

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

Я. О. Шабловский

**МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2017

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211я73
Ш13

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 9 от 30.05.2016 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *Ю. А. Рудченко*

Шабловский, Я. О.
Ш13 Метрология, стандартизация и информационно-измерительная техника : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. и заоч. форм обучения / Я. О. Шабловский. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2017. – 50 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.
ISBN 978-985-535-340-0.

Содержит методические рекомендации по подготовке, выполнению, оформлению и защите восьми лабораторных работ.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211я73

ISBN 978-985-535-340-0

© Шабловский Я. О., 2017
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий практикум подготовлен в соответствии с учебной программой курса «Метрология, стандартизация и информационно-измерительная техника» для специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» применительно к учебным лабораториям кафедры ТОЭ ГГТУ им. П. О. Сухого. Практикум содержит 8 лабораторных работ.

Выполнение лабораторных работ предусмотрено на универсальных учебно-исследовательских лабораторных стендах (УИИС-1), оборудованных современными средствами электрических измерений и соответствующим набором пассивных элементов (резисторов, катушек индуктивности, конденсаторов и т. д.).

Использование стендов УИИС-1 в сочетании с методическим обеспечением позволяет осуществить фронтальное проведение лабораторных работ непосредственно после изучения конкретной темы на лекциях и (или) практических занятиях. При этом благодаря регулируемым активным и пассивным элементам, каждая бригада студентов (2–3 человека) выполняет свой вариант лабораторной работы.

Все опыты проводятся при пониженном напряжении (не выше 24 В) и токах нагрузки не более 200 мА. Это обеспечивает безопасность работы на стендах, а также позволяет снизить потребление электроэнергии.

Ниже приводятся методические указания по проведению лабораторных работ по электрическим измерениям.

Выполнение каждой лабораторной работы предполагается *в два этапа*. Первый этап (подготовительный) выполняется заранее. На этом этапе студент обязан:

1) изучить теоретический материал по учебнику, конспекту лекций либо примерам, рассмотренным на практических занятиях;

2) уяснить цель и содержание работы;

3) подготовить *протокол исследований*, в котором для каждого пункта рабочего задания привести:

– *схемы проведения эксперимента* с необходимыми измерительными приборами;

– *таблицы* для записи показаний приборов и вычисленных по ним величин;

– *расчетные формулы*.

Протокол исследований выполняется в рабочей тетради каждым студентом отдельно (независимо от числа студентов в бригаде)

и представляется преподавателю перед выполнением экспериментальной части работы.

Без подготовленного протокола исследований студент к выполнению экспериментальной части работы не допускается.

Второй этап работы (экспериментальная часть и анализ результатов) выполняется непосредственно на рабочем месте в учебной лаборатории во время занятий по расписанию. При проведении экспериментов следует соблюдать правила техники безопасности и правила работы в электроустановках.

Получив разрешение преподавателя на выполнение экспериментальной части, бригада студентов (2–3 человека) выполняет сборку исследуемой цепи и проводит измерения физических величин согласно заданию.

Результаты измерений обрабатываются и заносятся в соответствующие таблицы протокола. Все записи делаются ручкой четко и аккуратно. Если в процессе измерений допущены ошибки, неправильные результаты, занесенные в протокол, зачеркиваются и записываются новые значения.

По окончании каждой части работы, до разборки цепи, необходимо оценить правильность полученных результатов и представить преподавателю для проверки соответствующую таблицу, а по окончании всей работы – протокол для визирования и отметки в групповом журнале.

ОЗНАКОМИТЕЛЬНОЕ ЗАНЯТИЕ

Основными элементами ознакомительного занятия являются:

1. Инструктаж студентов по правилам техники безопасности (проводит преподаватель). К проведению лабораторных работ допускаются студенты, знающие правила техники безопасности и расписавшиеся в специальном кафедральном журнале.

2. Знакомство с правилами внутреннего распорядка в лабораториях кафедры ТОЭ. При этом подгруппа (группа) делится на бригады (по 2–3 человека), каждой из которых присваивается порядковый номер. В соответствии с ним за бригадой закрепляется стенд на весь период работы в лаборатории.

3. Знакомство с устройством и основными блоками учебноисследовательского лабораторного стенда УИЛС-I. Преподаватель сообщает студентам сведения о составных частях стенда, используемых в данном семестре.

Стенд УИЛС-I ориентирован на студентов, начинающих изучение электротехники. В основу его конструкции положен принцип физического моделирования электрических цепей. К отличительным особенностям стенда относятся *простота* обращения с его блоками и элементами, *наглядность* при сборке электрических цепей и соответствующая легкость контроля, *прямой контакт* студента с реальными элементами, *безопасность* работы на стенде, ограниченный набор измерительных приборов для выполнения лабораторного практикума.

Стенд включает в себя *пульт*, *наборное поле*, *набор элементов* и соединительных *проводов*, а также лабораторный *стол*.

Пульт состоит из блоков источников напряжений, наборного поля и блоков регулируемых пассивных элементов. Источники напряжений расположены в левой части пульта в трех находящихся один под другим съемных блоках.

Наборное поле, расположенное в центре стенда, представляет собой панель с 67-ю парами гнезд, предназначенных для подключения элементов исследуемых электрических цепей. Гнезда соединены между собой, образуя узлы.

Такая конструкция наборного поля позволяет быстро собрать, используя заданные элементы и соединительные перемычки, исследуемую электрическую цепь, внешний вид которой аналогичен схеме замещения. Такая наглядность при сборке цепей играет исключительно важную роль, особенно на начальной стадии изучения электротехники.

Блок переменного сопротивления (БПС) расположен справа от наборного поля в верхней части. Он позволяет регулировать свое сопротивление в диапазоне 1–999 Ом со ступенью регулирования 1 Ом.

Пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивные катушки, диоды, лампочки и др.) находятся в небольших пластмассовых прозрачных корпусах, которые расположены в специальном ящике для элементов. Каждый элемент имеет два штекера, с помощью которых он может быть установлен на наборном поле.

Перемычки (10 шт.) используются для соединения гнезд одной пары. Кроме того, включение перемычек в разные ветви позволяет измерить токи в этих ветвях одним и тем же амперметром, не разрывая отдельные участки цепи. Для этого амперметр подключают параллельно к каждой из них, убирают перемычку, измеряют соответствующий ток и возвращают перемычку на прежнее место.

Набор соединительных проводов предназначен для подключения к наборному полю источников энергии, пассивных элементов, электроизмерительных приборов и т. п.

Для выполнения расчетно-лабораторных работ (РЛР) по разделу «Линейные электрические цепи постоянного тока» используется **блок постоянных напряжений**. Он содержит:

- источник стабилизированного напряжения ИР, регулируемого в пределах 1–24 В;
- источник нерегулируемого напряжения ИН ($U_{н.н} \approx 20$ В).

Оба источника снабжены электронной защитой, отключающей их при превышении током нагрузки значения 200 мА. Источники напряжения расположены в верхнем съемном блоке слева от наборного поля.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ В УЧЕБНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ КАФЕДРЫ «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

Лабораторные стенды УИЛС-1 являются действующими электроустановками и при определенных условиях могут стать источником опасности поражения электрическим током. Тело человека обладает электропроводностью и при соприкосновении с токоведущими частями установки, находящейся под напряжением, становится звеном электрической цепи. Возникающий в теле человека электрический ток может вызвать электрическую травму (ожог кожи и т. п.) или нанести тяжелые поражения нервной, сердечной и дыхательной системам организма (электрический удар).

Поэтому при работе в лаборатории необходимо всегда помнить о возможности поражения электрическим током, быть предельно собранным, внимательным и строго выполнять следующие правила.

1. Перед началом работы следует убедиться в целостности и исправности блоков и элементов наборного поля, соединительных проводов и перемычек. Пользоваться неисправными элементами, а также оголенными проводами без штырей *запрещается*.

2. *Сборку* электрической цепи необходимо *производить* только *при отключенных источниках питания*. При этом должна быть обеспечена достаточная плотность контактов во всех разъемных соединениях.

3. Напряжение к стендам *подается преподавателем*.

4. Перед включением источника питания необходимо его регулятор вывести в нулевое положение, а на регулируемых элементах (резисторах, конденсаторах, катушках индуктивности) установить заданные значения параметров. Переключатели пределов измерительных приборов установить на значения, превышающие ожидаемые величины.

5. Включение питания можно *производить только с разрешения преподавателя* (или мастера производственного обучения) после проверки правильности сборки.

6. Любые изменения в цепи можно *производить только при отключенном питании*. Повторное включение напряжения *производится только с разрешения преподавателя*.

7. При обнаружении неисправностей, могущих вызвать поражение электрическим током или порчу оборудования, следует *немедленно*

но отключить источник питания и поставить об этом в известность преподавателя (или мастера производственного обучения).

К работе в лаборатории студенты допускаются только после инструктажа по технике безопасности (дата проведения инструктажа фиксируется преподавателем в специальном кафедральном журнале).

Ответственность за соблюдение правил техники безопасности возлагается на студентов, работающих в лаборатории. Контроль за выполнением правил техники безопасности ведется преподавателями и сотрудниками кафедры, участвующими в проведении лабораторных занятий.

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОСТЕЙШЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: приобретение первичных навыков осуществления электрических измерений.

1. Вводные теоретические положения

1. При измерении силы тока на какой-либо ветви измерительный прибор (амперметр) включается в разрыв этой ветви.

2. При измерении напряжения на каком-либо участке цепи измерительный прибор (вольтметр) подключают параллельно измеряемому участку.

3. Электроизмерительные приборы часто бывают комбинированные (например, вольтамперметр). Еще чаще электроизмерительные приборы бывают многопредельными. Вообще всякий измерительный прибор имеет определенный предел измерений – наибольшее значение измеряемой величины, на которое он рассчитан. У многопредельных приборов предусмотрена возможность выбора предела измерений.

4. Выбор предела измерений определяет цену деления прибора:

$$[\text{цена деления}] = \frac{[\text{предел измерения}]}{[\text{предел шкалы}]} \quad (1.1)$$

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник регулируемого постоянного напряжения.
2. Пассивные элементы 03, 04, 07, 08, устанавливаемые на наборном поле стенда УИЛС-1.
3. Ампервольтметр Ц4311, мультиметр МУ-68, универсальный вольтметр В7_58/2.

3. Экспериментальная часть

1. Визуально определить пределы измерения напряжения универсального вольтметра В7_58/2 и пределы измерения мультиметра МУ-68. Результаты измерения привести в отчете.

2. Визуально определить для вольтметра Ц4311 количество пределов измерения постоянного тока, пределов измерения постоянного напряжения, пределов измерения переменного тока и пределов измерения переменного напряжения. Результаты привести в отчете.

3. Используя формулу (1.1), рассчитать цену деления шкалы ампервольтметра Ц4311 для пределов измерения, перечисленных в первом столбце табл. 1.1, этого прибора. Результаты занести во второй столбец табл. 1.1.

4. Заполнить остальные столбцы табл. 1.1, определив значения токов и напряжений, соответствующих различным показаниям стрелки при различных пределах измерений ампервольтметра Ц4311.

Таблица 1.1

Предел измерений	Показание стрелки											
	1	2	3	5	10	15	25	30	50	75	100	150
7,5 А												
3 А												
1,5 А												
750 В												
300 В												
150 мА												
75 мВ												
30 В												
15 В												
0,75 В												
0,3 В												

5. По маркировке элементов 03, 04, 07, 08 определить номинальные параметры соответствующих резисторов: сопротивление R_{nk} и мощность рассеяния P_{nk} , где $k = 3, 4, 7, 8$. Рассчитать для каждого резистора номинальный ток I_{nk} и номинальное напряжение U_{nk} по формулам:

$$I_{nk} = \sqrt{\frac{P_{nk}}{R_{nk}}}; \quad U_{nk} = R_{nk} I_{nk}. \quad (1.2)$$

Результаты занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Параметр	Элемент			
	03	04	07	08
P_{nk} , Вт				
R_{nk} , Ом				
I_{nk} , А				
U_{nk} , В				

6. На наборном поле стенда УИЛС собрать цепь по схеме на рис 1.1. При этом в качестве источника питания использовать регулируемый источник постоянного напряжения, а в качестве резистора – элемент 03.

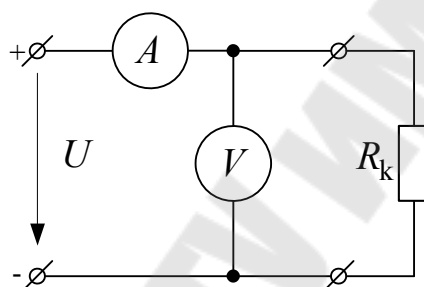


Рис. 1.1

7. Контролируя напряжение с помощью мультиметра или электронного вольтметра, подать на вход цепи напряжение, не превосходящее номинальное напряжение резистора, включенного в цепь. Используя в качестве амперметра прибор Ц4311, определить силу тока в цепи. Полученные значения тока и напряжения занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Параметр	Элемент			
	03	04	07	08
U_k , В				
I_k , А				
R_k , Ом				

8. Последовательно заменяя в цепи на рис. 1.1 элемент 03 элементом 04, затем элементом 07 и 08, произвести измерения напряжения и тока в цепи. Результаты измерений занести в табл. 1.3.

9. На основании результатов проведенных измерений рассчитать сопротивление всех исследованных элементов по формуле

$$R_k = \frac{U_k}{I_k}. \quad (1.3)$$

Результаты расчета занести в табл. 1.3, сравнив полученные расчетные значения сопротивлений резисторов с соответствующими номинальными значениями в табл. 1.2.

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходные данные и схемы замещения исследуемых цепей.
4. Расчетные формулы с подстановками числовых значений.
5. Таблицы с результатами измерений и вычислений.

Лабораторная работа № 2

ПОВЕРКА И ГРАДУИРОВКА ПРИБОРОВ

Цель работы: поверка и градуировка приборов методом сличения с показаниями образцового прибора; определение абсолютной погрешности, поправки, вариации показаний прибора и наибольшей погрешности.

1. Вводные теоретические положения

В теории измерений выделяют абсолютную, относительную, основную и дополнительную погрешности.

Абсолютной погрешностью ΔA показаний называется разность между показаниям прибора A и истинным значением измеряемой величины A_0 :

$$\Delta A = A - A_0. \quad (2.1)$$

В реальных условиях эксперимента истинное значение измеряемой величины заведомо не может быть установлено точно, поэтому на практике за истинное значение измеряемой величины принимают показания образцового прибора. Величина $G_{\text{п}}$, которая должна быть алгебраически прибавлена к показаниям прибора для получения истинного значения измеряемой величины, называется поправкой, т. е. $G_{\text{п}} = -\Delta A$.

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженное в процентах, называется относительной погрешностью:

$$\delta_{\text{п}} = [\pm \Delta A / A_{\text{д}}] \cdot 100 \text{ \%}.$$

Точность прибора характеризуется обозначенным на нем классом точности, соответствие которому устанавливается путем определения основной приведенной погрешности прибора и изменений показаний прибора, вызываемых отклонениями внешних условий от нормальных, т. е. дополнительной погрешностью.

Нормальными условиями работы прибора являются:

- нормальное рабочее положение прибора;
- нормальная температура окружающей среды, за которую для приборов классов точности 0,05–0,5 принимают $(2 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$, а для приборов классов точности 1,0–0,4 принимают $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$;

- отсутствие внешних магнитных и электрических полей;
- номинальная частота тока.

Класс точности γ измерительного прибора – это отношение максимальной абсолютной погрешности к номинальному значению прибора, выраженное в процентах:

$$\gamma = [\pm \Delta A / A_n] \cdot 100 \%$$

Вариация показаний прибора – наибольшая разность между повторными показаниями прибора, соответствующими одному и тому же действительному значению измеряемой величины при неизменных внешних условиях. Вариация показаний прибора выражается в % от его верхнего предела измерений и вычисляется как разность значений измеряемой величины, соответствующих одному и тому же ее значению согласно показаниям образцового прибора и определяемых в окрестности одной и той же отметки поверяемого прибора сначала при увеличении, а затем при уменьшении измеряемой величины.

Допускаемая погрешность образцового прибора, как правило, должна быть в 5 раз меньше допускаемой погрешности поверяемого прибора. Выбирая образцовый прибор, необходимо учитывать также его систему. При поверке приборов магнитоэлектрической системы на постоянном токе в качестве образцовых следует применять приборы той же системы. При поверке приборов других систем в качестве образцовых рекомендуется применять приборы электродинамической системы. При поверке на переменном токе предпочтение также следует отдавать приборам электродинамической системы, как обладающим наивысшей точностью.

Каждый показывающий прибор переменного тока рассчитан на применение при определенной частоте или определенном диапазоне частот. Влияние изменения частоты измеряемого тока или напряжения на показания приборов разных систем различно. Для выявления этого влияния обычно снимают частотные характеристики, т. е. зависимость отклонения указателя прибора от частоты.

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник регулируемого постоянного напряжения.
2. Ампервольтметр Ц4341, ампервольтметр М2044.
3. Блок переменного сопротивления.

3. Экспериментальная часть

1. Ознакомиться с ампервольтметрами Ц4341 и М2044, режимами их работы и пределами измерений напряжения и тока. Записать системы приборов, их номинальные характеристики и классы точности.

2. Установить переключатель выбора режима работы ампервольтметра Ц4341 в положение, помеченное знаком «←» (измерение постоянного тока или напряжения).

3. Собрать цепь по рис. 2.1, а, подключив ампервольтметры Ц4341 и М2044 к источнику регулируемого постоянного напряжения, и предоставить ее для проверки преподавателю.

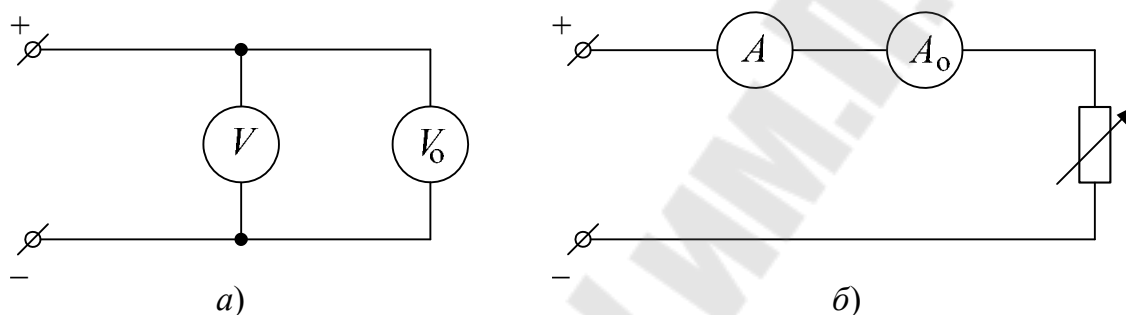


Рис. 2.1

4. Установить для ампервольтметра Ц4341 предел измерений постоянного напряжения 30 В. Используя ампервольтметр М2044 в качестве образцового прибора, произвести поверку ампервольтметра Ц4341 на всех оцифрованных делениях шкалы. Результаты занести в табл. 2.1.

5. Выполнить те же действия, установив для ампервольтметра Ц4341 предел измерений постоянного напряжения 60 В.

6. Собрать цепь по рис. 2.1, б, подключив ампервольтметры Ц4341 и М2044 к источнику регулируемого постоянного напряжения последовательно с блоком переменного сопротивления для подбора нужного значения номинальной силы тока. Предоставить цепь для проверки преподавателю.

7. Установить для ампервольтметра Ц4341 предел измерений постоянного тока 60 мА. Используя ампервольтметр М2044 в качестве образцового прибора, произвести поверку ампервольтметра Ц4341 на всех оцифрованных делениях шкалы. Результаты занести в табл. 2.1.

8. Выполнить те же действия, установив для ампервольтметра Ц4341 предел измерений постоянного тока 600 мА.

9. Сделать выводы о точности ампервольтметра Ц4341 в исследованных режимах измерений.

Таблица 2.1

Предел измерений прибора Ц4341	Отметка шкалы прибора Ц4341	Показание образцового прибора, В	Предел измерений прибора Ц4341	Отметка шкалы прибора Ц4341	Показание образцового прибора, мА
30 В			60 мА		
60 В			600 мА		

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходные данные и схемы исследуемых цепей.
5. Таблица с результатами измерений и вычислений.

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цель работы: овладение основными методами измерения резистивных сопротивлений.

1. Вводные теоретические положения

Для точных (с погрешностью до 1 %) измерений сопротивления используют электрические мосты и цифровые приборы. Для более грубых измерений активных сопротивлений используют метод амперметра и вольтметра, метод двух вольтметров и метод замещения.

Метод замещения (МЗ) применяется в тех случаях, когда не требуется высокая точность измерения. Для осуществления измерений этим методом необходим магазин сопротивлений, которым замещают измеряемое неизвестное сопротивление R_x . Схема цепи для измерения сопротивления при помощи МЗ показана на рис. 3.1. Задав на входе такой цепи некоторое напряжение U , измеряют ток I через неизвестное сопротивление R_x . Затем между точками 1 и 2 вместо R_x включают магазин сопротивлений – переменное сопротивление R' , после чего измеряют ток I' , протекающий через сопротивление R' при том же напряжении U . Значение R' , соответствующее наименьшему расхождению величин I и I' , принимают за значение R_x .

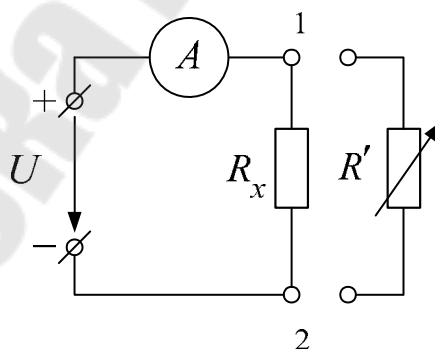


Рис. 3.1

Метод амперметра и вольтметра (МAB) основан на расчете измеряемого сопротивления R_x по результатам измерения силы тока через резистор R_x и напряжения на этом резисторе. Достоинство этого метода (рис. 3.2) заключается в том, что по резистору R_x в ходе измерений можно пропускать такой же ток, как и при его работе

в электрической цепи. Это чрезвычайно важно при измерениях нелинейных сопротивлений, значения которых зависят от силы тока.

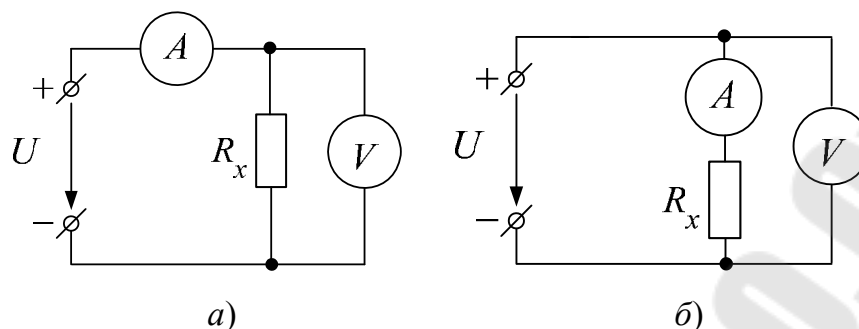


Рис. 3.2

Два способа проведения измерений при помощи МАВ показаны на рис. 3.2, а и 3.2, б. Для приближенного определения значения R_x достаточно разделить показание вольтметра U_V на показание амперметра I_A :

$$R_x = \frac{U_V}{I_A}. \quad (3.1)$$

Для определения значения R_x с высокой точностью приходится учитывать, что сопротивление вольтметра $R_V < \infty$, а сопротивление амперметра $R_A > 0$. При измерении малых сопротивлений ($R_x \ll R_V$) используют схему на рис. 3.2, а и формулу

$$R_x = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}, \quad (3.2a)$$

а при измерении больших сопротивлений ($R_x \gg R_A$) используют схему на рис. 3.2, б и формулу

$$R_x = \frac{U_V - I_A R_A}{I_A}. \quad (3.2б)$$

Метод двух вольтметров (МДВ) применяется в тех случаях, когда измерение силы тока в цепях, показанных на рис. 3.2, по каким-либо причинам невозможно, но в наличии имеется резистор R_0 , сопротивление которого известно. Тогда определение R_x можно осуществить двумя равноценными способами, показанными на рис. 3.3.

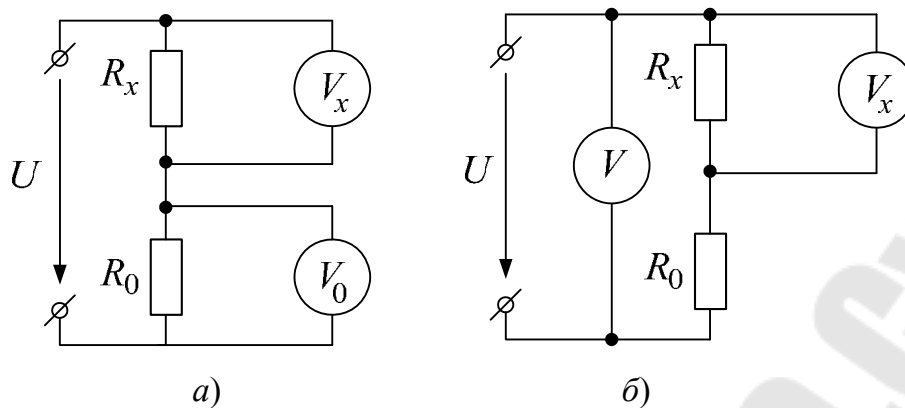


Рис. 3.3

Если обозначить U_x – показание вольтметра V_x , U_0 – показание вольтметра V_0 , U – показание вольтметра V , то значение неизвестного сопротивления R_x выразится следующим образом: для схемы на рис. 3.3, а:

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U_0}, \quad (3.3a)$$

а для схемы на рис. 3.3, б

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U - U_x}. \quad (3.3б)$$

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник регулируемого постоянного напряжения.
2. Пассивные элементы 01, 02, 05, 06, устанавливаемые на наборном поле стенда УИЛС-1.
3. Блок переменного сопротивления.
4. Ампервольтметр Ц4311, мультиметр МУ-68, универсальный вольтметр В7_58/2.

3. Экспериментальная часть

1. Собрать электрическую цепь по схеме на рис. 3.1, используя в качестве R_x элемент 02. Подать на вход цепи напряжение 7–10 В, измерить силу тока I через резистор R_x и занести в табл. 3.1. Заменить в собранной цепи резистор R_x резистором R' , используя в качестве

R' БПС, и измерить ток I' через резистор R' . Ступенчато изменяя величину сопротивления R' , добиться наименьшего возможного расхождения между величинами I и I' . Значение R' , соответствующее такому расхождению, занести в табл. 3.1.

2. Прodelать то же, что описано в п. 1, используя в качестве R_x элемент 05. Результаты занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Элемент	I , мА	I' , мА	$R' \approx R_x$, Ω	Номинальное значение R_x , Ω
02				
05				

3. Собрать электрическую цепь по схеме на рис. 3.2, *а*, используя в качестве R_x элемент 01. Установить на входе цепи напряжение 2–5 В. Измерить значения U_V , I_A , рассчитать R_x по формуле (3.2*а*), результат занести в табл. 3.2.

4. Собрать электрическую цепь по схеме на рис. 3.2, *б*, используя в качестве R_x элемент 06. Установить на входе цепи напряжение 12–18 В. Измерить значения U_V , I_A , рассчитать R_x по формуле (3.2*б*), результат занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Элемент	R_x , Ω Расчет по формуле (3.1)	Схема измерения	R_V , Ω	R_A , Ω	R_x , Ω		Номинальное значение R_x , Ω
					Расчет по формуле (3.2, <i>а</i>)	Расчет по формуле (3.2, <i>б</i>)	
01		3.2, <i>а</i>					
06		3.2, <i>б</i>					

5. Установить на блоке переменного сопротивления 150 Ом. Собрать электрическую цепь по схеме на рис. 3.3, *а*, используя это сопротивление БПС в качестве R_0 , а элемент 02 – в качестве R_x . Подать на вход цепи напряжение 7–10 В, измерить напряжения U_x и U_0 и занести в табл. 3.3. Рассчитать R_x по формуле (3.3, *а*) и занести в табл. 3.3.

6. В цепи п. 5 измерить напряжение U (схема 3.3, *б*), рассчитать сопротивление R_x по формуле (3.3, *б*), результат занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Элемент	R_0, Ω	Схема измерения						Номинальное значение R_x, Ω
		3.3, а			3.3, б			
		$U_x, В$	$U_0, В$	R_x, Ω	$U_x, В$	$U_0, В$	R_x, Ω	
02								

7. Сделать выводы, сравнив результаты измерений разными методами.

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходные данные и схемы замещения исследуемых цепей.
4. Расчетные формулы с подстановками числовых значений.
5. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
6. Выводы о сравнительной эффективности изученных методов измерения.

Лабораторная работа № 4

СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы: 1) снятие вольт-амперных характеристик активных двухполюсников и определение параметров их схем замещения; 2) снятие вольт-амперных характеристик пассивных резистивных двухполюсников.

1. Вводные теоретические положения

Для описания свойств электрических двухполюсников используют зависимости между напряжением U и током I , которые называются *вольт-амперными характеристиками* (ВАХ) этих элементов. В общем случае электрическое сопротивление зависит от силы протекающего тока (например, вследствие джоулевского нагрева резистора током), поэтому вольт-амперная характеристика любого элемента электрической цепи, строго говоря, всегда является нелинейной функцией.

Довольно часто эта нелинейность выражена слабо, так что ею можно пренебречь, считая, что имеет место прямая пропорциональность между напряжением на элементе и током в нем, выражаемая законом Ома. Например, для резистивного элемента:

$$U = RI. \quad (4.1)$$

В таком случае соответствующий резистивный элемент называется *линейным*. На рис. 4.1 показана ВАХ линейного сопротивления. Линейное сопротивление R пропорционально тангенсу угла наклона прямолинейной ВАХ к оси тока:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.2)$$

где m_U и m_I – масштабы напряжения, В/мм, и тока, А/мм, на чертеже.

У многих элементов нелинейность их вольт-амперной характеристики столь значительна, что пренебречь ею нельзя. Такие элементы называют нелинейными.

Важной особенностью нелинейных элементов является то, что их вольт-амперные характеристики не всегда удовлетворяют равенству $U(-I) = -U(I)$, т. е. не всегда являются симметричными. Часто встречаются элементы с несимметричной ВАХ, т. е. элементы, для которых $U(-I) \neq -U(I)$.

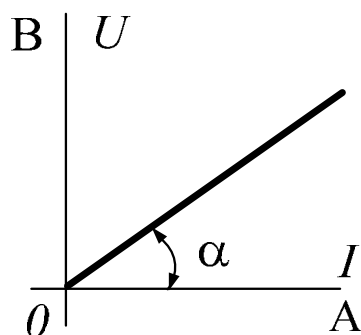


Рис. 4.1

Источник электрической энергии характеризуется величиной и направлением электродвижущей силы E и значением внутреннего резистивного сопротивления R_B . С учетом этого реальный источник питания изображается на схемах в виде идеального источника ЭДС с включенным последовательно с ним резистивным сопротивлением R_B (рис. 4.2, а). Это сопротивление отображает внутреннее сопротивление источника, ограничивающее мощность, отдаваемую этим источником во внешнюю электрическую цепь.

Вольт-амперная характеристика такого источника (рис. 4.2, б), которую также называют *внешней характеристикой*, представляет собой зависимость напряжения на его зажимах от тока, проходящего через источник. Согласно второму закону Кирхгофа:

$$U = E - R_B I. \quad (4.3)$$

Тангенс угла α наклона этой зависимости пропорционален сопротивлению R_B .

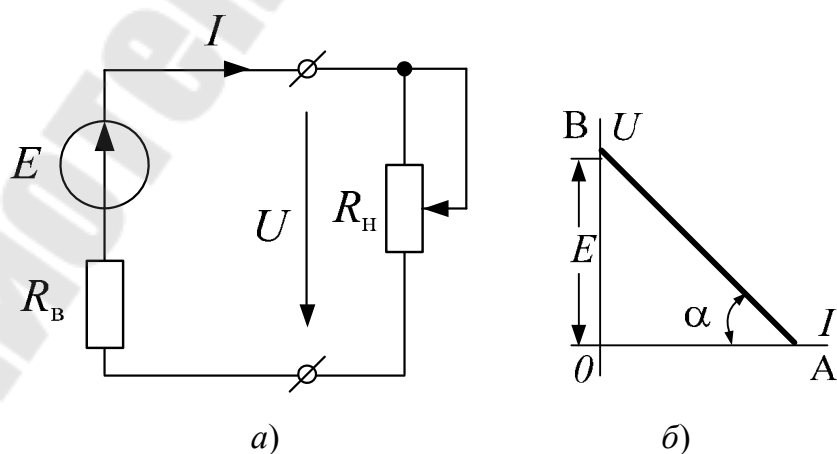


Рис. 4.2

Если нагрузочное сопротивление $R_H \rightarrow 0$ (режим короткого замыкания), то напряжение на зажимах $U \rightarrow 0$ и ток I достигает максимального значения $I_{к.з} = E/R_B$. В другом предельном случае, т. е. при $R_H = \infty$ (режим холостого хода) $I = 0$, а напряжение на зажимах источника принимает наибольшее значение $U_{xx} = E$.

Для эффективной работы реальных источников напряжения величина R_B должна быть относительно мала, поэтому режим короткого замыкания для большинства источников напряжения является аварийным.

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник регулируемого постоянного напряжения.
2. Источник нерегулируемого постоянного напряжения ($U \sim 20$ В).
3. Элементы 01–09, 20, 23.
4. Блок переменного сопротивления (БПС).
5. Измерительные приборы, установленные на стенде.

3. Экспериментальная часть

1. Среди резистивных элементов, исследованных в лабораторных работах № 1 и № 3, выбрать 2 элемента, сопротивления которых различаются в 2–3 раза.

2. Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 4.3, а, используя в качестве источника питания регулируемый источник постоянного напряжения, а в качестве нагрузки – один из выбранных элементов.

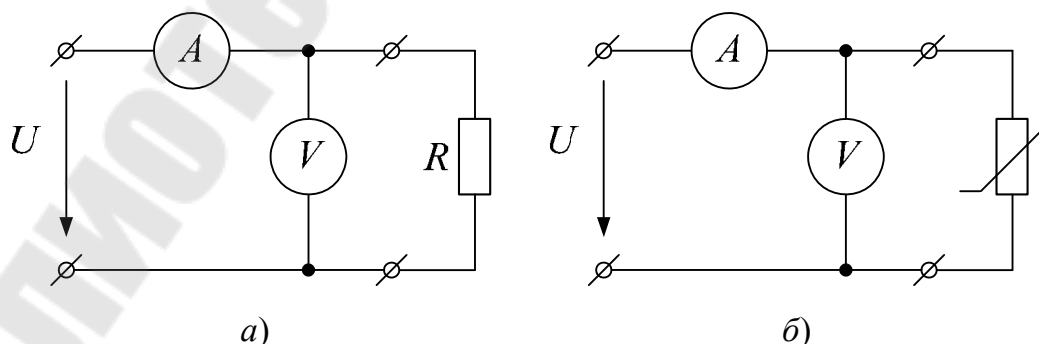


Рис. 4.3

Изменяя напряжение источника питания от поля до величины, составляющей 80–90 % от номинального напряжения выбранного резистора, через равные промежутки произвести 10–12 измерений напряжения и тока. Результаты измерений занести в табл. 4.1. Аналогичные измерения произвести для второго выбранного элемента. По результатам проведенных измерений построить вольт-амперные характеристики обоих исследованных элементов.

Таблица 4.1

№ п/п	Резистор ____		Резистор ____	
	$U, В$	$I, А$	$U, В$	$I, А$
1				
2				
3				
...				

4. Собрать электрическую цепь по схеме, показанной на рис. 4.3, б, используя в качестве источника питания регулируемый источник постоянного напряжения, а в качестве нагрузки – элемент 20 (электрическая лампа накаливания). Последовательно увеличивая напряжение источника питания, произвести измерения напряжения и тока. При этом напряжение регулируемого источника следует изменять таким образом, чтобы показания амперметра изменялись с интервалом в 10 мА в промежутке от 0 до 180 мА. Результаты измерений занести в табл. 4.2, после чего построить ВАХ лампы.

Таблица 4.2

№ п/п	Элемент 20		Элемент 23			
	$U, В$	$I, А$	Прямая полярность		Обратная полярность	
			$U, В$	$I, А$	$U, В$	$I, А$
1						
2						
3						
...						

5. Прodelать те же действия для элемента 23. ВАХ этого элемента несимметрична и потому должна быть определена как для прямой, так и для обратной полярности включения элемента в цепь. Результаты измерений занести в табл. 4.2, после чего построить ВАХ исследованного нелинейного элемента.

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходные данные и схемы замещения исследуемых цепей.
4. Таблицы с результатами измерений.
5. Вольт-амперные характеристики исследованных нелинейных резисторов.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: овладение основными методами измерения параметров реактивных элементов.

1. Вводные теоретические положения

Для измерения реактивных сопротивлений наиболее предпочтительны метод амперметра и вольтметра, уже применявшийся ранее в лабораторной работе № 3. При этом измерение емкостного сопротивления производится точно так же, как и измерение активных сопротивлений. Единственное, но существенное отличие заключается в том, что при измерении емкостного сопротивления цепь питается не постоянным, а однофазным переменным напряжением.

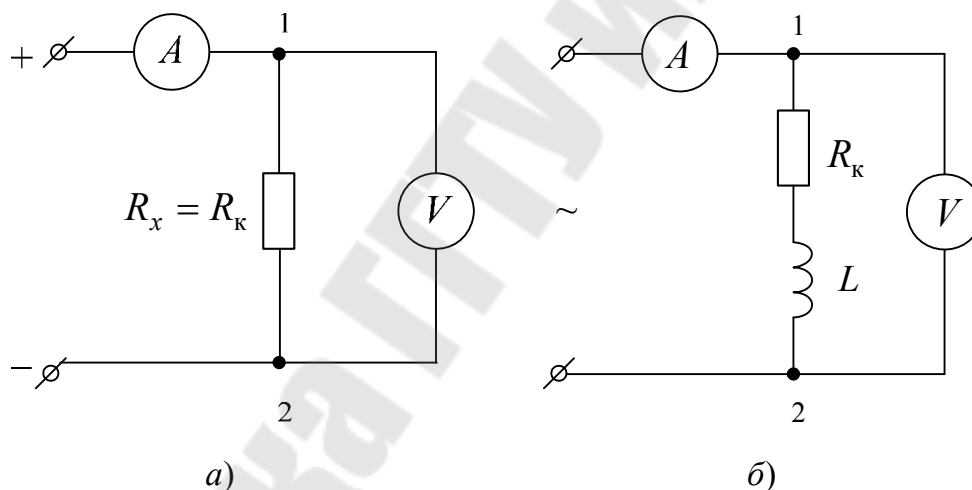


Рис. 5.1

При измерении индуктивных сопротивлений учитывают, что всякая реальная катушка обладает активным сопротивлением R_k и потому характеризуется не одной, а двумя величинами: L и R_k . Для их определения проводят два независимых измерения. Вначале измеряют сопротивление катушки постоянному току, т. е. R_k (рис. 5.1, а, формулы (5.1), (5.2)). Затем ту же катушку подключают к источнику переменного напряжения (рис. 5.1, б) и измеряют полное сопротивление Z_k катушки. После этого индуктивное сопротивление X_L и индуктивность L катушки определяют по формулам:

$$Z_k = \frac{U_V}{I_A}; \quad X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \quad (5.1)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}. \quad (5.2)$$

Описанный выше метод определения индуктивного сопротивления катушки и ее собственных характеристик (R_k и L) имеет существенный недостаток: для этих измерений необходимы источники постоянного и переменного напряжения. В случаях, когда источник постоянного напряжения недоступен, для измерения L , R_k и X_L используют метод трех вольтметров, который является аналогом метода двух вольтметров в цепях постоянного тока. Для измерений используют источник синусоидального напряжения и резистор R_0 с известным сопротивлением, значение которого соизмеримо с полным сопротивлением Z_k катушки. В цепи, изображенной на рис. 5.2, поочередно измеряют напряжения U , U_0 и U_k . По напряжению U_0 находят ток в цепи:

$$I = \frac{U_0}{R}.$$

Затем рассчитывают полные сопротивления катушки Z_k и всей цепи Z :

$$Z_k = \frac{U_k}{I}, \quad Z = \frac{U}{I}.$$

Поскольку

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}; \quad Z = \sqrt{(R_0 + R_k)^2 + X_L^2},$$

активное и индуктивное сопротивления катушек можно определить по формулам:

$$R_k = \frac{Z^2 - Z_k^2 - R_0^2}{2R_0}; \quad X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (5.3)$$

После этого индуктивность катушки можно рассчитать по формуле (5.2).

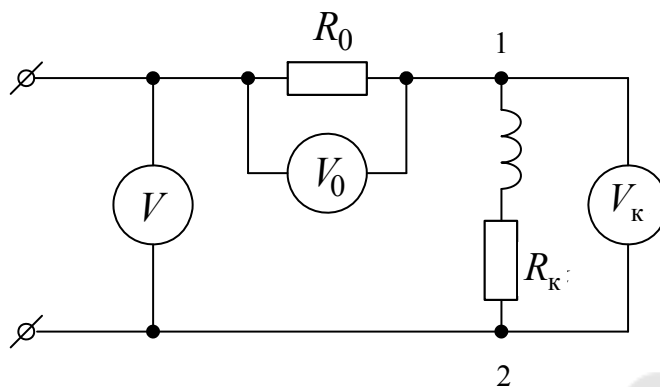


Рис. 5.2

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник регулируемого постоянного напряжения.
2. Источник регулируемого переменного напряжения.
3. Элементы 02, 11, 12, 16–19.
4. Измерительные приборы, установленные на стенде.

3. Экспериментальная часть

1. По аналогии с рис. 5.1 самостоятельно изобразите схему цепи для измерения емкостного сопротивления методом амперметра и вольтметра и представьте для проверки преподавателю. Соберите данную цепь, используя в качестве емкости C какой-либо из элементов 16–19. Подав на вход этой цепи синусоидальное напряжение 5–7 В частотой $f = 2\text{--}5$ кГц, емкостное сопротивление по формуле

$$X_C = \frac{U_V}{I_A}.$$

Результат занесите в табл. 5.1. По известной из курса ТОЭ формуле

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C}$$

рассчитайте емкость элемента и сравните ее с номинальным значением.

Таблица 5.1

Емкостный элемент	U_V	I_A	X_C	C, $\mu\text{Ф}$	
				Расчетное значение	Номинальное значение

2. Соберите электрическую цепь по схеме рис. 5.1 а, включив между точками 1 и 2 элемент 11. Подайте на вход цепи постоянное напряжение $U_0 = 1\text{--}2$ В. На основании показаний амперметра и вольтметра по формуле (5.1) рассчитайте R_k и занесите в табл. 5.1. Подайте на вход этой цепи синусоидальное напряжение $U = 5\text{--}7$ В. На основании показаний амперметра и вольтметра по формулам (5.1) и (5.2) рассчитайте индуктивное сопротивление катушки и ее индуктивность. Результаты занесите в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Элемент	Метод амперметра и вольтметра			Метод трех вольтметров		
	R_k, Ω	X_L, Ω	$L, \text{Гн}$	R_k, Ω	X_L, Ω	$L, \text{Гн}$
11						
12						

3. Включите вместо амперметра элемент 02, как показано на рис. 5.2. На основании измерений напряжений U , U_0 и U_k по формулам (5.5), (5.6) рассчитайте R_k , X_L и L , занесите эти значения в табл. 5.2 и сравните с результатами измерения тех же величин методом амперметра и вольтметра.

4. Прделайте то же, что описано в пп. 2 и 3, включив в цепь между точками 1 и 2 элемент 12.

5. Сделайте выводы об эффективности изученных методов определения параметров реактивных элементов.

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходные данные и схемы замещения исследуемых цепей.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. Выводы о сравнительной эффективности изученных методов определения параметров реактивных элементов.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНО-СВЯЗАННЫХ КАТУШЕК

Цель работы: приобретение навыков экспериментального определения характеристик катушек с магнитной связью.

1. Вводные теоретические положения

Два контура электрической цепи называются связанными, если изменение тока в одном из них вызывает изменение напряжения или тока в другом. В большинстве случаев это достигается за счет размещения двух катушек индуктивности таким образом, что магнитный поток одной катушки пересекает витки другой, т. е. между катушками имеется взаимная индуктивность M . Индуктивность, как известно, есть коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и током, протекающим по этой же катушке. Соответственно, взаимная индуктивность есть коэффициент пропорциональности между током, протекающим по одной катушке и магнитным потоком, сцепленным с витками другой. Направления магнитных потоков зависят от направления намотки катушки, поэтому на схемах указывают разметку начал намотки (звездочки или точки). Если токи в обеих катушках направлены относительно помеченных зажимов одинаково, то такое включение катушек называют согласным; в этом случае магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции складываются. Соединение катушек, при котором магнитные потоки противоположны, называется встречным. Величина эквивалентного сопротивления последовательно соединенных катушек зависит от способа их соединения:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{согл}} &= (R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2) + j2\omega M = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 2\underline{Z}_M; \\ \underline{Z}_{\text{встр}} &= (R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2) - j2\omega M = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M.\end{aligned}\tag{6.1}$$

Формулы (6.1) показывают, что $\underline{Z}_{\text{согл}} > \underline{Z}_{\text{встр}}$. Это означает, что при одном и том же входном напряжении на внешних зажимах последовательно соединенных индуктивно связанных катушек сила тока при согласном включении катушек будет меньше, чем при встречном включении тех же катушек. Этим свойством удобно пользоваться для экспериментального определения начал и концов намотки индуктивно связанных катушек.

А именно, если разметка выводов катушек неизвестна, то сначала соединяют катушки произвольно и определяют совокупную индуктивность получившейся цепи. Затем меняют местами зажимы одной из катушек и повторяют измерение. Соединение, при котором индуктивность оказывается больше, является согласным (рис. 6.1, а), а при котором меньше – встречным (рис. 6, б).

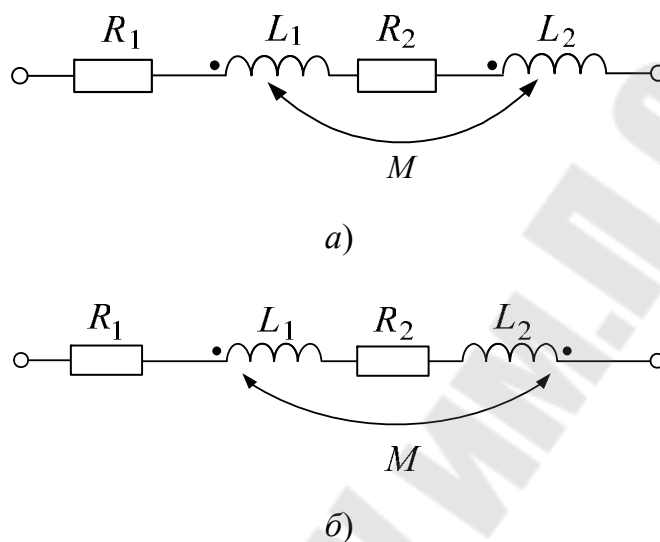


Рис. 6.1

Величину взаимной индукции M можно рассчитать по формуле

$$M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{8\pi f} = \frac{L_{\text{согл}} - L_{\text{встр}}}{8}, \quad (6.2)$$

где $L_{\text{согл}} = L_1 + L_2 + 2M$; $L_{\text{встр}} = L_1 + L_2 - 2M$. Зная M , L_1 и L_2 , легко рассчитать коэффициент магнитной связи:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (6.3)$$

Таким образом, для экспериментального определения характеристик индуктивно связанных катушек достаточно определить их совокупную индуктивность при согласном и при встречном включениях, если предварительно были определены индуктивности каждой из них в отдельности.

Помимо этого, существуют другие методы экспериментального определения характеристик индуктивно связанных катушек, например, метод холостого хода трансформатора.

Электрическим трансформатором называют устройство, состоящее из нескольких индуктивно связанных катушек. Обмотка трансформатора, к которой подводится питание, называется первичной, а обмотка, к которой подключается нагрузка, – вторичной (рис. 6.2).

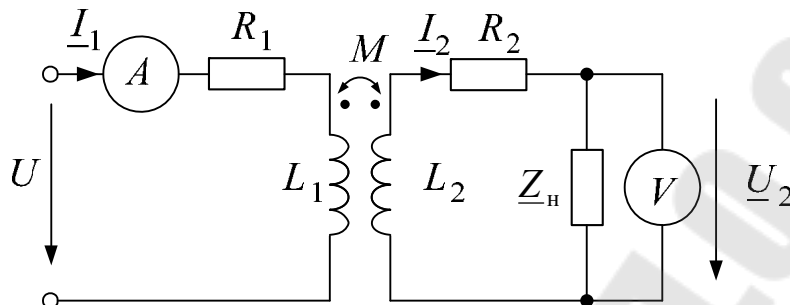


Рис. 6.2

Если создать во вторичной цепи режим холостого хода, т. е. обеспечить $Z_{\text{н}} = \infty$, $I_2 = 0$, то из уравнений второго закона Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$\underline{R}_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 = U_1;$$

$$\underline{R}_2 \underline{I}_2 + jX_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 = U_2 = 0$$

будем иметь:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{R_1 + jX_1}; \quad \underline{U}_2 = j\omega M \underline{I}_1; \quad U_2 = j\omega M I_1.$$

Таким образом, измерив ток в первичной обмотке и напряжение на вторичной обмотке, можно определить взаимную индуктивность:

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1}. \quad (6.4)$$

Взаимную индуктивность катушек также можно определить резонансным методом, собрав цепь по схеме, показанной на рис. 6.3.

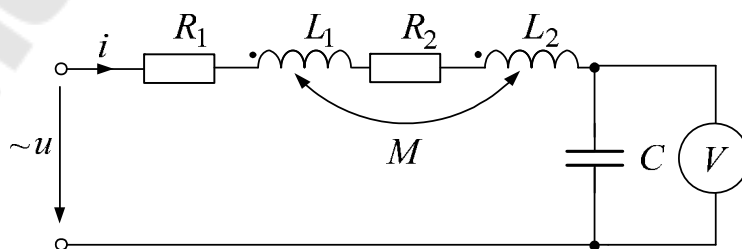


Рис. 6.3

Известно, что в последовательной RLC -цепи варьированием частоты входного напряжения всегда можно добиться резонанса напряжений, который легко обнаружить по максимальному значению силы тока в цепи, по максимальному значению напряжения на емкостном элементе, по обращению в ноль сдвига фаз между входным напряжением и входным током и т. д. Если частота f_0 резонанса напряжений в цепи на рис. 6.3 установлена, то взаимную индуктивность катушек можно рассчитать по формуле

$$M = \frac{1}{4\pi^2 C f_0^2} - (L_1 + L_2). \quad (6.5)$$

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник регулируемого однофазного синусоидального напряжения.
2. Две индуктивно связанные катушки.
3. Блок переменного сопротивления.
4. Блок переменной емкости.
5. Измерительные приборы, установленные на стенде.

3. Экспериментальная часть

1. Для каждой из индуктивно связанных катушек в отдельности определите собственные характеристики (индуктивность и активное сопротивление обмотки) по методике, изученной в предыдущей лабораторной работе. Результаты занесите в табл. 6.1 и представьте для проверки преподавателю.

Таблица 6.1

Катушка	R_k , Ом	L_k , Гн
I		
II		

2. Включите две индуктивно связанные катушки последовательно. Подайте на вход цепи переменное напряжение U частотой $f = 1-3$ кГц. Измерьте силу тока в цепи. Поменяйте местами положения зажимов какой-либо одной из двух катушек, не меняя величину и частоту входного напряжения, и вновь измерьте силу тока в цепи.

3. Сравнив полученные значения силы тока, определите, какие чередования зажимов катушек соответствуют их согласному и встречному включениям (см. обсуждение схем 6.1, *a* и 6.1, *б* в разделе 1). Результаты измерений занесите в табл. 6.2.

4. По формулам (6.2) и (6.3) рассчитайте величину взаимной индукции и коэффициент магнитной связи катушек. Результаты расчетов занесите в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Включение катушек	f , кГц	U , В	I , А	Z , Ом	X , Ом	M , Гн	k
Согласное							
Встречное							

5. Соберите электрическую цепь по схеме на рис. 6.2. Измерив ток в первичной обмотке и напряжение на вторичной обмотке, рассчитайте взаимную индуктивность по формуле (6.4).

6. Соберите электрическую цепь по схеме на рис. 6.3. Варьированием частоты входного напряжения добейтесь резонанса напряжений, оценивая приближение к нему по величине силы тока в цепи, напряжения на емкостном элементе, сдвига фаз между входным напряжением и входным током и т. п. Определите частоту f_0 резонанса напряжений, после чего рассчитайте взаимную индуктивность связанных катушек по формуле (6.5).

7. Сравните величины M , определенные тремя методами, и сделайте выводы об их эффективности.

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходные данные и схемы замещения исследуемых цепей.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. Итоги сравнения результатов измерения взаимной индуктивности тремя способами.
6. Выводы о сравнительной эффективности изученных методов измерения взаимной индуктивности.

Лабораторная работа № 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: 1) приобретение навыков работы с осциллографом в режимах однолучевой и двухлучевой развертки; 2) измерение с помощью осциллографа амплитуды, периода и частоты синусоидального напряжения; 3) измерение фазового сдвига между напряжением и током в последовательной RC -цепи.

1. Вводные теоретические положения

Синусоидальные токи и напряжения можно изобразить графически, записать при помощи уравнений с тригонометрическими функциями и представить в виде вращающихся векторов на декартовой или комплексной плоскости.

Приведенным на рис. 7.1, *а* и *б* графикам двух синусоидальных ЭДС e_1 и e_2 соответствуют уравнения:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_{e_1}); \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_{e_2}).$$

Значения аргументов синусоидальных функций $\omega t + \psi_{e_1}$ и $\omega t + \psi_{e_2}$ называют фазами синусоид, а значение фазы в начальный момент времени ψ_{e_1} и ψ_{e_2} – начальной фазой. Начальная фаза, расположенная слева от оси ординат, отсчитывается со знаком «плюс», а начальная фаза, расположенная справа от оси ординат, – со знаком «минус». На графиках рис 7.1 начальные фазы обозначены односторонними стрелками.

Величину ω , характеризующую скорость изменения фазового угла, называют угловой частотой. Так как фазовый угол синусоиды за время одного периода T изменяется на 2π , то угловая частота:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (7.1)$$

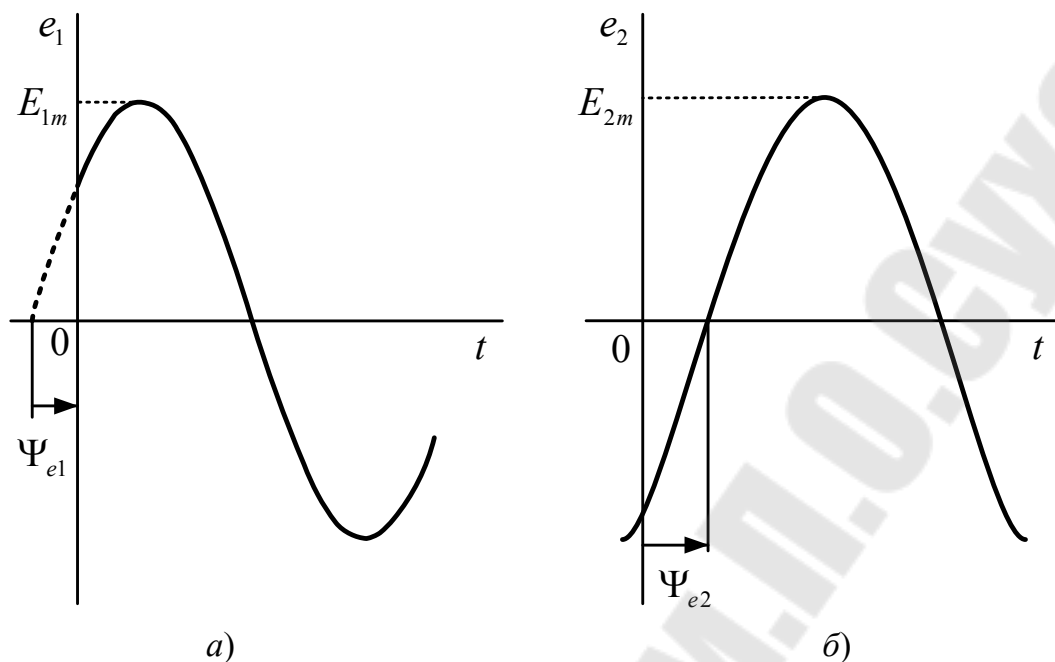


Рис. 7.1

При совместном рассмотрении двух синусоидально изменяющихся величин одной частоты разность их фазовых углов, равную разности начальных фаз, называют углом сдвига фаз. Для синусоид ЭДС e_1 и e_2 , графики которых изображены на рис. 7.1, угол сдвига фаз:

$$\varphi = \omega t + \psi_{e_1} - (\omega t - \psi_{e_2}) = \psi_{e_1} + \psi_{e_2}.$$

Для синусоид напряжения и тока:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i),$$

графики которых изображены на рис. 7.2, угол сдвига фаз:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

Пользуясь понятием «угол сдвига фаз», уравнения напряжения и тока можно записать иначе:

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

или

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad u = U_m \sin(\omega t + \psi_i + \varphi).$$

Эти выражения показывают, что синусоидальный ток отстает по фазе от синусоидального напряжения на угол φ , или синусоидальное напряжение опережает по фазе синусоидальный ток на угол φ .

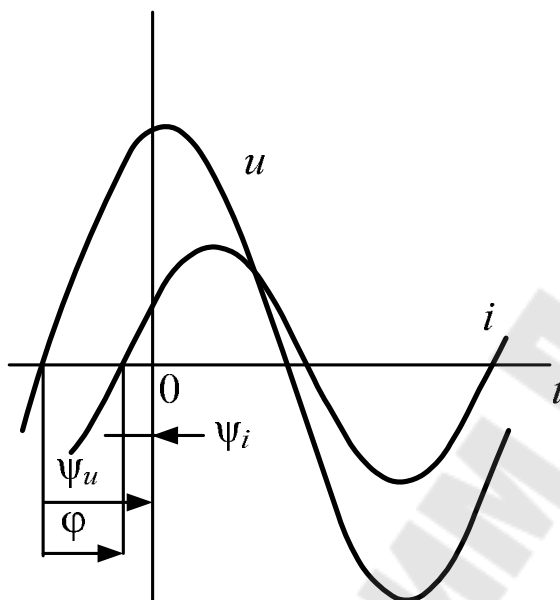


Рис. 7.2

При изображении синусоидальных ЭДС, напряжений и токов вращающимися векторами на декартовой плоскости из начала координат проводят векторы, равные амплитудным значениям синусоидальных величин, и вращают эти векторы против движения стрелки часов с угловой скоростью, равной угловой частоте ω . Фазовый угол при вращении отсчитывают от положительной оси абсцисс.

Во многих случаях (например, при измерении фазовых соотношений между напряжением и током) требуется получить временную развертку тока. Поскольку осциллограф действует как вольтметр, такую развертку получают косвенным путем. В исследуемую ветвь цепи вводят добавочное активное сопротивление R_d , выбираемое по возможности малым во избежание искажений токораспределения исходной цепи. Из курса ТОЭ известно, что напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током через это сопротивление. Благодаря этому, временная развертка напряжения на сопротивлении R_d передает форму временной развертки тока исследуемой ветви.

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник регулируемого однофазного синусоидального напряжения.
2. Осциллограф.
3. Элементы 06, 10, 16.
4. Блок переменной емкости (БПЕ).
5. Измерительные приборы, установленные на стенде.

3. Экспериментальная часть

1. Включите осциллограф и источник регулируемого однофазного синусоидального напряжения. Подключив осциллограф к источнику, получите на экране устойчивую развертку синусоидального напряжения.

2. Определите по развертке амплитуду и период этого напряжения, после чего по формуле (7.1) рассчитайте его частоту.

3. Определите начальную фазу колебаний напряжения при произвольно выбранном горизонтальном смещении полученной развертки.

4. Воспроизведите полученное изображение развертки в отчете и запишите соответствующее выражение для мгновенного значения напряжения. На комплексной плоскости постройте вектор, соответствующий исследуемому напряжению.

5. По результатам выполнения п. 2 рассчитайте действующее значение напряжения и сравните его с результатом измерения вольтметром.

6. Проведите действия пп. 1–5 для синусоидального напряжения, заданного преподавателем.

7. По заданному преподавателем выражению для мгновенного значения напряжения получите на экране осциллографа соответствующую развертку и предъявите ее для проверки преподавателю.

8. Соберите цепь по схеме на рис. 7.3, используя в качестве R_d элемент 10, в качестве C – элемент 16, а в качестве переменного резистора – БПС. Подключив осциллограф как показано на рисунке, получите на экране устойчивую двухлучевую развертку напряжения и тока в цепи при произвольно выбранном значении сопротивления БПС. Определите величину разности фаз напряжения и тока.

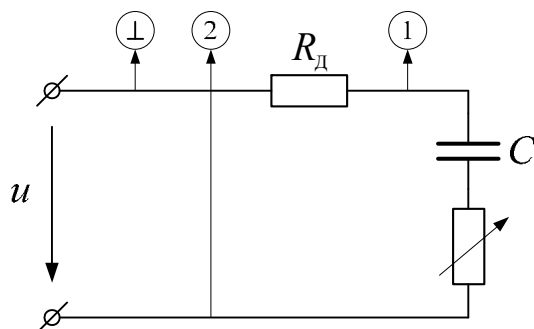


Рис. 7.3

9. В собранной цепи замените постоянную емкость переменной (используйте БПЕ). Для четырех произвольно выбранных значений емкости измерьте разность фаз между напряжением и током. Результаты занесите в табл. 7.1.

Таблица 7.1

№ опыта	$C, \mu\text{Ф}$	$\Delta\psi, ^\circ$
Исходные данные: $R_{\text{БПС}} = \dots \Omega; f = \dots \text{кГц}$		

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходные данные и схемы замещения исследуемых цепей.
4. Изображения полученных разверток, результаты измерений и вычислений их характеристик.
5. Таблица с результатами измерения фазового сдвига между напряжением и током в RC -цепи.

Лабораторная работа № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Цель работы: приобретение навыков определения характеристик несинусоидальных периодических сигналов.

1. Вводные теоретические положения

При производстве, передаче и потреблении электроэнергии неизбежно возникают искажения формы синусоидального напряжения или тока. В результате таких искажений напряжение или ток, оставаясь периодическими, приобретают более сложную негармоническую форму.

При работе с негармоническими периодическими сигналами пользуются тем, что всякая периодическая функция $f(t)$ может быть разложена в бесконечный тригонометрический ряд (ряд Фурье):

$$\begin{aligned} f(t) &= A_0 + B_{1m} \sin \omega t + B_{2m} \sin 2\omega t + \dots + B_{km} \sin k\omega t + \dots \\ &+ C_{1m} \cos \omega t + C_{2m} \cos 2\omega t + \dots + C_{km} \cos k\omega t + \dots = \\ &= A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_{km} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_{km} \cos k\omega t. \end{aligned} \quad (8.1)$$

Постоянную составляющую A_0 и коэффициенты B_{km} и C_{km} вычисляют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t); \\ B_{km} &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d(\omega t); \\ C_{km} &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t d(\omega t). \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

После этого можно перейти от выражения (8.1) к выражению

$$\begin{aligned} f(t) &= A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + \\ &+ A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k), \end{aligned} \quad (8.3)$$

где $A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ – первая (основная) гармоника; $A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$ – высшая гармоника k -го порядка (k -я гармоника).

Амплитуда A_{km} и начальная фаза ψ_k k -й гармоники определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_{km} &= \sqrt{B_{km}^2 + C_{km}^2}; \\ \psi_k &= \operatorname{arctg} \frac{C_{km}}{B_{km}}. \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

При этом

$$\begin{aligned} 0 < \psi_k < 90^\circ, & \text{ если } B_{km} > 0 \text{ и } C_{km} > 0; \\ 90^\circ < \psi_k < 180^\circ, & \text{ если } B_{km} < 0 \text{ и } C_{km} > 0; \\ 180^\circ < \psi_k < 270^\circ, & \text{ если } B_{km} > 0 \text{ и } C_{km} < 0; \\ 270^\circ < \psi_k < 360^\circ, & \text{ если } B_{km} < 0 \text{ и } C_{km} < 0. \end{aligned} \quad (8.5)$$

Степень несинусоидальности (или степень искажения синусоидальности) периодических сигналов характеризуют следующие величины:

- коэффициент амплитуды – отношение амплитуды периодического сигнала к его действующему значению;
- коэффициент формы – отношение действующего значения периодического сигнала к его среднему за полпериода значению;
- коэффициент гармоник (иногда называемый также коэффициентом нелинейных искажений) – отношение действующего напряжения совокупности высших гармоник (т. е. среднеквадратичной суммы их действующих значений) к действующему значению напряжения первой гармоники сигнала.

Графоаналитическую обработку развертки несинусоидального периодического сигнала производят в такой последовательности.

1. Отрезок развертки длительностью в период функции $f(t)$, соответствующий 2π радиан, разбивают на p равных участков Δl :

$$\Delta l = \frac{2\pi}{p}; \quad (8.6)$$

2. В серединах этих участков, т. е. в точках $l_n = (n - 0,5)\Delta l$, определяют значения:

$$f_n = f(l_n), \quad (8.7)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, p$.

3. Вычисляют:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \approx \frac{1}{2\pi} \sum_{n-1}^p f_n \Delta = \frac{1}{2\pi} \sum_{n-1}^p f_n \frac{2\pi}{p} = \frac{1}{p} \sum_{n-1}^p f_n. \quad (8.8)$$

$$\begin{aligned} B_{km} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d(\omega t) \approx \frac{1}{\pi} \sum_{n-1}^p f_n \sin [k(n-0,5)\Delta\varphi] \Delta\varphi = \\ &= \frac{1}{\pi} \sum_{n-1}^p f_n \sin \left[k(n-0,5) \frac{2\pi}{p} \right] \frac{2\pi}{p} = \frac{2}{p} \sum_{n-1}^p f_n \sin \left[\frac{2k\pi}{p} (n-0,5) \right]. \end{aligned} \quad (8.9)$$

$$\begin{aligned} C_{km} &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t d(\omega t) \approx \frac{1}{\pi} \sum_{n-1}^p f_n \cos [k(n-0,5)\Delta\varphi] \Delta\varphi = \\ &= \frac{1}{\pi} \sum_{n-1}^p f_n \cos \left[k(n-0,5) \frac{2\pi}{p} \right] \frac{2\pi}{p} = \frac{2}{p} \sum_{n-1}^p f_n \cos \left[\frac{2k\pi}{p} (n-0,5) \right]. \end{aligned} \quad (8.10)$$

4. По формулам (8.4) определяют амплитуды и начальные фазы отдельных гармонических составляющих.

В качестве примера рассмотрим разложение в ряд Фурье несинусоидальной периодической функции, развертка которой представлена на рис. 8.1.

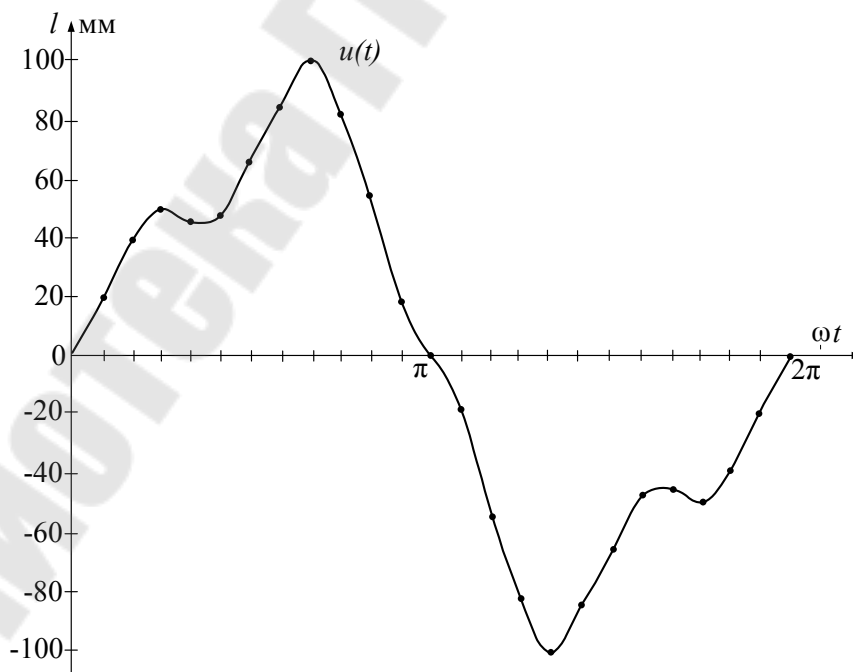


Рис. 8.1

1. Разобьем период функции на 24 части, т. е. $p = 24$. Так как функция симметрична относительно оси абсцисс, для нее $A_0 = 0$, и расчет можно провести только для половины периода. Коэффициенты B_{km} и C_{km} , определяемые по зависимостям (8.8) и (8.9), будут иметь вид

$$B_{km} = \frac{4}{p} \sum_{n=1}^{12} l_n \sin(n \cdot \alpha); \quad (8.11)$$

$$C_{km} = \frac{4}{p} \sum_{n=1}^{12} l_n \cos(n \cdot \alpha), \quad (8.12)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots, p$; $\alpha = \frac{2k\pi}{p}$.

Расчетные значения l_n , $\sin(n \cdot \alpha)$, $\cos(n \cdot \alpha)$ заносим в табл. 8.1.

Таблица 8.1

n	Гармоники									l_n , мм	l_n^2
	Первая			Третья			Пятая				
	α	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	3α	$\sin 3\alpha$	$\cos 3\alpha$	5α	$\sin 5\alpha$	$\cos 5\alpha$		
1	15	0,259	0,966	45	0,707	0,707	75	0,966	0,259	21	441
2	30	0,5	0,866	90	1,0	1,0	150	0,5	-0,866	39	1521
3	45	0,707	0,707	135	0,707	-0,707	225	-0,707	-0,707	50	2500
4	60	0,866	0,5	180	0	-1,0	300	-0,866	0,5	47	2209
5	75	0,966	0,259	225	-0,707	-0,707	15	0,259	0,966	48	2304
6	90	1,0	0	270	-1,0	0	90	1,0	0	63	3969
7	105	0,966	-0,259	315	-0,707	0,707	165	0,259	-0,966	89	7291
8	120	0,866	-0,5	360	0	1,0	240	-0,866	-0,5	101	10210
9	135	0,707	-0,707	45	0,707	0,707	315	-0,707	0,707	83	6889
10	150	0,5	-0,866	90	1,0	0	30	0,5	0,866	47	2209
11	165	0,259	-0,966	135	0,707	-0,707	105	0,966	-0,259	19	361
12	180	0	-1,0	180	0	-1,0	180	0	-1,0	0	0

2. По формулам (8.11), (8.12) вычислим коэффициенты B_{1m} , C_{km} :

$$B_{1m} = \frac{2}{24} (21 \cdot 0,259 + 39 \cdot 0,5 + 50 \cdot 0,707 + 47 \cdot 0,866 + 48 \cdot 0,966 + \\ + 63 \cdot 1 + 89 \cdot 0,966 + 101 \cdot 0,866 + 83 \cdot 0,707 + 47 \cdot 0,5 + 19 \cdot 0,259) = 78,7 \text{ мм};$$

$$C_{1m} = \frac{4}{24} [(21 \cdot 0,966 + 39 \cdot 0,866 + 50 \cdot 0,707 + 47 \cdot 0,5 + 48 \cdot 0,259 + 63 \cdot 0 + 89 \cdot (-0,259) + 101(-0,5) + 83 \cdot (-0,707) + 47 \cdot (-0,866) + 19 \cdot (-0,966))] = -10,8 \text{ мм.}$$

3. По формулам (8.4) определим A_{1m} и ψ_1 :

$$A_{1m} = \sqrt{(78,7)^2 + (-10,8)^2} = 79,5 \text{ мм;}$$

$$\psi_1 = \text{arctg} \frac{-10,8}{78,7} = -7^\circ 50'.$$

4. Учитывая масштаб по горизонтальной оси $m_{\psi 1} = 1$ град/мм, сдвиг первой гармоники относительно исследуемой кривой будет:

$$\psi_{1m} = -7^\circ 50'; \quad m_{\psi 1} \approx -8 \text{ мм.}$$

5. Аналогично рассчитываются A_{3m} , A_{5m} , ψ_3 , ψ_5 :

$$A_{3m} = 19,6 \text{ мм;} \quad A_{5m} = 9,3 \text{ мм;} \quad \psi_3 = 66^\circ 30'; \quad \psi_5 = -140^\circ 30';$$

$$\psi_3 = 66^\circ 5' \frac{m_{\psi 1}}{3} = 22,2 \text{ мм;} \quad \psi_5 = -140^\circ 5' \frac{m_{\psi 1}}{5} = -28,1 \text{ мм.}$$

6. Для выражения амплитуд гармоник в вольтах необходимо определить масштаб построений. В нашем случае:

$$l_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{12} I_n^2}{12}} = \sqrt{\frac{40236}{12}} = 57,9 \text{ мм,}$$

поэтому масштаб:

$$m_u = \frac{U_{\text{изм}}}{l_{\text{ср.кв}}} = \frac{61}{57,9} = 1,055 \text{ В/мм,}$$

где $U_{\text{изм}}$ – действующее значение несинусоидального напряжения, измеренное вольтметром.

7. Величины, характеризующие гармоники и исследуемое напряжение, занесем в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Гармонические составляющие	Амплитуда I_n , мм	Напряжение		
		U_{mn} , В	U_n , В	ψ_n , °
Первая	79,5	84	59,4	-8
Третья	19,6	20,6	14,5	66,5
Пятая	9,3	9,8	6,9	-140,5
Исследуемое напряжение	101	107	61	0

8. Проверим точность расчетов:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2} = \sqrt{(59,4)^2 + (14,5)^2 + (6,9)^2} = 61,5 \approx 61 \text{ В.}$$

9. Определим коэффициенты, характеризующие несинусоидальное напряжение:

– коэффициент амплитуды:

$$K_a = \frac{U_m}{U} = \frac{107}{61} = 1,76;$$

– коэффициент формы:

$$K_\phi = \frac{U}{U_{cp}} = \frac{61}{53,5} = 1,14,$$

где $U_{cp} = l_{cp} m_U = 50,8 \cdot 1,055 = 53,5 \text{ В}$;

$$l_{cp} = \frac{1}{12} \sum_{n=1}^{12} l_n = \frac{610}{12} = 50,8 \text{ мм};$$

– коэффициент гармоник:

$$K_\Gamma = \frac{U_{3,5}}{U_1} = \frac{16,1}{59,4} = 0,271,$$

где $U_{3,5} = \sqrt{(U_3)^2 + (U_5)^2} = \sqrt{(14,5)^2 + (6,9)^2} = 16,1 \text{ В}$.

Приведем для сравнения аналогичные коэффициенты синусоидальной функции: $K_a = 1,41$; $K_\phi = 1,11$; $K_\Gamma = 0$.

2. Исходные данные

В работе используются:

1. Источник регулируемого переменного напряжения.
2. Катушка с ферромагнитным сердечником (элемент 27).
3. Блок переменных сопротивлений (БПС).
4. Измерительные приборы и осциллограф, установленные на стенде.

Опыт проводится в соответствии с вариантом задания, состоящим из двух цифр (см. табл. 8.3). Первая цифра определяет величину и частоту напряжения источника питания, а вторая цифра – исследуемое напряжение.

Таблица 8.3

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Величина напряжения	В	15	17	19	21	23	16	18	20	22	24
Частота	Гц	300	320	340	360	380	400	420	450	470	500
Исследуемое напряжение		U_R	U_L	U_R	U_L	U_R	U_L	U_R	U_L	U_R	U_L

3. Экспериментальная часть

1. Соберите электрическую цепь по рис. 8.2. В качестве R используйте БПС, величину сопротивления которого установите равной 10–20 Ом.

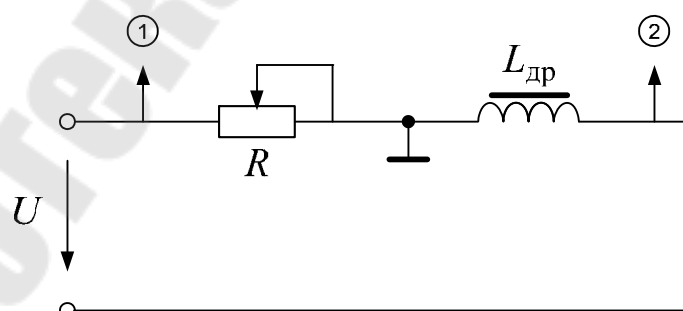


Рис. 8.2

2. Используя осциллограф, получите развертку напряжения на резисторе (U_R) или на нелинейной катушке (U_L). Воспроизведите осциллограмму на миллиметровой бумаге и определите ее размеры по

оси ординат в миллиметрах. Проведите измерение действующего значения исследуемого напряжения.

3. Выполните разложение снятой кривой несинусоидального напряжения графо-аналитическим методом и определите амплитуды и начальные фазы первых трех гармонических составляющих по методике, изложенной в разделе 1.

4. Запишите мгновенное значение исследуемого напряжения, постройте кривую по трем гармоникам, полученным в п. 4, и сравните с исходной осциллограммой.

5. Рассчитайте действующее значение исследуемого напряжения по разложению из п. 4, определите коэффициенты амплитуды, формы и гармоник и сравните их с коэффициентами синусоидальной функции. Сделайте выводы по работе.

4. Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Исходные данные и схему исследуемой цепи.
4. Развертка исследуемого напряжения.
5. Результаты графоаналитической обработки полученной развертки.
6. Результаты вычислений коэффициентов, характеризующих степень несинусоидальности исследованного сигнала.

Литература

1. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника / К. К. Ким [и др.]. – СПб. : Питер, 2010. – 368 с.
2. Электрические измерения : учеб. для вузов / Л. И. Байда [и др.] ; под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. – 392 с.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М. : Гардарики, 2002. – 638 с.

Содержание

Предисловие.....	3
Ознакомительное занятие.....	5
Правила техники безопасности в учебных лабораториях кафедры «Теоретические основы электротехники».....	7
<i>Лабораторная работа № 1. Измерения в простейшей электрической цепи постоянного тока</i>	<i>9</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Поверка и градуировка приборов.....</i>	<i>13</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Измерение резистивных сопротивлений</i>	<i>17</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Снятие вольт-амперных характеристик активных и пассивных двухполюсников</i>	<i>22</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Определение параметров реактивных элементов</i>	<i>27</i>
<i>Лабораторная работа № 6. Определение характеристик магнитно-связанных катушек.....</i>	<i>31</i>
<i>Лабораторная работа № 7. Определение характеристик синусоидальных величин с помощью осциллографа.....</i>	<i>36</i>
<i>Лабораторная работа № 8. Определение характеристик несинусоидальных периодических сигналов.....</i>	<i>41</i>
Литература	49

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Шабловский Ярослав Олегович

**МЕТРОЛОГИЯ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

**Практикум
по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 1-53 01 05
«Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор

Т. В. Мисюрова

Компьютерная верстка

Н. Б. Козловская

Подписано в печать 18.05.17.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 3,02. Уч.-изд. л. 3,27.

Изд. № 94.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель