля и затем поменять его полярность. Постепенно увели-

чивая напряжение, зафиксировать его значение, при котором в цепи появится ток (оно будет значительно ниже полученного в предыдущем случае). Увеличивая ток до 5 мА с интервалом в 1 мА, записать в таблицу соответствующие каждому току напряжения.

Построить график вольтамперной характеристики на миллиметровой бумаге в масштабе.



Для снятия выходных характеристик транзистора собрать схему, изображенную на рис. На потенциометр 1 кОм напряжение подать от нерегулируемого источника питания 15 В , в цепь коллектора – от регулируемого источника $0 \dots 15\text{ В}$. Пределы измерения приборов установить с учётом того, что ток в цепи базы не будет превышать 100 мкА , в цепи коллектора – 10 мА , напряжение – 5 В .



Установить ток базы 20 мкА . Постепенно повышая напряжение в цепи коллектор-эмиттер, найти его значение, после которого ток коллектора изменяется незначительно. До этого значения снять $3 - 4$ точки характеристики, после этого значения – $2 - 3$ точки.

Проделать опыты, аналогичные п.7, при токах базы $40, 60, 80\text{ мкА}$. Значения напряжений и токов занести в таблицы.

Построить в масштабе на миллиметровой бумаге выходные вольтамперные характеристики транзистора.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

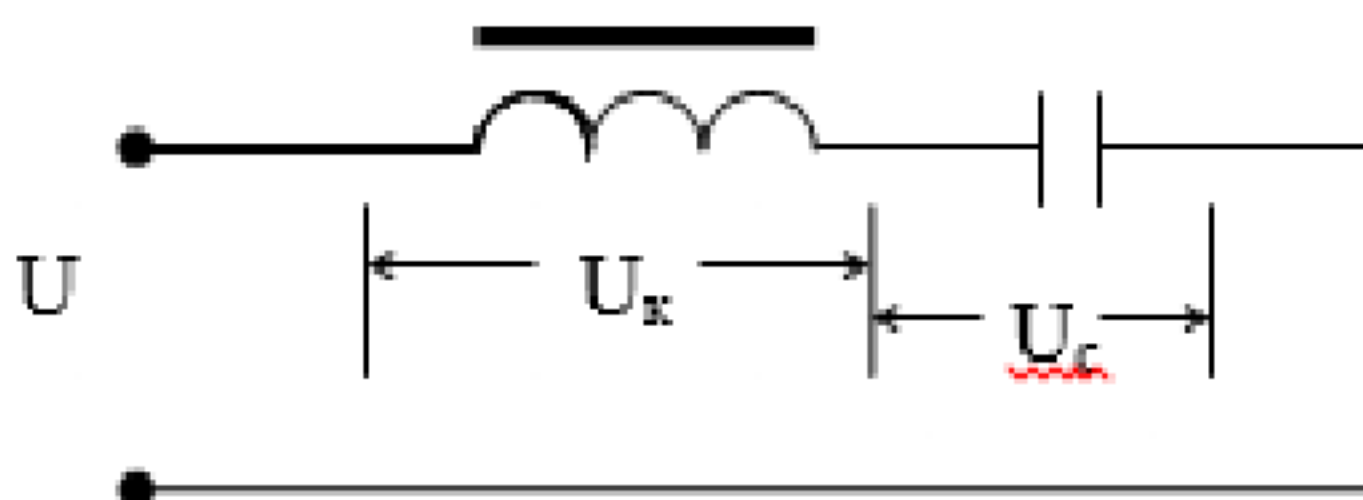
- 1.Опишите конструкцию диода и биполярного транзистора.
- 2.В результате чего образуется потенциальный барьер p-n – перехода?
- 3.Почему диод обладает односторонней проводимостью?
- 4.Чем определяется величина обратного тока диода?
- 5.Какие различают виды пробоя диода? Опишите физические процессы при различных видах пробоя.
- 6.Зависимость между какими величинами отражают входные и выходные характеристики биполярных транзисторов?
- 7.Опишите схемы и способы экспериментального определения вольтамперных характеристик диодов и транзисторов.

Лабораторная работа №13. Феррорезонанс в последовательной цепи

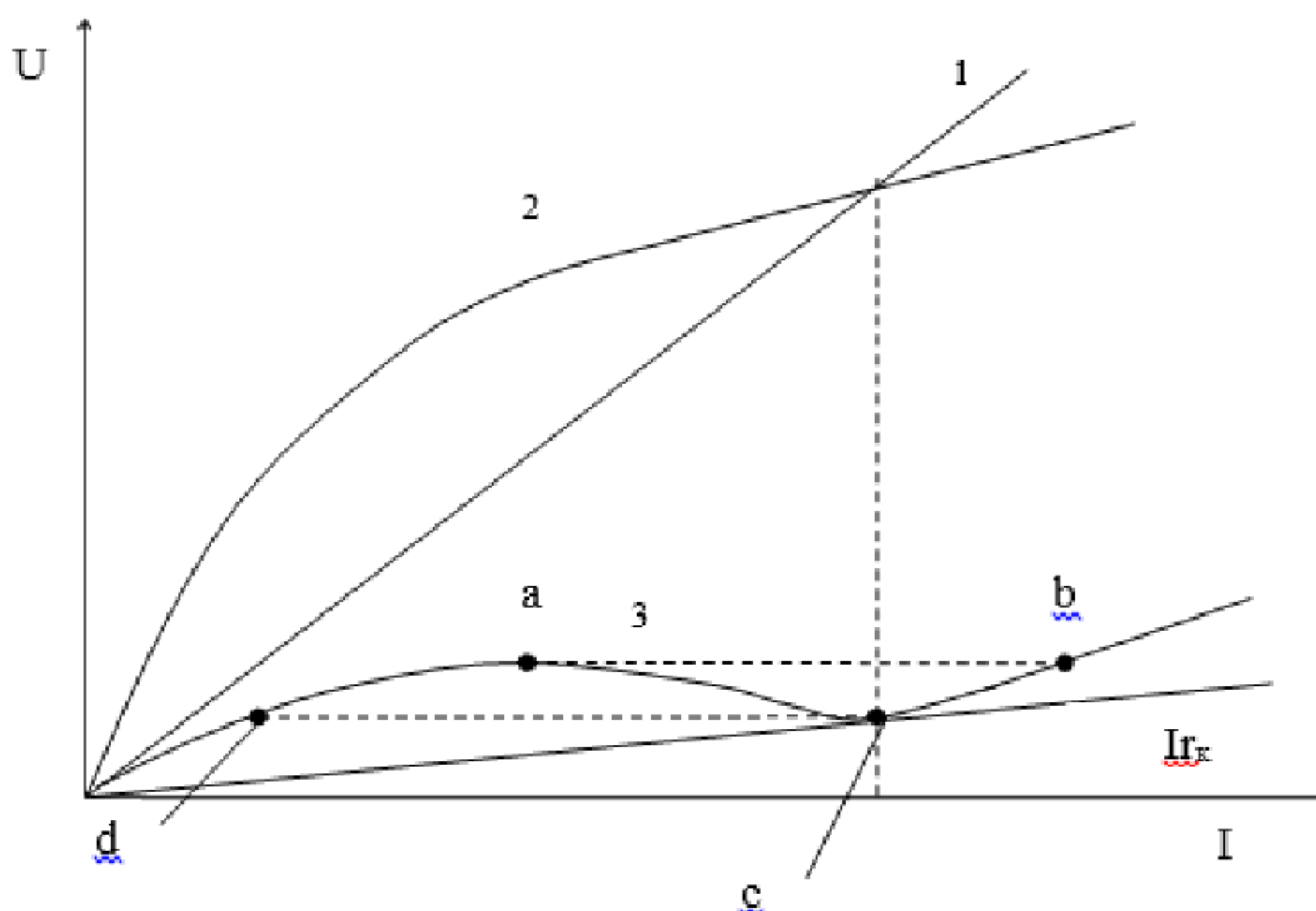
Цель работы: Изучение студентами вольтамперных характеристик и триггерного эффекта в последовательной феррорезонансной цепи.

Основы теории:

Последовательная феррорезонансная цепь состоит из катушки со стальным сердечником и конденсатора.



К зажимам цепи подведено синусоидально изменяющееся напряжение определенной частоты.



При увеличении напряжения на конденсаторе U_c ток увеличивается пропорционально напряжению, т.к. сопротивление конденсатора $x_c = 1/(\omega C)$ остаётся постоянным. Вольтамперная характеристика конденсатора линейна (кривая 1 на рис.10.2).

Вольтамперная характеристика катушки со стальным сердечником носит ярко выра-

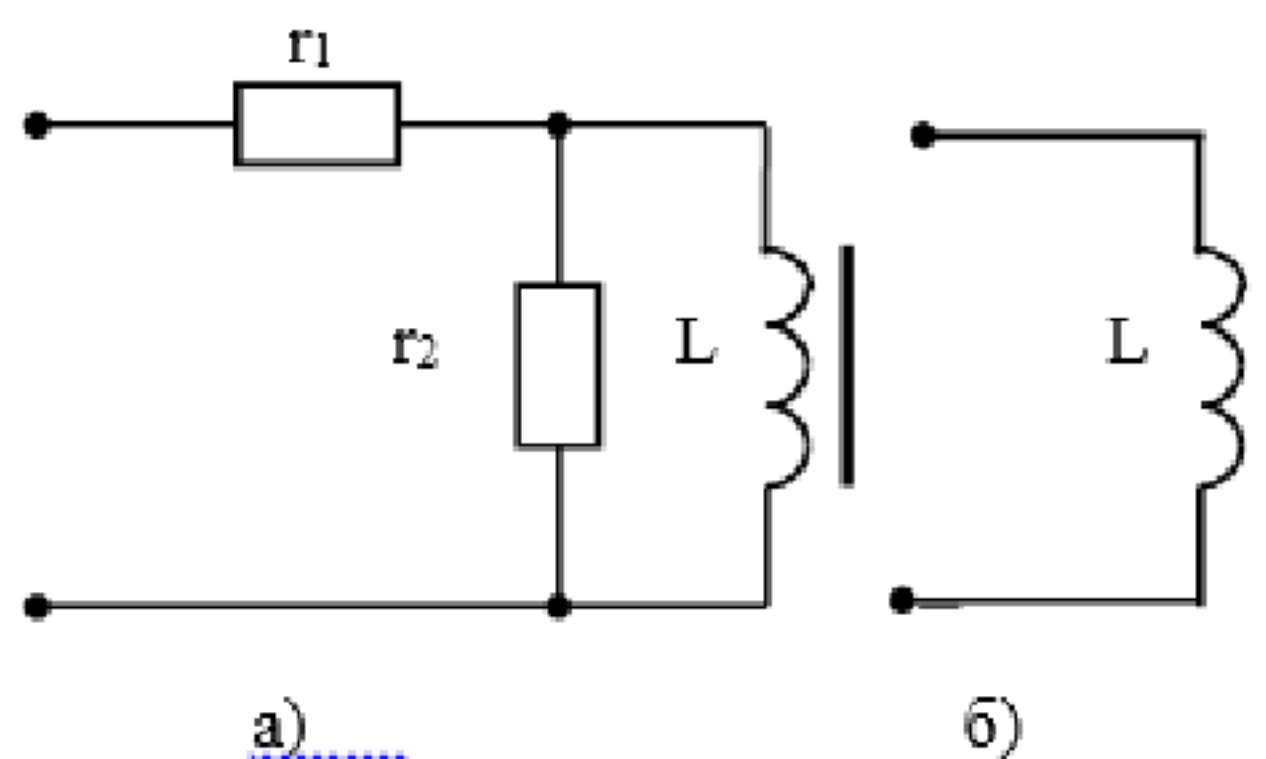
женный нелинейный характер (кривая 2 на рис. 10.2). Нелинейность характеристики обу-

Словлена нелинейной зависимостью магнитной индукции в стальном сердечнике от напря-

жённости магнитного поля.

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Если учесть активное сопротивление катушки и потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи, то схема замещения катушки выглядит так, как представлено на рис. 10.3, а. Сопротивление r_1 равно активному сопротивлению обмотки катушки, сопротивление r_2 учитывает потери мощности в магнитопроводе.



Ввиду того, что катушки мотают обычно медным проводом, их сопротивление r_1 существенно меньше индуктивного. Кроме того, потери в магнитопроводе также не оказывают при низких частотах существенного влияния на режим работы электрической цепи, т.к. сопротивление r_2 оказывается намного больше индуктивного сопротивления катушки. Таким образом, с достаточной для практических целей точностью индуктивное сопротивление катушки можно считать равным её полному сопротивлению. С учётом данного допущения схема замещения катушки со стальным сердечником изображена на рис.

При последовательном включении катушки и конденсатора по ним протекает один и тот же ток. Ввиду того, что напряжение на катушке опережает ток на угол $\pi/2$ а на конденсаторе отстаёт от тока на такой же угол, напряжение на зажимах рассматриваемой цепи будет равно разности напряжений на катушке и конденсаторе (кривая 3 на рис. 10.2). Если напряжение на зажимах цепи увеличивать, начиная с нуля, то ток будет постепенно расти до значения, соответствующего точке «а», затем он скачком увеличится до значения, соответствующего точке «б», при этом резко возрастет мощность, потребляемая цепью, а угол фазового сдвига между током и напряжением изменит свой знак: в точке «а» ток отстаёт от напряжения, в точке «б» - опережает напряжение. При дальнейшем увеличении напряжения ток плавно растёт по кривой 3.

При снижении напряжения ток уменьшается до значения, соответствующего точке «с», затем уменьшается скачком (точка «д») и в дальнейшем плавно уменьшается до нуля. Скачкообразное изменение тока при незначительном изменении напряжения называют триггерным эффектом.

Точка «а» соответствует режиму резонанса напряжений. В этой точке напряжение на индуктивности по величине равно напряжению на ёмкости и находится с

ним в противофазе. Напряжение на зажимах цепи в этой точке равно падению напряжения на активном сопротивлении цепи. Режим резонанса возникает вследствие нелинейности вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником, поэтому его называют феррорезонансом. Следует напомнить, что в линейных цепях резонанс возникает только при определённой частоте и не зависит от амплитуды тока или напряжения.

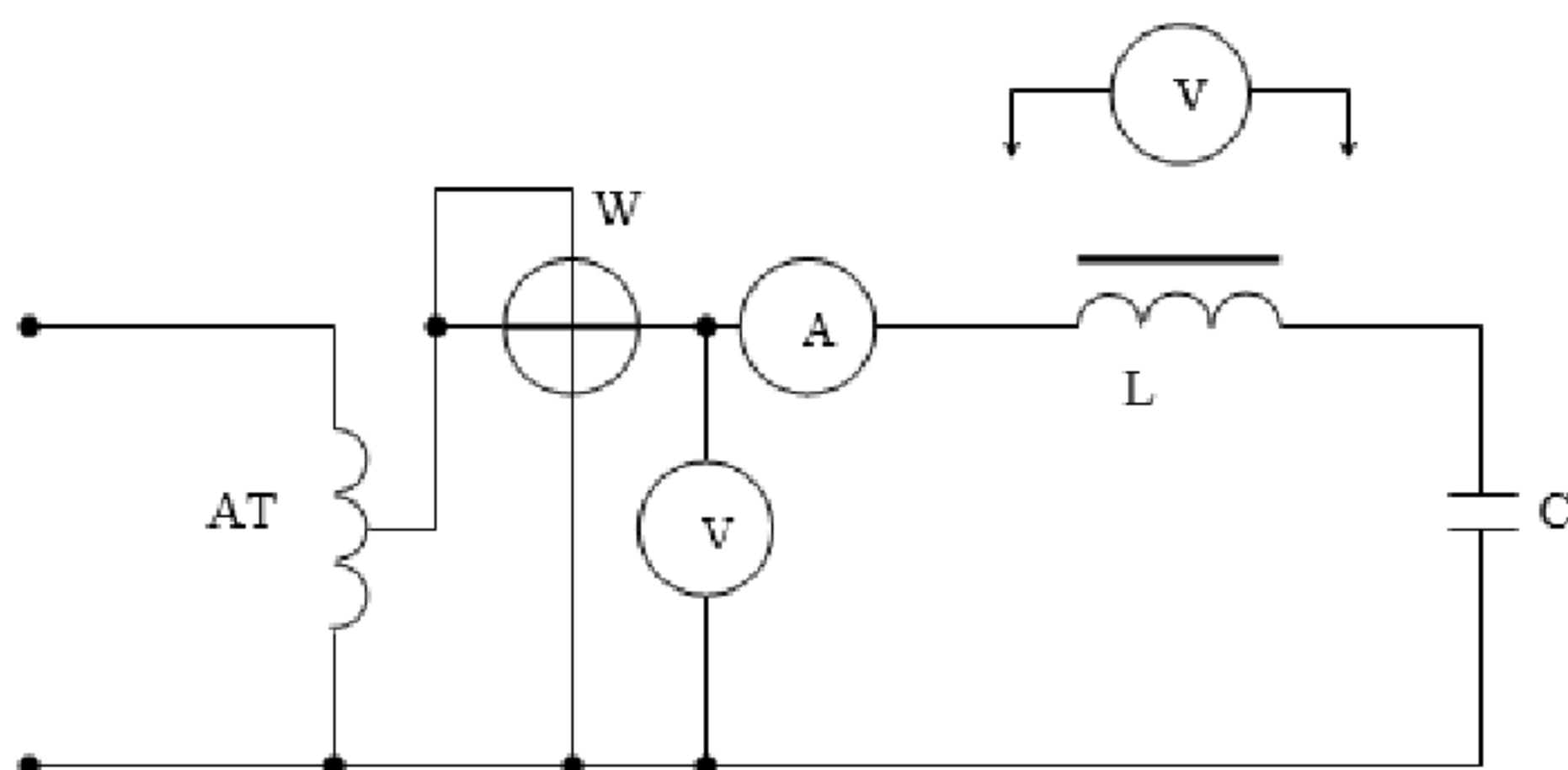
Явление феррорезонанса используется в некоторых электротехнических устройствах, например, в стабилизаторах напряжения. Триггерный эффект используется в некоторых устройствах автоматики.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

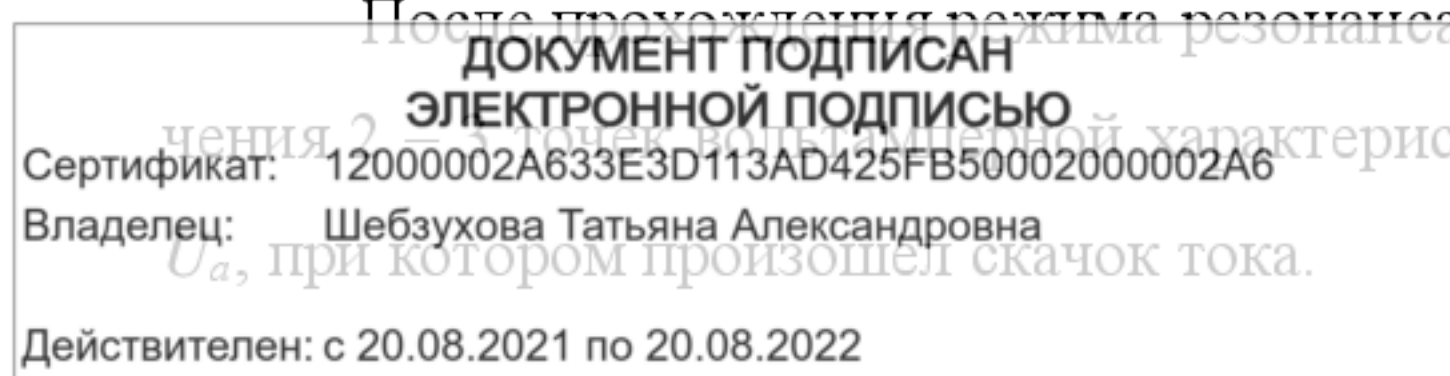
Собрать схему, изображённую на рис.10.4. Установить следующие пределы измерения: амперметра – 200мА, вольтметра – 20В



Перед подачей напряжения установить рукоятку автотрансформатора АТ в крайнее левое положение. Подать на схему напряжение питания и, очень плавно увеличивая напряжение поворотом рукоятки трансформатора, найти такое его значение, при котором ток в цепи изменится скачкообразно. Это напряжение U_a соответствует точке «а» на рис.10.3.

Уменьшить напряжение до нуля и, увеличивая его снова до значения U_a , зафиксировать при 3 – 4 его значениях ток в цепи, потребляемую мощность и напряжения на катушке U_k и на конденсаторе U_c , которые поочерёдно замерять вольтметром V_2 .

После прохождения режима резонанса, увеличив напряжение на 1 – 1,5В, снять значения 2 – 3 точек вольтамперной характеристики, затем снизить напряжение до значения U_a , при котором произошёл скачок тока.



Продолжая снижать напряжение интервалами по 0,1 В и записывая соответствующие значения тока, мощности и напряжений на катушке и конденсаторе, найти такое его значение, при котором ток уменьшится скачкообразно.

Уменьшая ток до нуля, снять последние 2 – 3 точки вольтамперных характеристик. Результаты замеров записать в таблицу.

	При увеличении напряжения							При уменьшении напряжения					
U, В													
I, мА													
U _к , В													
U _с , В													
P, мВт													
φ													

Значения угла фазового сдвига $\varphi = \arctg P / (UI)$ вычислить, учитывая, что $\varphi > 0$, если $U_K > U_C$, и $\varphi < 0$, если $U_K < U_C$.

На миллиметровой бумаге построить графики зависимостей

$$U=f(I), U_K=f(I), U_C=f(I), \varphi=f(I).$$

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

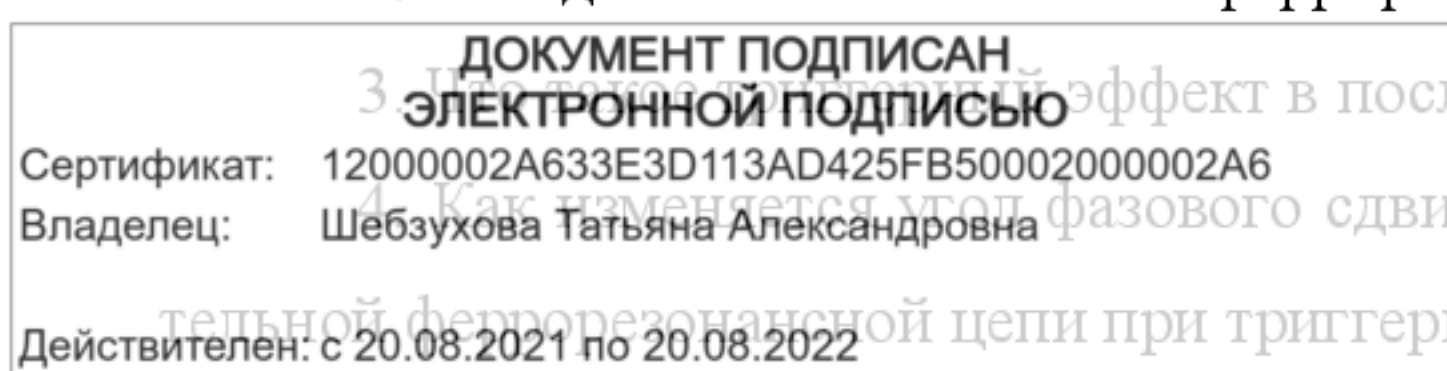
Контрольные вопросы:

1. По какой причине изменяется индуктивность катушки со стальным сердечником при изменении тока?

2. Вследствие чего возникает феррорезонанс напряжений?

3. Как проявляется феррорезонансный эффект в последовательной феррорезонансной цепи?

4. Как изменяется угол фазового сдвига между током и напряжением в последовательной феррорезонансной цепи при триггерном эффекте?



5. Как влияет ёмкость конденсатора на величину тока и напряжения, при которых возникает феррорезонанс?

6. Как влияют сечение магнитопровода и число витков катушки на ток, при котором возникает феррорезонанс?

7. Как влияет форма кривой намагничивания материала сердечника на положение точки феррорезонанса на вольтамперной характеристике последовательной феррорезонансной цепи?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №14. Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью

Цель работы: Закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих ёмкость, практическая проверка результатов расчёта.

Основы теории:

Электрическая цепь с одним конденсатором и сопротивлениями описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому свободные составляющие токов в ветвях и напряжений имеют одно слагаемое вида Ae^{pt} , где p – корень характеристического уравнения, A – постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение может быть представлено в виде:

$$Z(p)=0,$$

где $Z(p)$ – входное операторное сопротивление цепи.

Постоянные интегрирования A определяются для каждого тока и напряжения из начальных условий. Значение A равно начальному значению функции в первый момент времени после коммутации.

Начальное значение напряжения на конденсаторе определяется в соответствии с законом коммутации $u_c(0_-)=u_c(0_+)$. В свою очередь, $u_c(0_-)$ определяется из расчёта цепи до коммутации. Начальные значения других величин, называемые зависимыми начальными условиями, (значения токов и напряжений, которые могут изменяться скачком) рассчитываются по законам Кирхгофа и Ома в момент коммутации $t=0_+$. В электрической цепи с одним конденсатором в результате коммутации свободные составляющие всех токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону с одной постоянной времени $\tau=1/|p|$. В данной работе коммутация (замыкание и размыкание цепи) осуществляется транзистором, работающим в ключевом режиме. Отпирающие импульсы тока на базу транзистора подаются от источника синусоидального напряжения с частотой 50 Гц. Таким образом, процесс замыкания и размыкания цепи периодически повторяется и его можно наблюдать на осциллографе. Длительность каждого включения и отключения составляет 0,01 с.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены

в приложении	ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с электрической схемой и выполнить расчёт докоммутационных и послекоммутационных начальных условий, а также вынужденных (установившихся) значений токов и напряжений при замыкании и размыкании электрической цепи. Составить характеристическое уравнение для замкнутой и разомкнутой (в ветви с сопротивлением R_2) цепи и найти постоянные времени. Результаты расчётов занести в таблицу.

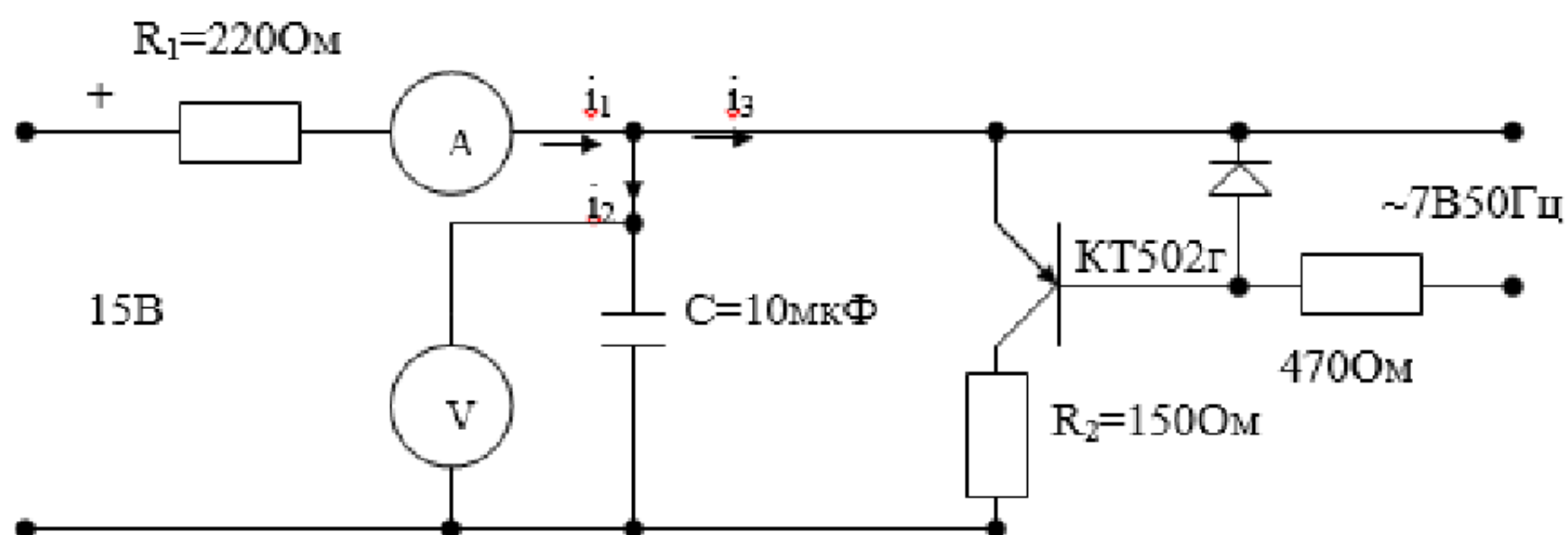


Таблица – Ключ замыкается

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0_- , расчёт					
0_- , эксперимент					
0_+ , расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

Таблица – Ключ размыкается

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0_- , расчёт					
0_- , эксперимент					
0_+ , расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные					

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Собрать схему, обратив внимание на полярность электролитического конденсатора. Подать напряжение 15 В. Из схемы убрать транзистор, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при замыкании ключа, а также $t = \infty$ при размыкании ключа; значения напряжения u_c и токов занести в таблицу.

Вместо цепи транзистора коллектор-эмиттер установить перемычку, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при размыкании ключа и $t = \infty$ при замыкании ключа; значения величин замерить и занести в таблицу.

Рассчитать свободные составляющие токов и напряжения на конденсаторе при замыкании и при размыкании цепи как разность между полными значениями переменных при $t=0_+$ и при $t = \infty$. Вычисленные значения переменных занести в таблицу.

Составить характеристические уравнения и найти постоянные времени τ при замкнутом и разомкнутом положениях ключа.

Установить в цепи транзистор и подать напряжение $\sim 7\text{В}$ в цепь базы. На экране осциллографа наблюдать кривые напряжений:

$$U_c(t), U_{R1}(t)=R_1 i_1(t), U_{R2}(t)=R_2 i_3(t).$$

Кривые зарисовать на кальку, а затем перенести их на миллиметровку, приняв следующие масштабы времени и напряжения:

$$1\text{мс}=1\text{см}, \quad 1\text{В}=1\text{см}.$$

Учесть, что при частоте напряжения, поданного в цепь базы транзистора, $f=50\text{Гц}$ цикл замыкания-размыкания равен 20мс. При определении ординат использовать экспериментально полученные значения напряжений при замкнутом и разомкнутом состояниях ключа.

Записать выражения для токов и напряжений, как функций времени, используя вычисленные значения постоянных времени, вынужденных и свободных составляющих величин. Построить на миллиметровой бумаге соответствующие кривые и сравнить их с экспериментальными.

Содержание отчета:

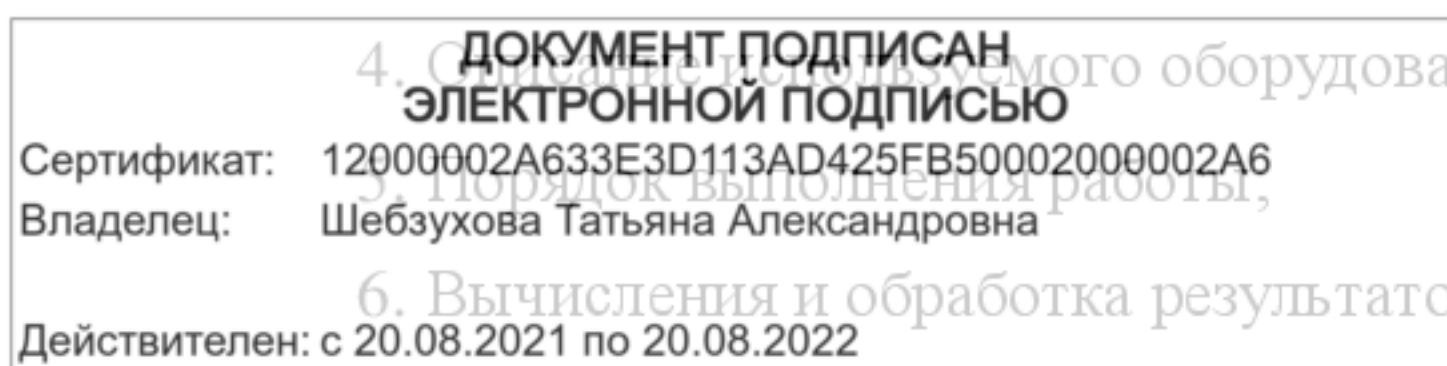
Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;

4. Составление математической модели оборудования и материалов;

5. Порядок выполнения работы;

6. Вычисления и обработка результатов;



7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Почему на конденсаторе напряжение не может изменяться скачком?
2. Что понимают под коммутацией?
3. Чем определяется степень характеристического уравнения?
4. Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?
5. Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?
6. Что такое постоянная времени переходного процесса?
7. Как изменится постоянная времени цепи с конденсатором при увеличении его ёмкости?
8. Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей ёмкость, на длительность переходного процесса?
9. Как рассчитывают зависимые начальные условия?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №15. Исследование переходных процессов в цепи с индуктивностью

Цель работы: Закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих индуктивность, практическая проверка результатов расчёта.

Основы теории:

Электрическая цепь с одной индуктивностью и сопротивлениями описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому свободные составляющие токов в ветвях и напряжений имеют одно слагаемое вида Ae^{pt} , где p – корень характеристического уравнения, A – постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение может быть представлено в виде:

$$Z(p)=0,$$

где $Z(p)$ – входное операторное сопротивление цепи.

Постоянные интегрирования A определяются для каждого тока и напряжения из начальных условий. Значение A равно начальному значению функции в первый момент времени после коммутации. Начальное значение тока в индуктивности определяется в соответствии с законом коммутации $i_L(0_-)=i_L(0_+)$. В свою очередь, $i_L(0_-)$ определяется из расчёта цепи до коммутации. Начальные значения других величин, называемые зависимыми начальными условиями, (значения токов и напряжений, которые могут изменяться скачком) рассчитываются по законам Кирхгофа и Ома в момент коммутации $t=0_+$.

В электрической цепи с одной индуктивностью в результате коммутации свободные составляющие всех токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону с одной постоянной времени $\tau=1/|p|$.

В данной работе коммутация (замыкание и размыкание цепи) осуществляется транзистором, работающим в ключевом режиме. Отпирающие импульсы тока на базу транзистора подаются от импульсного генератора однополярного прямоугольного напряжения с частотой 200 Гц. Таким образом, процесс замыкания и размыкания цепи периодически повторяется и его можно наблюдать на осциллографе. Длительность каждого включения и отключения составляет 2,5мс.

Указание по технике безопасности:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложении А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с электрической схемой и выполнить расчёт докоммутационных и послекоммутационных начальных условий, а также вынужденных (установившихся) значений токов и напряжений при замыкании и размыкании электрической цепи.

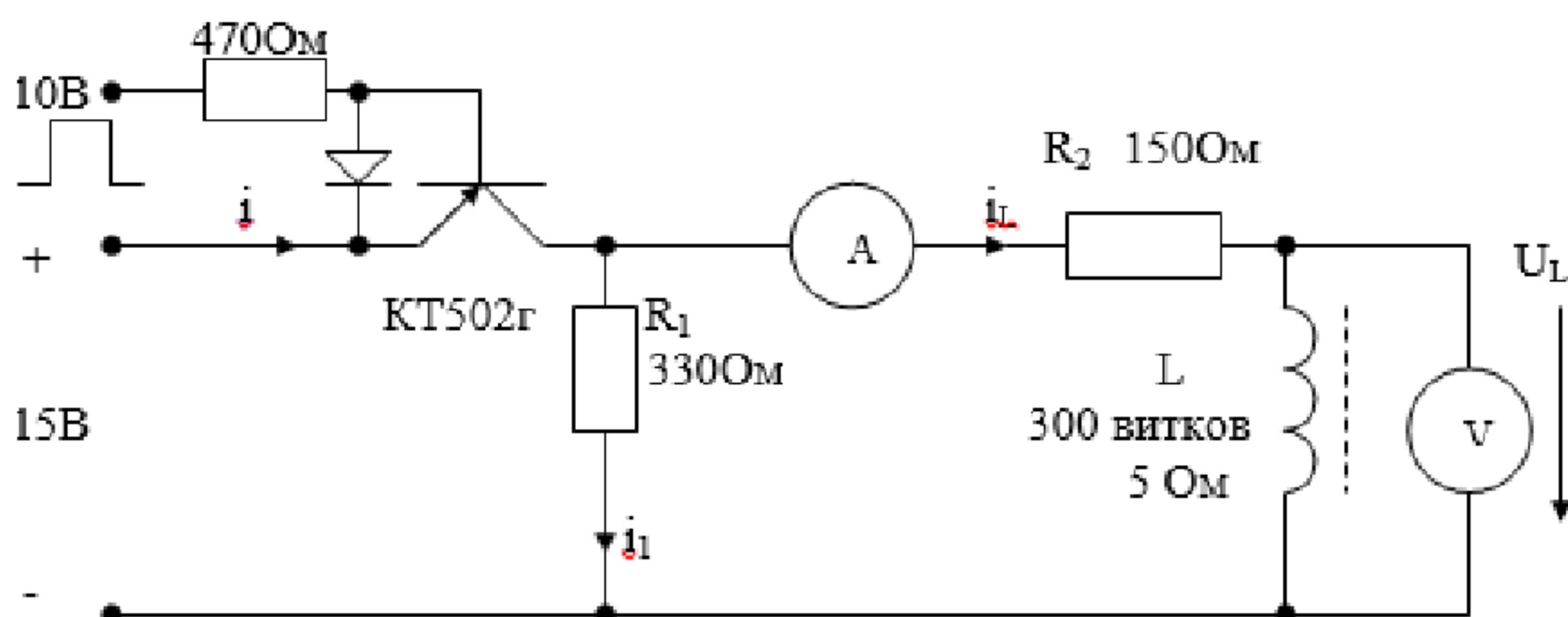


Таблица – Ключ замыкается

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0_- , расчёт					
0_- , эксперимент					
0_+ , расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

Таблица – Ключ размыкается

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0_- , расчёт					
0_- , эксперимент					
0_+ , расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Составить характеристическое уравнение для замкнутой и разомкнутой цепи и найти постоянные времени. Результаты расчётов занести в таблицу

Собрать схему. Подать напряжение 15 В. Из схемы убрать транзистор, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при замыкании ключа, а также $t=\infty$ при размыкании ключа; значения напряжений и токов занести в таблицу.

Вместо цепи транзистора коллектор-эмиттер установить перемычку, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при размыкании ключа и $t=\infty$ при замыкании ключа; значения величин замерить и занести в таблицу.

Рассчитать свободные составляющие токов и напряжений при замыкании и при размыкании цепи как разность между полными значениями переменных при $t=0_+$ и при $t=\infty$. Вычисленные значения переменных занести в таблицу.

Составить характеристические уравнения и найти постоянные времени τ при замкнутом и разомкнутом положениях ключа.

Установить в цепи транзистор и подать напряжение генератора импульсов в цепь базы. На экране осциллографа наблюдать кривые напряжений:

$$U_L(t), U_{R1}(t)=R_1 i_1(t), U_{R2}(t)=R_2 i_L(t).$$

Кривые зарисовать на кальку, а затем перенести их на миллиметровку, приняв следующие масштабы времени, напряжения и тока:

$$1\text{мс}=5\text{см}, \quad 1\text{В}=0,2\text{см}, \quad 1\text{мА}=0,1\text{см}.$$

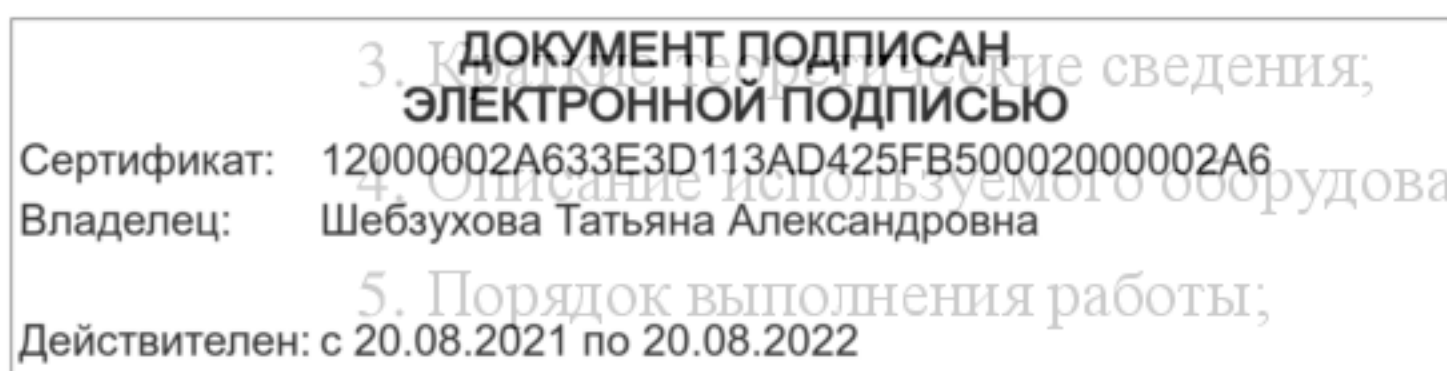
Учесть, что при частоте сигнала, поданного в цепь базы транзистора, $f=200\text{Гц}$ цикл замыкания-размыкания равен 5мс. При определении ординат использовать экспериментально полученные значения напряжений при замкнутом и разомкнутом состояниях ключа и сопротивления соответствующих ветвей.

Записать выражения для токов и напряжений, как функций времени, используя вычисленные значения постоянных времени, вынужденных и свободных составляющих величин. Построить на миллиметровой бумаге соответствующие кривые и сравнить их с экспериментальными.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

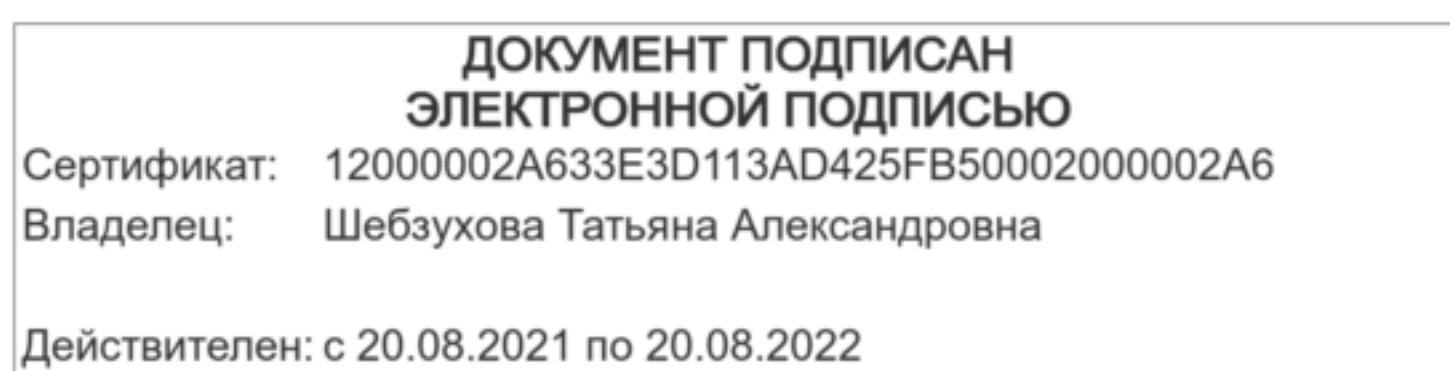
1. Название работы;
2. Цель работы;



6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Почему ток в индуктивности не может изменяться скачком?
2. Что понимают под коммутацией?
3. Чем определяется степень характеристического уравнения?
4. Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?
5. Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?
6. Что такое постоянная времени переходного процесса?
7. Как изменится постоянная времени цепи с катушкой при увеличении её индуктивности?
8. Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей индуктивность, на длительность переходного процесса?
9. Как рассчитывают зависимые начальные условия?



Лабораторная работа №16. Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами

Цель работы: Исследовать установившиеся электромагнитные процессы в длинной линии без потерь в режимах холостого хода и короткого замыкания; изучить влияние величины и характера нагрузки на режим работы линии.

Основы теории:

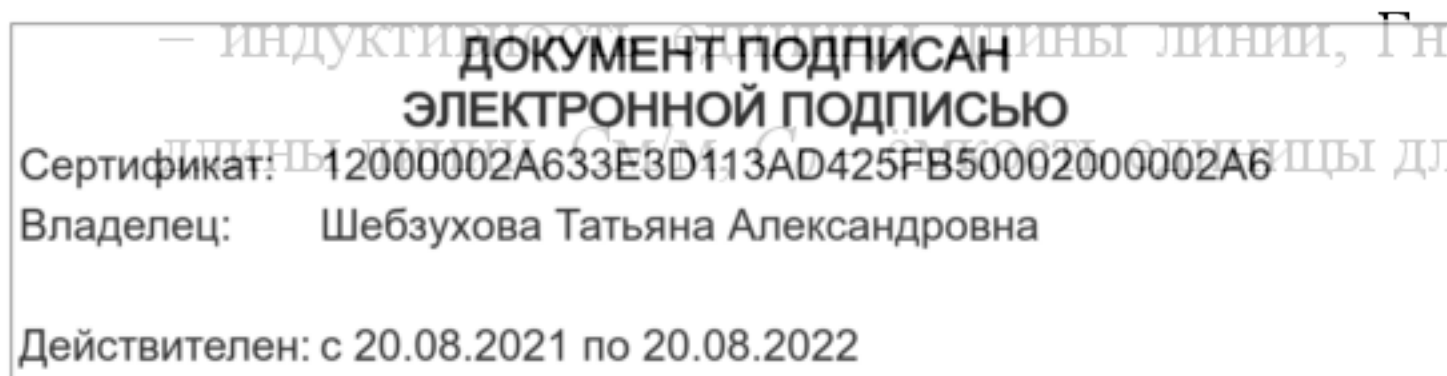
В мощных линиях передачи электрической энергии переменного тока на большие расстояния, в информационных линиях связи, в антеннах радиотехнических устройств и других установках, линейные размеры которых соизмеримы с длиной волн колебательного электромагнитного процесса, все изменения и превращения энергии электромагнитного поля распределены вдоль линии передачи энергии. Такие электрические цепи, в отличие от цепей с сосредоточенными параметрами, называются цепями с сосредоточенными параметрами.

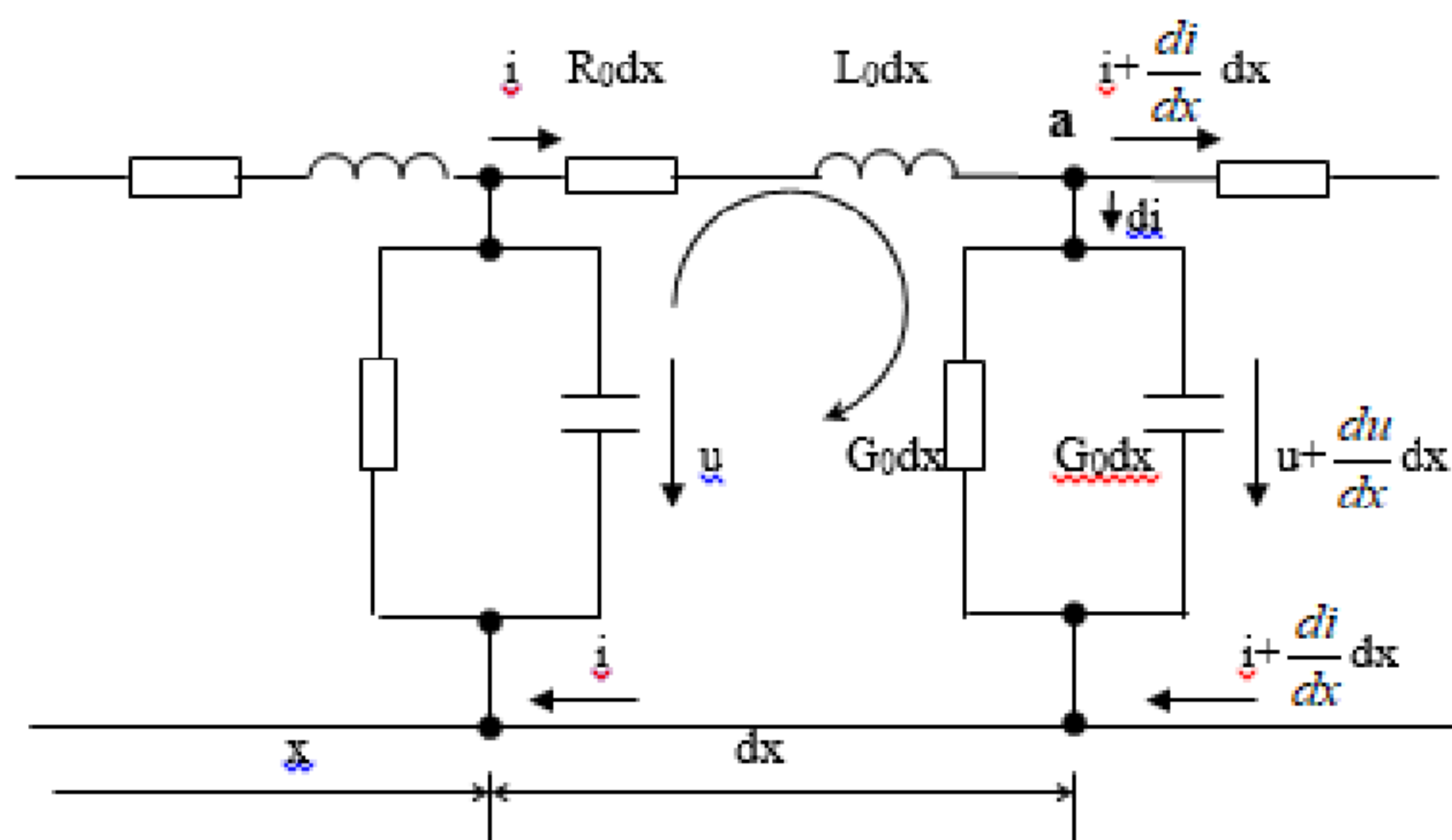
На практике в подавляющем числе случаев приходится иметь дело с однородными линиями, параметры которых (активное сопротивление проводников, проводимость изоляции, индуктивность и ёмкость) равномерно распределены вдоль линии и постоянны на единицу её длины. Кроме того, эти параметры обычно не зависят от напряжения и величины протекающего тока, поэтому протекающие в них процессы могут быть описаны линейными дифференциальными уравнениями. Ввиду того, что напряжения и токи являются функциями не только времени, но и расстояния от начала (или конца) линии эти процессы описываются уравнениями в частных производных.

Схема длинной линии на бесконечно малом участке dx представлена на рис.

Параметры линии зависят от типа линии (воздушная или кабельная), геометрических размеров и расположения проводов, их материала, от частоты приложенного напряжения. Зависимость основных параметров двухпроводной линии и коаксиального кабеля от геометрических размеров и расположения приведена в таблице.

Обозначения на рисунке: x - расстояние от начала линии, м, dx – бесконечно малый участок линии, длины линии, А/м, $\frac{du}{dx}$ - изменение напряжения на единицу длины линии, В/м, R_0 – сопротивление единицы длины линии (прямого и обратного проводов), Ом/м, L_0 – индуктивность единицы длины линии, Гн/м, G_0 – проводимость изоляции на единицу длины линии, Ф/м.





	Двухпроводная линия	Коаксиальная линия
Параметры линии		
Емкость на единицу длины	$C_0 \approx \frac{\pi \epsilon}{\ln \frac{d}{r_0}}$	$C_0 = \frac{2\pi \epsilon}{\ln \frac{r_e}{r_i}}$
Индуктивность на единицу длины	$L_0 \approx \frac{\mu}{\pi} \ln \frac{d}{r_0}$	$L_0 = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_e}{r_i}$
Волновое сопротивление	$Z_B \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{d}{r_0}$	$Z_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{r_e}{r_i}$
В приведенных формулах $\mu = \mu_0 \mu_r$, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м		

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для замкнутого контура, образованного участком линии длиной dx , обойдя его по часовой стрелке:

$$-u + R_0 dx \cdot i + L_0 dx \frac{di}{dt} + u + \frac{du}{dx} dx = 0.$$

После упрощения и деления на dx получим:

$$\frac{du}{dx} = -L_0 \frac{di}{dt} - R_0 i \quad (14.1).$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$i = di + i + \frac{di}{dx} dx,$$

Ток di равен сумме токов, протекающих через проводимость $G_0 dx$ и ёмкость $C_0 dx$:

$$di = (u + \frac{du}{dx} dx) G_0 dx + \frac{d}{dt} C_0 dx (u + \frac{du}{dx} dx).$$

Пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, получим:

$$di = u G_0 dx + C_0 dx \frac{du}{dt}.$$

Подставим найденное значение di в уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа, и разделим уравнение на dx :

$$-\frac{di}{dx} = G_0 u + C_0 \frac{du}{dt} \quad (14.2).$$

Уравнения (14.1) и (14.2) являются основными дифференциальными уравнениями для линии с распределёнными параметрами. Рассмотрим решение этих уравнений при установившемся синусоидальном процессе. Воспользуемся символическим методом. Изображение синусоидально изменяющегося тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ равно $\dot{I} e^{j\omega t}$, где $\dot{I} = I_m e^{j\psi_i} / \sqrt{2}$. Изображение напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ равно $\dot{U} e^{j\omega t}$, где $\dot{U} = U_m e^{j\psi_u} / \sqrt{2}$.

Комплексы $\dot{I}$ и $\dot{U}$ являются функциями расстояния x , но не являются функциями времени, множитель $e^{j\omega t}$ есть функция времени и не зависит от x . Представление изображений тока и напряжения в виде произведения двух множителей, один из которых зависит только от x , а второй – только от t , даёт возможность перейти от уравнений в частных производных к уравнениям в простых производных. Действительно,

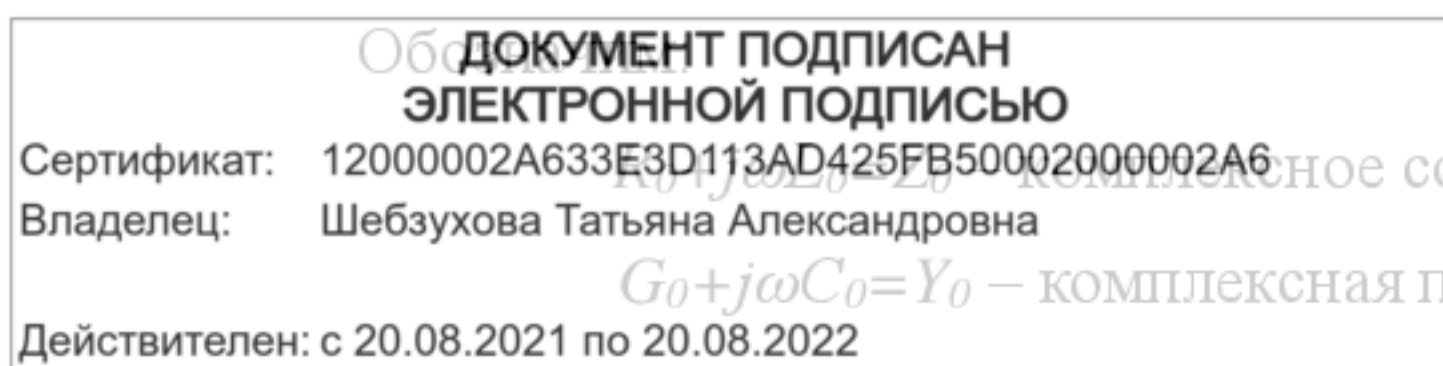
$$\frac{du}{dx} = e^{j\omega t} d\dot{U}/dx, \quad L_0 \frac{di}{dt} = L_0 \dot{I} d(e^{j\omega t})/dt = j\omega L_0 \dot{I} e^{j\omega t};$$

$$\frac{di}{dx} = e^{j\omega t} d\dot{I}/dx, \quad C_0 \frac{du}{dt} = j\omega C_0 \dot{U} e^{j\omega t}.$$

Подставим полученные значения частных производных в уравнения (14.1), (14.2) и сократим уравнения на множитель $e^{j\omega t}$:

$$-d\dot{U}/dx = (R_0 + j\omega L_0) \dot{I};$$

$$-d\dot{I}/dx = (G_0 + j\omega C_0) \dot{U}.$$



$R_0 + j\omega L_0 = Z_0$ – комплексное сопротивление единицы длины линии,
 $G_0 + j\omega C_0 = Y_0$ – комплексная проводимость единицы длины линии.

С учётом этих обозначений система двух последних уравнений примет вид:

$$-d\dot{U}/dx = Z_0 \dot{I} \quad (14.3)$$

$$-d\dot{I}/dx = Y_0 \dot{U}. \quad (14.4)$$

Решим полученную систему уравнений относительно $\dot{U}$, для этого продифференцируем (14.3) по x :

$$-d^2 \dot{U}/dx^2 = Z_0 d\dot{I}/dx,$$

и в полученное уравнение подставим $d\dot{I}/dx$ из (14.4). Получим:

$$d^2 \dot{U}/dx^2 = Z_0 Y_0 \dot{U} \quad (14.5)$$

Уравнение (14.5) представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка, его решение имеет вид:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\gamma x} + \dot{A}_2 e^{-\gamma x} \quad (14.6)$$

Комплексные числа $\dot{A}_1$ и $\dot{A}_2$ – постоянные интегрирования, значение которых определяется напряжением и током в начале или в конце линии. Коэффициент

$$\gamma = \sqrt{(Z_0 Y_0)} \quad (14.7)$$

называют *постоянной распространения*, γ – комплексное число:

$$\gamma = \beta + j\alpha,$$

где β – *коэффициент затухания*, определяющий степень затухания падающей волны на единицу длины линии, α – *коэффициент фазы*, определяющий изменение фазы падающей волны на единицу длины линии.

Ток $\dot{I}$ найдём из уравнения (14.3):

$$\dot{I} = -(1/Z_0)(d\dot{U}/dx) = \gamma(\dot{A}_2 e^{-\gamma x} - \dot{A}_1 e^{\gamma x})/Z_0.$$

Величина $Z_0/\gamma = Z_0/\sqrt{(Z_0 Y_0)} = \sqrt{(Z_0/Y_0)}$ имеет размерность сопротивления, её обозначают Z_B и называют *волновым сопротивлением*:

$$Z_B = \sqrt{(Z_0/Y_0)} = \sqrt{[(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)]} = z_B e^{j\varphi_B} \quad (14.8),$$

где z_B – модуль, а φ_B – аргумент волнового сопротивления. Таким образом,

$$\dot{I} = (\dot{A}_2/Z_B) e^{-\gamma x} - (\dot{A}_1/Z_B) e^{\gamma x} \quad (14.9).$$

В начале линии $x=0$, напряжение и ток обозначим $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$. Подставив эти значения в (14.6) и (14.9), найдём постоянные интегрирования:

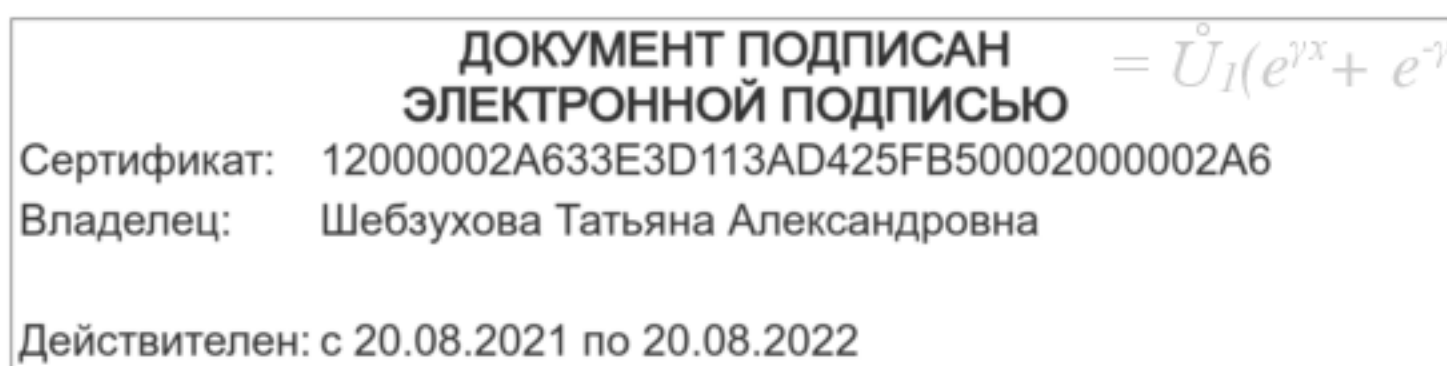
$$\dot{A}_1 = (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_B)/2 = A_1 e^{j\psi_o}, \quad \dot{A}_2 = (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B)/2 = A_2 e^{j\psi_n},$$

где ψ_o и ψ_n – фазы отражённой и падающей волн.

Подставим значения постоянных интегрирования в (14.6) и (14.9):

$$\dot{U} = (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_B) e^{\gamma x}/2 + (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B) e^{-\gamma x}/2 =$$

$$= \dot{U}_1 (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2 - \dot{I}_1 Z_B (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2.$$



В полученном выражении $(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2 = \text{ch} \gamma x$, $(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2 = \text{sh} \gamma x$ – гиперболические косинус и синус. Таким образом, напряжение вдоль линии изменяется в соответствии с выражением:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \text{ch} \gamma x - \dot{I}_1 Z_B \text{sh} \gamma x \quad (14.10).$$

Аналогично получим выражение для тока:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \text{ch} \gamma x - (\dot{U}_1 / Z_B) \text{sh} \gamma x \quad (14.11).$$

Формулы для определения комплексов напряжения и тока можно получить, используя комплексы напряжения $\dot{U}_2$ и тока $\dot{I}_2$ в конце линии:

$$\dot{A}_1 = (\dot{U}_2 - \dot{I}_2 Z_B) e^{-\gamma \ell} / 2 = A_1 e^{j\psi_0} \quad (14.12)$$

$$\dot{A}_2 = (\dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_B) e^{\gamma \ell} / 2 = A_2 e^{j\psi_n} \quad (14.13)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \text{ch} \gamma y + \dot{I}_2 Z_B \text{sh} \gamma y \quad (14.14)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \text{ch} \gamma y + (\dot{U}_2 / Z_B) \text{sh} \gamma y \quad (14.15)$$

где $y = \ell - x$ – расстояние от конца линии до точки, в которой определяются комплексы напряжения и тока.

Для перехода от комплексов напряжения и тока к функциям времени формулы (14.6) и (14.9) преобразуем следующим образом:

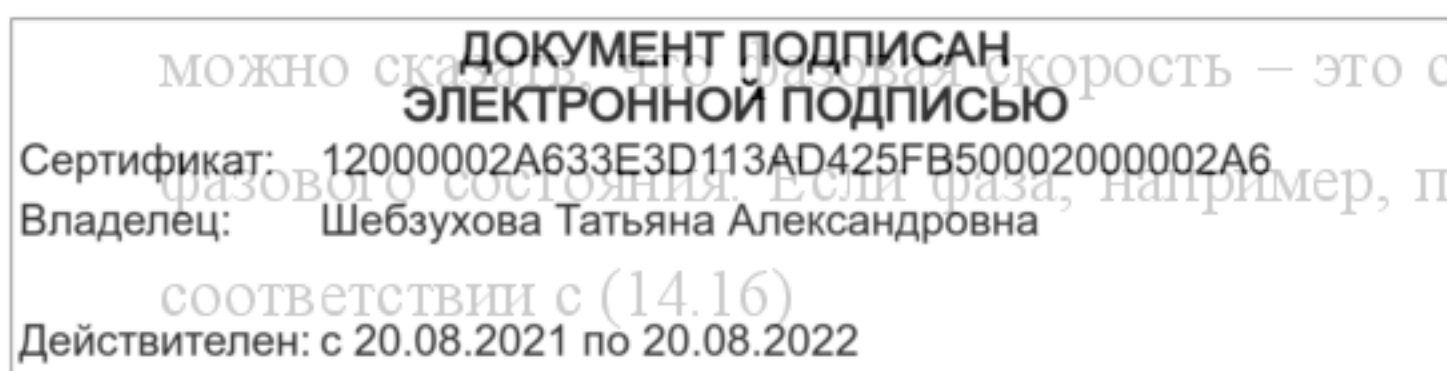
- подставим $\dot{A}_1 = A_1 e^{j\psi_0}$, $\dot{A}_2 = A_2 e^{j\psi_n}$, $Z_B = Z_B e^{j\varphi_B}$,
- заменим $\gamma = \beta + j\alpha$,
- умножим правые части на $\sqrt{2}e^{j\omega t}$ и от произведений возьмём мнимую часть:

$$u = A_1 \sqrt{2} e^{\beta x} \sin(\omega t + \psi_0 + \alpha x) + A_2 \sqrt{2} e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x) \quad (14.16)$$

$$i = -(A_1 \sqrt{2} / Z_B) e^{\beta x} \sin(\omega t + \psi_0 + \alpha x - \varphi_B) + (A_2 \sqrt{2} / Z_B) e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x - \varphi_B) \quad (14.17)$$

Из полученных выражений видно, что напряжение и ток могут быть представлены в виде двух периодически изменяющихся слагаемых. Фазы вторых из них с течением времени остаются постоянными с увеличением расстояния от начала линии, т.е. эти слагаемые представляет собой волны, перемещающиеся от начала к концу линии. Эти волны принято называть падающими, их амплитуда с увеличением x уменьшается по экспоненте. Фазы первых слагаемых с течением времени остаются постоянными с уменьшением расстояния x , эти волны напряжения и тока называют отражёнными, их амплитуда увеличивается по экспоненте от начала линии к её концу (иначе – уменьшается от конца к началу). Физически уменьшение амплитуд при продвижении волн от начала к концу и от конца к началу линии объясняется наличием в линии активных потерь.

Скорость перемещения волны вдоль линии называют фазовой скоростью v_ϕ . Иначе



$$\omega t + \psi_n - \alpha x = \text{const.}$$

Возьмём производную по времени от обеих частей последнего равенства:

$$\omega - \alpha(dx/dt) = 0, \text{ отсюда с учётом того, что } \alpha = \omega\sqrt{L_0 C_0}$$

$$v_\phi = dx/dt = \omega/\alpha = 1/\sqrt{L_0 C_0} \quad (14.18)$$

Таким образом, фазовая скорость определяется параметрами линии и не зависит от частоты. Фазовая скорость, частота $f = \omega/(2\pi)$ и длина волны λ связаны соотношением:

$$\lambda = v_\phi / f \quad (14.19)$$

В ряде случаев R_0 и G_0 значительно меньше L_0 и C_0 . В этих случаях активными потерями можно пренебречь, тогда

$$Z_0 = j\omega L_0, Y_0 = j\omega C_0, \gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} = j\omega\sqrt{L_0 C_0}, \text{ т.е.}$$

$$\beta = 0, \alpha = \omega\sqrt{L_0 C_0}, Z_B = \sqrt{Z_0/Y_0} = \sqrt{L_0/C_0} - \text{волновое сопротивление}$$

вещественное, т.е. является чисто активным. При пренебрежении активными сопротивлением и проводимостью в выражениях (14.10) и (14.11), а также (14.14) и (14.15) под знаками гиперболических функций аргумент становится чисто мнимым, но т.к. $chj\alpha y = \cos\alpha y$ и $shj\alpha y = j\sin\alpha y$, то последние выражения принимают вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \cos \alpha x - j\dot{I}_1 Z_B \sin \alpha x \quad (14.20)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \cos \alpha x - j(\dot{U}_1/Z_B) \sin \alpha x \quad (14.21)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos \alpha y + j\dot{I}_2 Z_B \sin \alpha y \quad (14.22)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \cos \alpha y + j(\dot{U}_2/Z_B) \sin \alpha y \quad (14.23)$$

Последние выражения справедливы для *линии без потерь*.

Линия с распределёнными параметрами может находиться в трёх режимах:

- в *согласованном* режиме,
- в режиме *стоячих волн*,
- в режиме *смешанных волн*.

Согласованный режим имеет место тогда, когда сопротивление нагрузки Z_H , подключённой в конце линии, равно волновому сопротивлению Z_B .

В этом случае $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_H = \dot{I}_2 Z_B$ и согласно (14.12) $\dot{A}_1 = 0$, т.е. отраженные волны напряжения и тока при $Z_H = Z_B$ отсутствуют и

$$u = A_2 \sqrt{2} e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x) \quad (14.24)$$

$$i = (A_2 \sqrt{2}/Z_B) e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x - \phi_B) \quad (14.25)$$

Нагрузку, имеющую такое сопротивление, называют *согласованной*.

Для *линии без потерь* при *согласованной нагрузке*

$$\text{ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ} \quad u = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \alpha x) \quad (14.26)$$

$$\text{Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6} \quad i = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \alpha x) \quad (14.27)$$

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Из последних выражений следует, что при согласованном режиме работы линии без потерь возникают только бегущие волны напряжения и тока, вся энергия, передаваемая от генератора к приёмнику, расходуется в приёмнике. В любой точке линии и ток, и напряжение изменяются синусоидально с одинаковыми амплитудами, совпадая по фазе. Действующие значения тока и напряжения вдоль линии остаются постоянными, меняется только их фаза. Отношение напряжения к току в любой точке линии равно полному сопротивлению, следовательно $Z_{BX}=Z_B=Z_H=R_H$.

Режим стоячих волн возникает в трёх случаях: при отсутствии нагрузки в конце линии (режим *холостого хода*, когда $Z_H=\infty$), при коротком замыкании в конце линии (режим *короткого замыкания*, когда $Z_H=0$) и при чисто реактивной нагрузке ($Z_H=jX$). Стоячие волны возникают в результате наложения прямой и отражённой волн. При стоячих волнах в одних точках линии напряжение или ток в любой момент времени равны нулю (эти точки называют узлами), в других точках, отстоящих на четверть волны от первых, напряжение или ток изменяются с максимальной амплитудой (эти точки называют пучностями). Математически стоячая волна напряжения и стоячая волна тока описываются произведением двух тригонометрических функций, одна из которых – функция времени, вторая – функция координаты x или y – расстояния от начала или конца линии.

Найдём уравнения стоячих волн напряжения и тока в линии без потерь при отсутствии нагрузки на её конце, т.е. когда $\dot{I}_2=0$. В этом случае (14.22) и (14.23) примут вид:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_2 \cos \alpha y, \\ \dot{I} &= j(\dot{U}_2 / Z_B) \sin \alpha y.\end{aligned}$$

Для перехода от комплексов $\dot{U}$ и $\dot{I}$ к функциям времени необходимо правые части последних выражений домножить на $\sqrt{2}e^{j\omega t}$ и выделить мнимые части, которые и будут напряжением и током, как функциями и расстояния, и времени:

$$u = \sqrt{2}U_2 \cos \alpha y \sin \omega t \quad (14.28)$$

$$i = \sqrt{2}(U_2 / Z_B) \sin \alpha y \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (14.29)$$

В точках линии, где $\alpha y = n\pi + \pi/2$, амплитуда напряжения $\sqrt{2}U_2 \cos \alpha y = 0$, т.е. в этих точках имеют место узлы напряжения. В этих же точках амплитуда тока имеет максимум $\sqrt{2}(U_2 / Z_B)$, т.е. в этих точках будут пучности тока. В точках линии, где $\alpha y = n\pi$, имеют место пучности напряжения и узлы тока.

Входное сопротивление линии без потерь при холостом ходе

$$Z_{BXxx} = \dot{U} / \dot{I} = -j Z_B \operatorname{ctg} \alpha y = -j Z_B \operatorname{ctg}(2\pi/\lambda)y \quad (14.30)$$

при длине линии $y = (2n+1)\lambda/4$, где $n=1,3,5,\dots$, $Z_{BXxx}=0$,
при длине линии $y = n\lambda/2$, где $n=1,2,3,\dots$, $Z_{BXxx}=\infty$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

При длине линии $0 < y < \lambda/4$ входное сопротивление разомкнутой линии имеет ёмкостный характер, при длине $\lambda/4 < y < \lambda/2$ – индуктивный характер.

Стоячие волны образуются также при коротком замыкании в конце линии.

В этом случае $\dot{U}_2=0$, вследствие чего уравнения (14.22) и (14.23) имеют вид:

$$\dot{U} = j\dot{I}_2 Z_B \sin \alpha y,$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \cos \alpha y.$$

Переходя к функциям времени, получим:

$$u = \sqrt{2} I_2 Z_B \sin \alpha y \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (14.31)$$

$$i = \sqrt{2} I_2 \cos \alpha y \sin \omega t \quad (14.32)$$

Из полученных зависимостей следует, что картина стоячей волны напряжения при коротком замыкании повторяет картину стоячей волны при холостом ходе, а картина стоячей волны тока при коротком замыкании – картину стоячей волны напряжения при холостом ходе.

Входное сопротивление короткозамкнутой линии без потерь

$$Z_{BX_{\kappa 3}} = jZ_B \operatorname{tg}(\alpha y) = jZ_B \operatorname{tg}(2\pi/\lambda)y \quad (14.33)$$

при длине линии $y = (n\lambda)/4$, где $n=1,3,5,\dots$, $Z_{BX_{\kappa 3}} = \infty$,

при длине линии $y = (n\lambda)/2$, где $n=1,2,3,\dots$, $Z_{BX_{\kappa 3}} = 0$.

При длине линии $0 < y < \lambda/4$ входное сопротивление разомкнутой линии имеет индуктивный характер, при длине $\lambda/4 < y < \lambda/2$ – ёмкостный характер.

Рассмотренные свойства четвертьволновых и полуволновых отрезков длинных линий используют в радиотехнических устройствах для получения колебательных контуров с высокой добротностью.

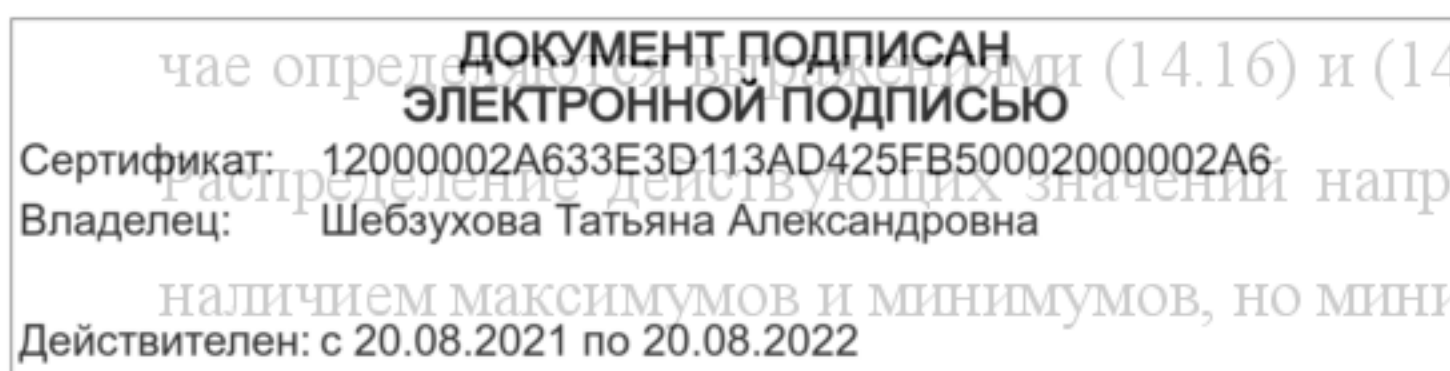
Таким образом, режим стоячих волн имеет следующие особенности:

- напряжение и ток в любой точке линии сдвинуты по фазе на угол $\pi/2$;
- расхода энергии в этом режиме нет, т.к. падающая волна полностью отражается от конца линии;
- действующие значения напряжения и тока меняются вдоль линии по синусоидальному закону, достигая максимальных значений (пучностей) и нулевых значений (узлов) через четверть волны в результате наложения падающей и отражённой волн.

Режим смешанных волн в линии без потерь возникает, если линия замкнута на сопротивление, отличное от волнового. В этом режиме существуют одновременно и бегущая, стоячая волны. Мгновенные значения напряжения и тока в любой точке линии в этом слу-

чае определяются выражениями (14.16) и (14.17) (напомним, что в линии без потерь $\beta=0$).

Распределение действующих значений напряжения и тока вдоль линии характеризуется наличием максимумов и минимумов, но минимумы не принимают нулевых значений. Если



$Z_B > R_H$ (так же, как и при $Z_B = R_H$), то к концу линии устанавливается минимум напряжения и максимум тока. Если сопротивление нагрузки комплексное, то экстремальные значения напряжения и тока сдвигаются относительно конца линии. Если $Z_H < R_H$, то в конце линии устанавливается максимум напряжения и минимум тока.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

В данной лабораторной работе необходимо провести испытания линии с распределенными параметрами, состоящей из отрезка коаксиального кабеля. Линию необходимо испытать в согласованном режиме, в режиме стоячих волн при холостом ходе и при коротком замыкании и в режиме смешанных волн при $R_H < Z_B$ и $R_H > Z_B$. Синусоидальное напряжение на начало кабеля подаётся от высокочастотного генератора. Для измерения действующего значения напряжения, которое производится с помощью вольтметра, на кабеле через равные промежутки имеются контактные выводы.

Порядок выполнения работы следующий.

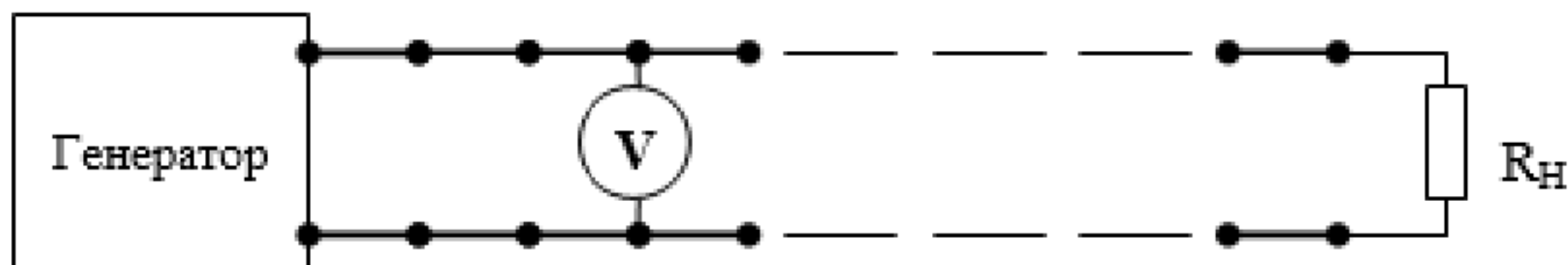
Изучить основные теоретические положения.

Собрать лабораторную установку, схема которой изображена на рис. 14.2.

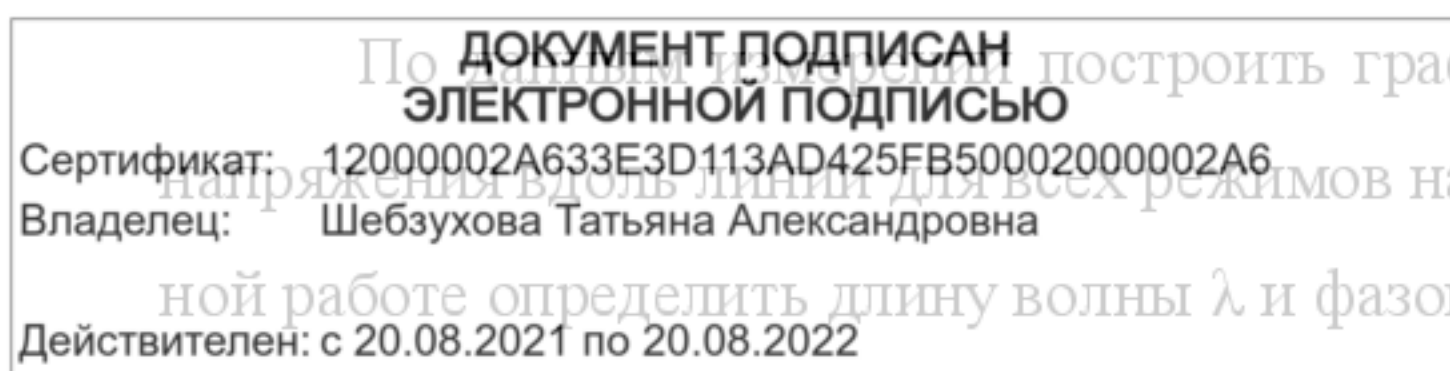
Подключив $R_H = Z_B$, исследовать распределение напряжения вдоль линии. Результаты замеров занести в таблицу 14.2.

Исследовать распределение напряжения вдоль разомкнутого на конце кабеля.

Исследовать распределение напряжения вдоль кабеля, замкнутого на конце на коротко.



Исследовать распределение напряжения в режиме смешанных волн при $R_H > Z_B$ и $R_H < Z_B$. При каждом включении линии на её входе следует устанавливать одно и тоже напряжение 0.5 В. Частота напряжения для всех режимов задаётся преподавателем.



Построить графики распределения действующего значения напряжения вдоль линии для всех режимов нагрузки. При подготовке отчёта по лабораторной работе определить длину волны λ и фазовую скорость v_ϕ .

Таблица

Номер Контакта	Напряжение, В				
	$R_H = Z_B$	$R_H = 0$	$R_H = \infty$	$R_H > Z_B$	$R_H < Z_B$
0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
1					
...					
24					

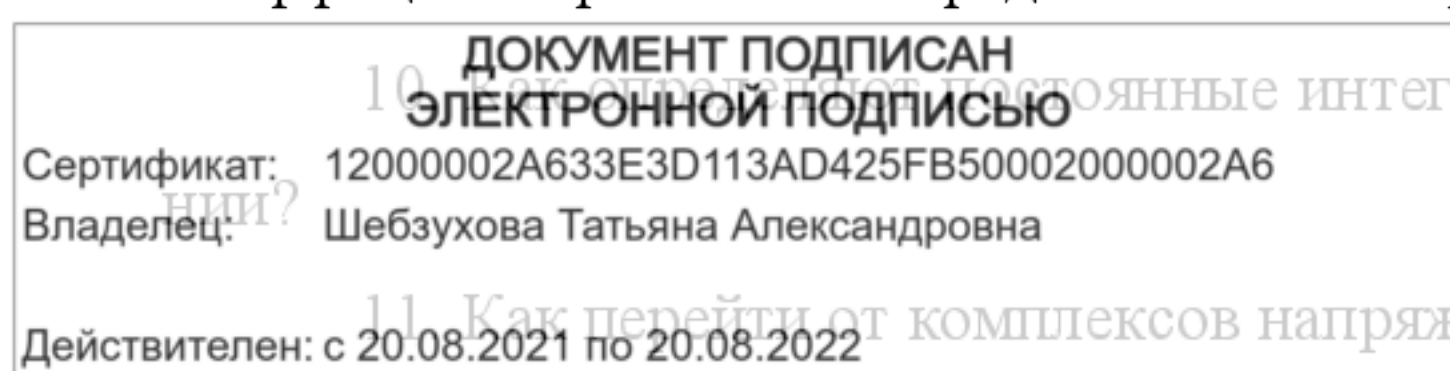
Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Какие линии относят к линиям с распределёнными параметрами?
2. Перечислите электрические параметры длинной линии. Их размерность?
3. Справедливо ли для параметров длинной линии соотношение $Z_0 = 1/G_0$?
4. Функциями каких переменных являются напряжение и ток в линии с распределёнными параметрами?
5. Чем определяются значения параметров длинной линии?
6. Как получить основные уравнения длинной линии?
7. Каким образом при решении уравнений длинной линии переходят от уравнений в частных производных к уравнениям в простых производных?
8. Как относительно комплексов напряжения и тока выглядит общий вид решения уравнений длинной линии?
9. Что представляют собой постоянная распространения, коэффициент затухания, коэффициент фазы? Что определяют эти коэффициенты?



10. Как перейти от постоянных интегральных уравнений к дифференциальным уравнениям?

11. Как перейти от комплексов напряжения и тока к функциям времени?

12. Объясните, почему в общем случае напряжение и ток в длинной линии можно представить как сумму падающей и отражённой волн?

13. Что понимают под фазовой скоростью? Как она связана с частотой напряжения и длиной волны?

14. Какую линию называют линией без потерь?

15. Какие режимы могут существовать в длинной линии? Охарактеризуйте эти режимы. Чем они определяются?

16. Каким может быть и чем определяется входное сопротивление длинной линии? Что понимают под волновым сопротивлением линии?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №17. Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе

Цель работы: Получение картины силовых линий, моделируемых плоскопараллельным электромагнитным и электростатическим полем на токопроводящем листе и определение его напряженности или индуктивности в отдельных точках.

Основы теории:

Известно, что электростатическое поле в области, где нет свободных зарядов, а также постоянное магнитное поле в области, где нет токов, описывается такими же уравнениями, как и поле постоянного тока в проводящей среде вне источников энергии, в частности, уравнением Лапласа:

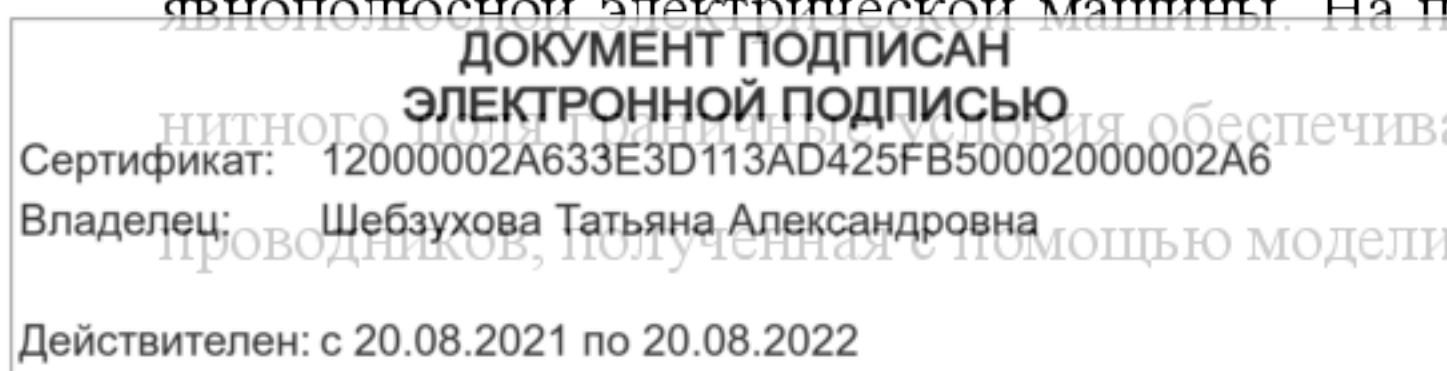
$$\nabla^2 \varphi = 0.$$

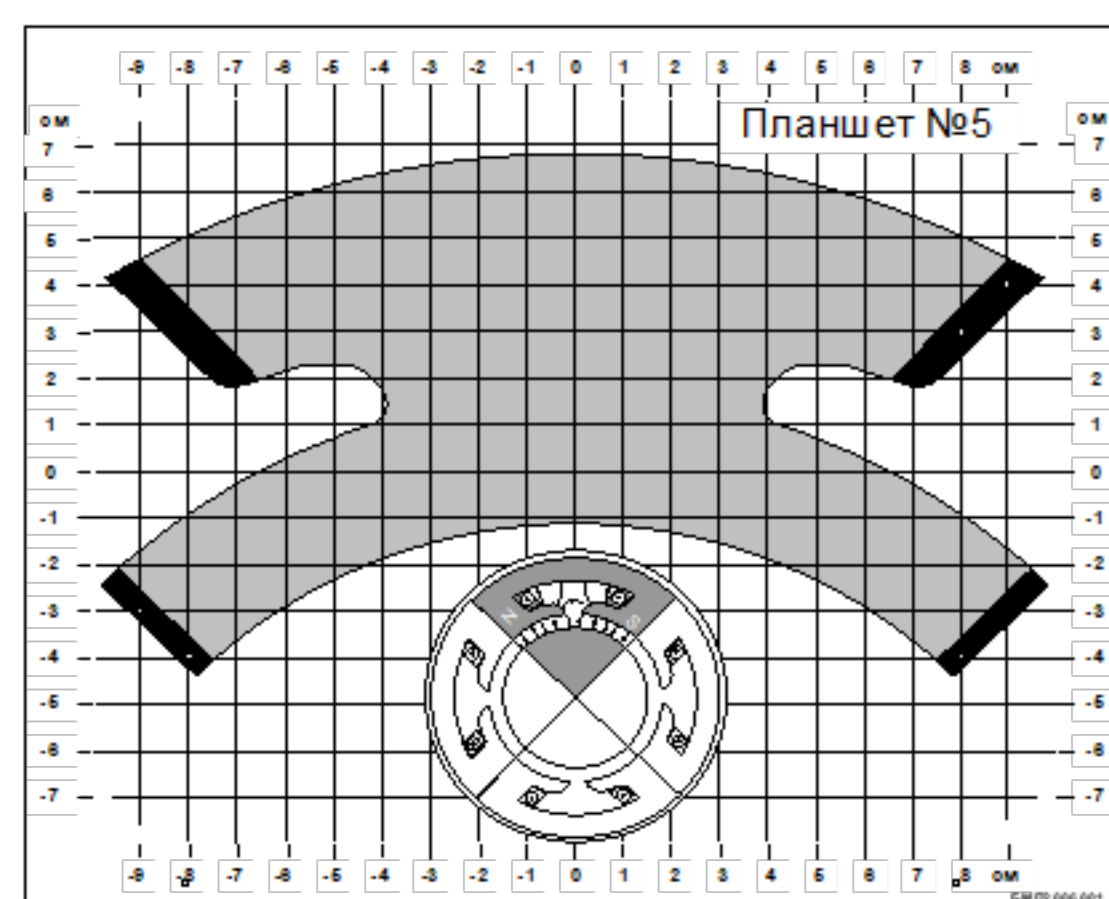
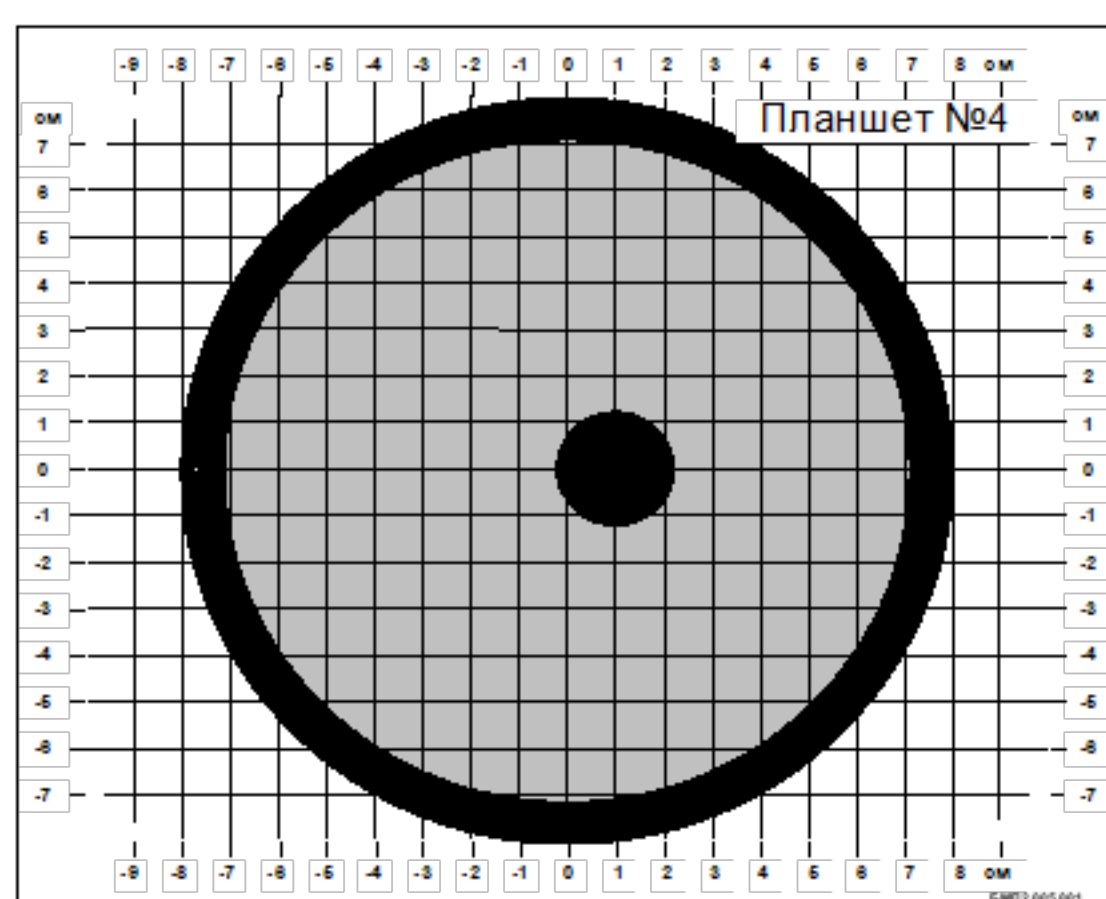
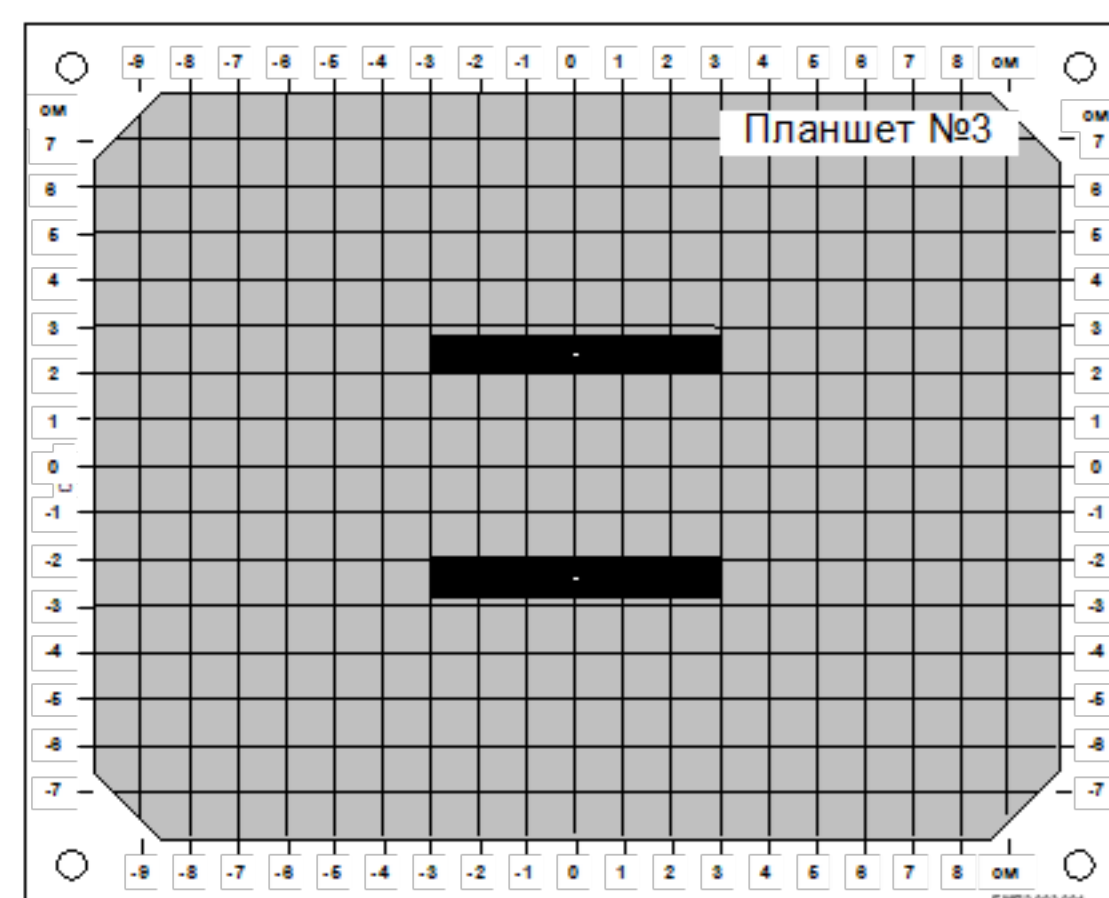
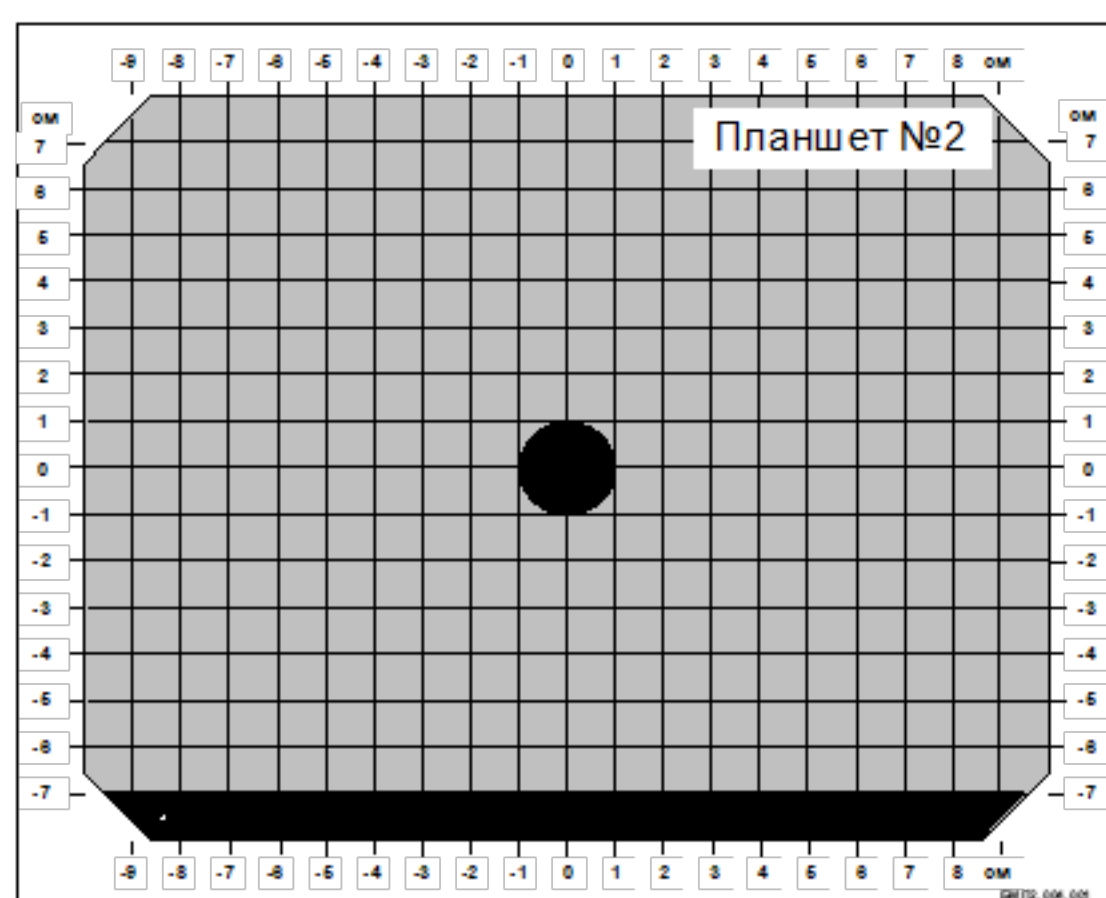
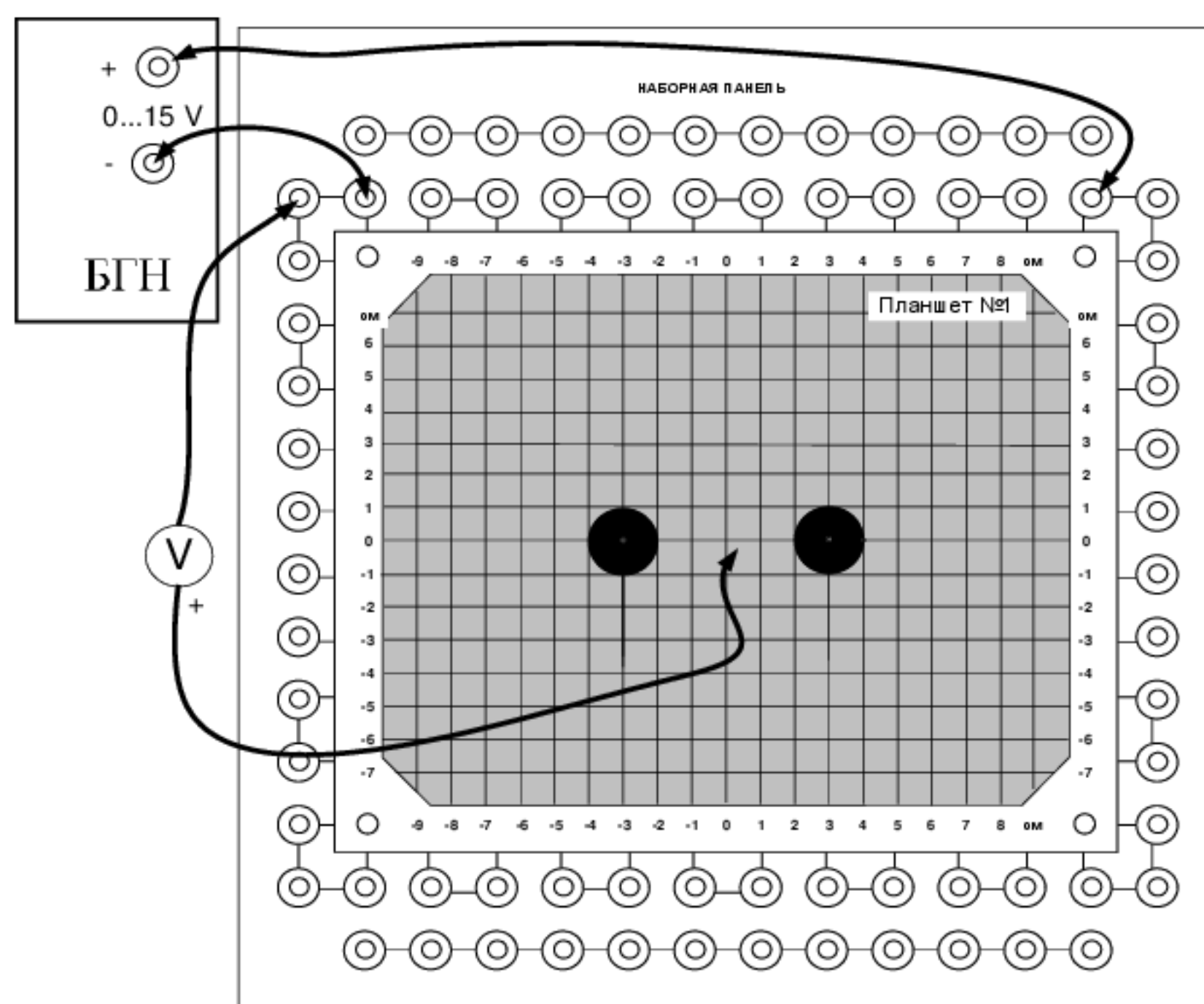
Поскольку уравнение Лапласа имеет единственное решение при заданных граничных условиях, то при подобных граничных условиях в диэлектрике и в проводящей среде распределение потенциала будет одинаковым в обеих средах. Это подобие позволяет моделировать как электростатические, так и магнитные поля полем электрического тока в проводящей среде. Соблюдение подобных граничных условий сводится к геометрическому подобию областей, в которых исследуется поле.

Плоский проводящий лист позволяет моделировать распределение электрического потенциала или магнитных силовых линий в сечении плоскопараллельного поля, перпендикулярном длинным заряженным проводникам или проводникам с током. Эквипотенциальные линии в проводящем листе соответствуют эквипотенциальным линиям в электростатическом поле между заряженными проводниками. При моделировании магнитного поля эквипотенциальные линии в проводящем листе соответствуют магнитным силовым линиям при протекании тока в проводниках. Собранный установка для моделирования с одним из планшетов показана на рис. 1.1. Остальные четыре планшета – на рис. 1.2.

Планшеты №№ 1, 2, 3, 4 используются для моделирования электростатических полей заряженных длинных проводов соответствующих сечений. Планшет №1 и, в меньшей степени, №3 и №4 пригодны также и для моделирования магнитного поля двухпроводной линии с током. На планшете №5 моделируется магнитное поле между полюсами и в зазоре явнополюсной электрической машины. На планшетах №3 и №4 при моделировании маг-

нитного поля магнитных полюсов обеспечиваются неточно, поэтому картина поля вблизи проводников, полученная с помощью модели, несколько отличается от реальной.





Указание по технике безопасности:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены