

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра общей физики

«ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ»

Л. Н. Смирных, А. Г. Костюрина,

Работы 8.1, 8.2

**Измерение электрических величин
в цепях постоянного и переменного тока**

Учебно-методическое пособие

Новосибирск
2008

Развитие измерительных приборов в сторону их универсализации и компьютеризации, произошедшее в последние десятилетия, позволяет существенно изменить процесс обучения студентов основам электрических измерений. Для освоения возможностей применения современных электроизмерительных приборов в основном необходимо знание об их функциональном назначении и эквивалентных схем согласования в измерительных цепях.

Работа "Измерение электрических величин в цепях постоянного и переменного тока" измерительного практикума кафедры общей физики НГУ направлена на овладение студентами общепринятых базовых методов электрических измерений. Основной упор в упражнениях сделан на применении измерительных приборов для экспериментальной проверки основных законов электрических цепей постоянного и переменного тока.

Работа выполняется студентами 1–2-го курсов физического факультета, факультета информационных технологий, геолого-геофизического, медицинского факультетов и факультета естественных наук.

Работа может быть использована при обучении студентов других естественнонаучных и технических факультетов.

Рецензент
д-р физ.-мат. наук. А. Д. Косинов

Издание подготовлено в рамках выполнения инновационно-образовательной программы *«Инновационные образовательные программы и технологии, реализуемые на принципах партнёрства классического университета, науки, бизнеса и государства»* национального проекта «Образование».

© Интернет версия подготовлена для
сервера Физического факультета НГУ
<http://www.phys.nsu.ru>

© Новосибирский государственный
университет, 2008
© Л. Н. Смирных, А. Г. Костюрина, 2008

Оглавление

Введение к работам	4
1. Цель работы	4
2. Измерительные устройства и общие правила их применения	5
3. Источники сигналов и их эквивалентное представление в виде источников напряжения и тока.....	11
4. Источники питания.....	20
5. Основные законы и элементы линейных цепей постоянного и переменного тока.....	23
6. Измерения: основные определения.....	34
7. Приборы для электрических измерений.....	43
Работа 8.1.....	58
Измерение тока и напряжения в цепях постоянного тока	58
Задание 1. Знакомство с основными компонентами линейных цепей.	58
Задание 2. Режимы работы источника питания (БП).....	61
Задание 3. Измерение тока и напряжения в цепях постоянного тока.....	64
Задание 4. Проверка законов Ома и Кирхгофа.....	65
Задание 5. Влияние входного сопротивления вольтметра на результаты измерения напряжения.....	68
Отчет по работе 8.1.....	68
Работа 8.2.....	70
Измерения в цепях переменного тока	70
Задание 1. Знакомство с основными компонентами линейных цепей.	70
Задание 2. Изучение генератора сигналов.	72
Задание 3. Согласование выхода генератора с нагрузкой	74
Задание 4. Цепи переменного тока с активными и реактивными элементами.	77
Задание 5. Измерение коэффициента амплитуды и формы сигналов.....	79
Отчет по работе 8.2:	80
Библиографический список	81

Введение к работам

1. Цель работы

Техника и методы измерений – важнейшая область экспериментальной физики. Значительную ее часть составляют измерения характеристик *электрических* сигналов. Даже когда измеряются неэлектрические величины, такие как температура, давление, вес, скорость, перемещение и т.д., их бывает удобно преобразовать в электрические сигналы с помощью специальных датчиков или устройств. Типичная структура экспериментального исследования в этом случае может быть представлена схемой рис. 1.

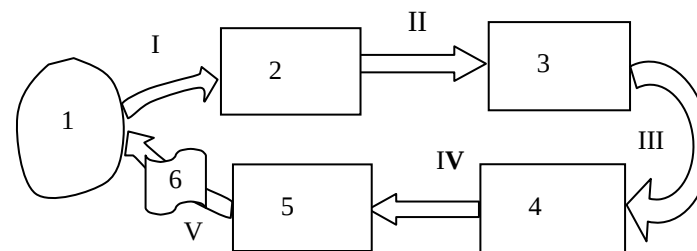


Рис. 1. Общая структура экспериментального исследования:
1 – исследуемый объект; 2 – датчик первичного сигнала;
3 – преобразователь первичного сигнала в электрический;
4 – измерители параметров электрического сигнала;
5 – регистрирующее устройство; 6 – анализ результата и вынесение суждения об исследуемом объекте

На этапе I мы имеем дело с собственно физическим объектом исследования 1 (явлением), а три последующие этапа II–IV представляют собой экспериментально-техническую задачу. На каждом этапе возникают свои специфические проблемы, от решения которых зависит не только адекватность и точность полученного результата, но, в конечном итоге, и наше научное представление об исследуемом объекте, складывающееся на этапе V.

Целью данной работы является освоение методов решения задач II–IV этапов. Посмотрите на рисунок еще раз, и вы поймете, откуда появилось непреложное требование:

результат измерения в физике непременно должен содержать не только само измеренное *значение* физической ве-

|| личности, но и гарантированную точность измерения – величину *погрешности измерения*.

Действительно, в рассмотренной цепи решения единой задачи на различных этапах участвуют разные люди. Задумывают и ставят задачу одни (условно назовем их «теоретиками»), изобретают датчики и методики измерения – этап II – другие («экспериментаторы»), конструируют и изготавливают измерительные приборы – третьи («инженеры и техники»), а в обсуждении результата и вынесении суждения о свойствах исследуемого объекта вновь принимают участие «теоретики» и «экспериментаторы». На любом этапе результат действия обязательно содержит не абсолютно точное «преобразование» идеи в ее техническое воплощение, а с некоторой погрешностью. И если погрешность какого-либо этапа неизвестна и не проставлена в явном виде, ее влияние может быть сочтено непреложным атрибутом самого исследуемого объекта, а не результатом идеализации задачи и погрешности измерения.

2. Измерительные устройства и общие правила их применения

В измерительном практикуме мы должны научиться решать **три задачи**:

- 1) как правильно применять измерительные и регистрирующие приборы, чтобы произвести измерение значения интересующей нас величины;
- 2) каким образом подсчитать суммарную погрешность измерения;
- 3) как правильно записать результат измерения с учетом его погрешности.

В работах 8.1 и 8.2 эти задачи мы будем решать по отношению к измерениям в электрических цепях. Поэтому мы должны знать:

- что такое электрическая цепь (каковы ее элементы и основные законы);
- принцип действия основных приборов для измерений в электрических цепях;
- правила подключения и пользования приборами для экспериментального определения тех или иных параметров и характеристик электрической цепи.

2.1. Основные функциональные устройства измерительной цепи

При чрезвычайном разнообразии научно-экспериментальных задач по измерениям даже одних только электрических характеристик сами измерительные цепи содержат вполне ограниченное число различных функциональных устройств.

В данном параграфе мы кратко охарактеризуем эти устройства и измерительную цепь в целом.

1. Источники питания. Электрическая цепь может быть активной или пассивной. Электрические цепи (устройства), включающие *внешние* источники электрической энергии, называются *активными*, а не включающие таковых – *пассивными*.

Пример. Для получения вольт-амперной характеристики *светодиода* (источника светового излучения) мы должны пропустить через него электрический ток, а потому включить его в активную измерительную цепь, используя *источник питания* (внешней энергии). А характеристики *фотодиода* (приемника светового излучения) мы можем получить и без внешнего источника энергии, используя пассивную измерительную цепь. В этом случае источником электрической энергии является сам фотодиод, преобразующий световое излучение в электрический ток.

2. Усилители сигналов. Часто полезный сигнал бывает мал для того, чтобы его параметры могли быть непосредственно измерены с помощью измерительного прибора. Для усиления или выделения полезного сигнала из шумов служат усилители сигналов. Например, фототок фотодиода может быть слишком мал для его измерения с помощью амперметра. Но с помощью осциллографа его уже легко измерить, поскольку сам осциллограф содержит входной усилитель сигналов. Подобные усилители могут входить в измерительную цепь в виде отдельного прибора.

3. Генераторы сигналов. Для получения определенных характеристик исследуемого объекта на него приходится определенным образом воздействовать. В электрических цепях для этой цели служат специальные *генераторы сигналов*. Например, вольт-амперная характеристика светодиода может быть получена в измерительной цепи, включающей генератор синусоидального или пилообразного сигнала, который в данном случае является одновременно и источником внешней энергии.

4. Измерительные приборы. Для измерения значения электрических параметров сигналов служат собственно *измерительные приборы* (вольтметры, амперметры, частотомеры, измерители спектров, измерительные мосты и потенциометры и т. д.). К измерительным приборам относятся и более сложные устройства, позволяющие проводить не только «точечные» измерения, но и снимать функциональные зависимости (характеристики). К ним относятся различные самопишущие потенциометры (самописцы), характеристографы и т. д.

5. Регистрирующие устройства. Результаты измерения (как на отдельных этапах, так и конечный результат) должны быть каким-то образом зафиксированы. Для этой цели служат *регистрирующие устройства*.

Таким образом,

в измерительную цепь могут входить следующие **основные функциональные узлы или отдельные устройства (приборы):**

- источники сигналов (датчики),
- усилители и преобразователи сигналов,
- генераторы сигналов,
- собственно измерительные приборы (измерители параметров и характеристик электрических сигналов),
- регистрирующие устройства,
- источники питания.

Развитие техники (появление микропроцессоров) привело к тому, что современные приборы чаще всего являются, во-первых, *универсальными* (совмещают в одном приборе многие перечисленные функции), во-вторых, совершают преобразования, производят измерения и регистрацию в *цифровом виде*. Последнее привело к тому, что современные устройства включают специальные узлы – *АЦП (аналого-цифровой преобразователь)* и *ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь)*, функцией которых является преобразование непрерывного (аналогового) сигнала датчиков в цифровой код (в дискретный сигнал цифровой техники) и обратно. Кроме того, современные приборы обычно содержат еще и устройство, позволяющее передавать результаты измерения на компьютеры (интерфейс).

Основная задача данной работы (части 8.1 и 8.2) – научиться работать с «представителями» фактически всех перечисленных функ-

циональных устройств. Но для получения правильного результата измерения помимо умения работать с любым из этих устройств нужно уметь выполнить еще одно неперенное требование:

любое устройство (прибор) обеспечивает выполнение своей функции *с гарантированной точностью* в том и только в том случае, когда соблюдены **правила согласования** данного прибора с другими приборами, входящими в измерительную цепь.

Задачу освоения техники измерений облегчает то, что, несмотря на такое многофункциональное разнообразие устройств и приборов, их работа основана на сравнительно небольшом своде законов электрических цепей. Поэтому наряду с изучением самих измерительных приборов, мы должны познакомиться с основными компонентами и законами электрических цепей.

2.2. Эквивалентное представление приборов и устройств

Разнообразие современных приборов настолько велико, а их технологическое и схемотехническое исполнение так быстро меняется, что единственным способом грамотного их использования является усвоение двух научно-методологических приемов:

– четкое представление об их *функциональном назначении* и «наборе» *параметров*, характеризующих их функциональные возможности,

– использование *эквивалентных схем* (или *схем замещения*) для анализа работы, как самих приборов, так и всей электрической цепи, в которую эти приборы включены.

Именно таким образом мы и будем подходить к изучению приборов для электрических измерений.

Что такое «эквивалентная схема»? Пусть есть сложная электрическая цепь, включающая целый ряд устройств и приборов (рис. 2, а). Если мы рассматриваем параметры сигнала при его переходе от узла N к узлу N + 1, то всю предыдущую схему можем представить в виде эквивалентного источника сигнала A, а всю последующую – в виде нагрузки B (рис. 2, б).

Эквивалентный источник состоит из идеального источника эдс E и внутреннего сопротивления R_в, а нагрузка представляет собой эквивалентное входное сопротивление узла N + 1 и обычно обозна-

чается R_n или $R_{эк}^1$. Мы специально не оговорили, о каком источнике – питания или сигнала – идет речь, поскольку эквивалентное представление одинаково применимо для любого источника электрической энергии.

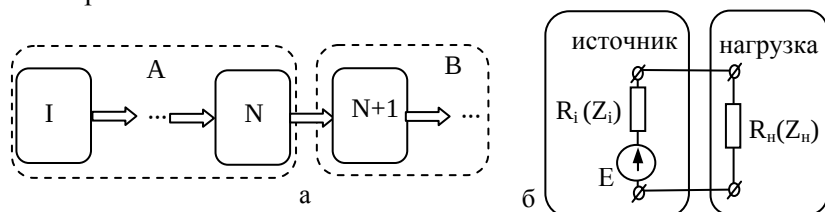


Рис. 2. Эквивалентный источник и нагрузка

Физический смысл введения эквивалентного источника поясним на примере использования обычного гальванического элемента (ГЭ), которые мы покупаем в магазине для многочисленных бытовых миниприборов (калькуляторов, фонариков, часов, сотовых телефонов и пр.). Такие элементы имеют напряжение около 1,5 В, что может быть проверено непосредственным подключением вольтметра к клеммам элемента.

Пусть к элементу ГЭ подключена лампочка карманного фонарика HL (рис. 3, а). На рис. 3, б показана измерительная цепь для проверки закона Ома в этой цепи: амперметр А служит для измерения тока I в цепи нагрузки, а вольтметр V – для измерения напряжения U на ее клеммах. Знаки $\pm$ у гальванического элемента и приборов показывают, как правильно их подключить к источнику постоянного тока с учетом полярности (знака) его напряжения. Значками $\emptyset$ обозначены соединительные клеммы приборов. Обычно их на схемах не изображают, показывая места соединения в пересечении проводников точками, как изображено на рис. 3, в. По показаниям приборов можно определить сопротивление лампочки $R = U/I$ и электрическую мощность, рассеиваемую на лампочке $P = UI$.

А что должны показать измерительные приборы, если вместо лампочки подключим обычный соединительный проводник, используемый в лабораторных работах? Сопротивление такого проводника примерно равно $R_{пр} \sim 10^{-3}$ Ом. По закону Ома ток в цепи

(рис. 3, в) должен составить $I = U/R \sim 1500$ А! Можно ли поверить, что маленький гальванический элемент обеспечит нам ток в полтора килоампера, учитывая, что при электросварке ток плавления электродов не превышает 50 А? Вряд ли.

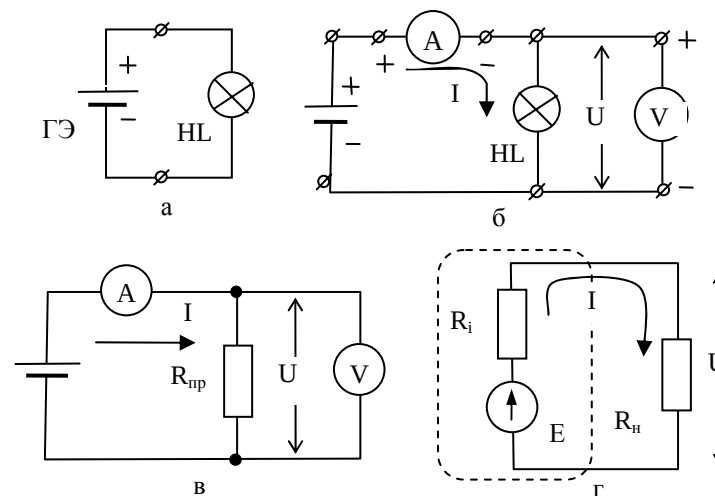


Рис. 3. Измерения в простейшей цепи постоянного тока: а – электрическая схема; б – включение измерительных приборов; в – схема с нагрузкой; г – эквивалентная схема источника (в пунктирной рамке) и нагрузки

Может быть, тогда закон Ома в этом случае "не работает"? Нет, с законом Ома тоже все в порядке. Просто мы не учли в нашей схеме один важный параметр, характеризующий *любой реальный* источник электрической энергии – его **внутреннее сопротивление**, которое в дальнейшем мы будем обозначать R_i . С учетом этого сопротивления

эквивалентная схема источника электрической энергии должна быть представлена двумя компонентами – идеальным источником эдс (электродвижущей силы) E и внутренним сопротивлением R_i , как показано на рис. 3, г.

Идеальный источник эдс – это такой источник, значение эдс которого (напряжение на его клеммах) не зависит от величины нагрузки. Реально таких источников не существует. (Если бы наш ГЭ был идеальным, то он был бы «обязан» обеспечить ток в нашем провод-

¹ Для переменных сигналов эквивалентом сопротивлений R служит так называемый **импеданс** Z , который учитывает влияние реактивных элементов: емкости C и индуктивности L наряду с активным сопротивлением R . С этим мы познакомимся ниже.

нике именно 1500 А)! Поэтому эквивалентная схема реального источника помимо E содержит еще и внутреннее сопротивление R_i . Обе эти неотъемлемые части вместе и представляют реальный источник.

Рассмотрим действие такого источника. Под действием эдс E ток в цепи протекает не только через R_{np} , но и через R_i , а следовательно закон Ома для полной цепи будет иметь вид

$$E = (R_i + R_{np}) \cdot I = U_i + U_R,$$

где U_i – падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника, а U_R – на нагрузке.

Внутреннее сопротивление небольших элементов питания типа «Duracell» обычно составляет величину 0,1 ... 1,0 Ом, а дисковых («часовых») элементов типа S и SR примерно 5...10 Ом. При подключении в качестве нагрузки соединительного проводника с сопротивлением $R_{np} \sim 10^{-3}$ Ом к элементу с $R_i \sim 1$ Ом отношение $U_R/U_i = 10^{-3}$ и $U_R \approx 1,5$ мВ (проверьте). Таким образом, напряжение на самой нагрузке (на проводнике) будет не более нескольких милливольт, а потому «сварочных» токов явно не получится.

Внимание! Рассмотренный нами пример с *мысленным* подключением проводника к выходным клеммам гальванического элемента пусть не наведет вас на смертельно опасную мысль провести подобный *реальный* эксперимент с другими источниками питания, а тем более с сетью переменного тока!!! Выходные сопротивления лабораторных источников питания (и сети) могут составлять сотые доли Ома, а эдс – десятки и сотни вольт. В этом случае *реальные* токи короткого замыкания действительно могут составлять сотни ампер и ограничены только собственной системой безопасности источников (предохранителями). Но прежде чем она сработает, замыкающий проводник расплавится и взрывным образом разлетится в виде капель расплавленного металла!

3. Источники сигналов и их эквивалентное представление в виде источников напряжения и тока

Использование эквивалентных схем позволяет нам с общих позиций рассмотреть такие различные устройства, как блоки питания, генераторы и различные датчики электрических сигналов (например, фотодиод, сегнетоэлектрический микрофон и т. д.). Основная

задача такого анализа заключается в определении требований, которые мы должны выполнить при подключении соответствующего устройства, чтобы оно правильно реализовало свои функции.

3.1. Эквивалентные источники напряжения и тока

Любой источник электрической энергии (источник питания, генератор или источник сигнала – датчик) может быть представлен в виде эквивалентного источника напряжения, состоящего из идеальной эдс E и внутреннего сопротивления R_i . Но при теоретическом анализе работы схем иногда бывает удобно иметь дело не с источником напряжения, а с источником тока. Подчеркнем, в данном случае речь идет не об изменении свойств и характеристик самого *реального* источника, а о различном способе его *теоретически эквивалентного представления*. Сформулируем следующее утверждение:

реальный источник электрических сигналов для теоретического анализа процессов в нагрузке может быть представлен **в двух эквивалентных формах**: в виде эквивалентного источника напряжения и в виде эквивалентного источника тока (рис. 4 а, б).

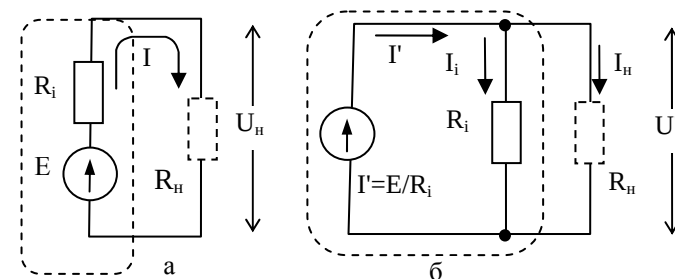


Рис. 4. Эквивалентные источники напряжения (а) и тока (б)

Замена осуществляется по следующим правилам: внутреннее сопротивление источника эдс R_i становится внутренним сопротивлением источника тока, а вместо идеального источника эдс E параллельно R_i изображается идеальный источник тока величиной $I' = E / R_i$ (рис. 4, б). При этом части схемы, выделенные пунктиром, следует воспринимать как единое и неделимое условное изображение эквивалентного источника, состоящее из двух компонент E и

R_i в одном случае, I' и R_i – в другом. **Идеальный источник тока** – это такой источник, который выдает неизменную величину тока $I' = E / R_i$ независимо от величины нагрузки R_n .

Установим, в чем эквивалентна (теоретически равноценна) такая замена по отношению к нагрузке. В схеме рис. 4, а источник напряжения обеспечивает один и тот же ток I через R_i и R_n . Напряжение на нагрузке при этом $U_n = I \cdot R_n$, а ток в цепи $I = E / (R_i + R_n)$.

В свою очередь, источник тока (рис. 4, б) выдает ток $I' = E / R_i$, который разветвляется на два тока: I_i , текущий через внутреннее сопротивление R_i , и I_n , текущий через нагрузку R_n , причем $I' = I_i + I_n$, а отношение токов обратно пропорционально отношению сопротивлений $I_n / I_i = R_i / R_n$.

Эквивалентность источников состоит в трех утверждениях.

Во-первых, **ток в нагрузке в обеих схемах одинаков** (при равных нагрузках R_n). Действительно, ток в схеме источника напряжения $I_n = I = E / (R_i + R_n)$, а ток в схеме источника тока можно определить, воспользовавшись тем, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально сопротивлениям этих ветвей. Учитывая соотношения $I' = I_i + I_n$ и $I' = E / R_i$, получим для тока нагрузки схемы рис. 4, б то же соотношение $I_n = E / (R_i + R_n)$, что и для схемы рис. 4, а (проверьте!).

Во-вторых, **напряжение на нагрузках в обеих схемах одинаково** $U_n = U'_n$, что следует из равенства токов в нагрузках для обеих схем и закона Ома.

В-третьих, **мощность, выделяемая на нагрузке, в обеих схемах одинакова**, что следует из того, что мощность равна произведению тока на напряжение, а токи и напряжения на R_n в обеих схемах одинаковы.

Хотелось бы, однако, отметить и ограничения такого эквивалентного теоретического представления. Если в отношении нагрузки обе схемы ведут себя совершенно одинаково (одинаковы токи, напряжения и выделяемая на нагрузке мощность), то этого нельзя сказать о самих источниках. **Мощность, выделяемая на внутреннем сопротивлении самих эквивалентных источников тока и напряжения, различна.** Действительно, сами внутренние сопротивления эквивалентных источников одинаковы, но токи, текущие через них, различны. В источнике напряжения $I_{in} = I_n = I = E / (R_i + R_n)$. В источнике тока

$$I_i = I' - I_n = \frac{E}{R_i} - \frac{E}{R_i + R_n} = \frac{E}{R_i + R_n} \cdot \frac{R_n}{R_i} = I_{in} \cdot \frac{R_n}{R_i}.$$

Таким образом, в зависимости от соотношения R_n / R_i мощность, выделяемая на внутреннем сопротивлении эквивалентных источников напряжения и тока, получается различной, а потому представление об эквивалентных источниках напряжения и тока нельзя применять для анализа мощности в цепи самих реальных источников.

3.2. Реальные генераторы тока и напряжения. Правила согласования источника с нагрузкой

От теоретически равноценного представления любого источника электрической энергии (питания или сигнала) в виде эквивалентных источников напряжения или тока следует отличать *реальные* генераторы стабильного напряжения и стабильного тока как материальные приборы, обладающие *различными* физическими свойствами.

Самое общее определение генератора:

Генератор сигналов – это устройство, преобразующее энергию источников питания в энергию сигналов различной частоты и формы.

В данном параграфе нас будет интересовать не форма и частота сигналов генераторов, а **правила согласования выхода генератора с нагрузкой**, определяющие его способность обеспечить в нагрузке определенную амплитуду и мощность сигналов.

Широко применяемые современные лабораторные генераторы сигналов типа GFG (серии 8200, 2100) и более старые типа Г6-28, Г4-106 обычно имеют стандартный выход с выходным сопротивлением 50 Ом и максимальной амплитудой сигналов 10...15 В. То есть их можно представить эквивалентной схемой, показанной на рис. 5.

Рассмотрим вопрос о том, что получает нагрузка от генератора

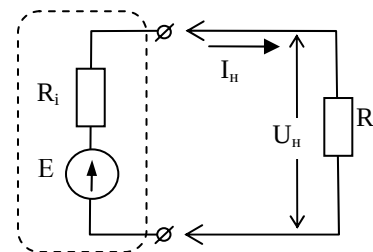


Рис. 5. Эквивалентная схема генератора

при различном отношении R_n / R_i .

1. $R_n \gg R_i$. Если сопротивление нагрузки много больше выходного (внутреннего) сопротивления источника, то напряжение на нагрузке максимально и близко к величине E источника.

Действительно, в этом случае $U_n = E - IR_i$, а $I = E/(R_i + R_n) \approx E/R_n$, т. е. $U_n = E(1 - R_i/R_n) \approx E$. Электрическая мощность, которую отдает источник нагрузке, равна $P_n = U_n I = U_n^2/R_n = I^2 R_n$. Для нашего случая $I = E/(R_i + R_n) \approx E/R_n$ и $P_n = I^2 R_n \approx E^2/R_n$.

Как мы увидим ниже, это не самая большая мощность, которую способен обеспечить генератор при других условиях согласования (при другом отношении R_n/R_i). Таким образом,

при условии $R_n \gg R_i$ **напряжение** на нагрузке U_n близко к максимальному для источника ($U_n \approx E$) и **слабо зависит от изменения нагрузки**. Поэтому источник в этом случае называют **генератором стабильного напряжения**.

Ток, выдаваемый генератором в нагрузку, минимален, а мощность в нагрузке также меньше, чем способен обеспечить генератор при другом R_n/R_i .

2. $R_n \ll R_i$. Аналогичные выкладки показывают (прделайте самостоятельно), что при сопротивлении нагрузки много меньше выходного сопротивления генератора максимально возможным будет **ток**, выдаваемый источником, а выходное напряжение, напротив, минимально:

при условии $R_n \ll R_i$ **ток** в нагрузке I_n близок к максимальному для источника ($I_n \approx E/R_i$) и **слабо зависит от изменения нагрузки**. Поэтому источник в этом случае называют **генератором стабильного тока**.

Напряжение, выдаваемое генератором в нагрузку, минимально, а мощность в нагрузке также меньше, чем способен обеспечить источник.

3. $R_n = R_i$. Это случай для максимальной реализации мощности:

при условии $R_n = R_i$ **мощность** в нагрузке P_n максимальна и равна половине мощности, затрачиваемой источником. (Другая половина мощности расходуется в самом источнике)

Напряжение и ток в нагрузке меньше максимально возможных для источника и их величина меняется при изменении величины нагрузки.

Действительно, при $R_n = R_i$ $I = E/(R_i + R_n) = E/2R_n$, и $U_n = U_i = E/2$, а мощности, выделяемые в нагрузке и на внутреннем сопротивлении источника также равны: $P_n = P_i = E^2/2R_n$.

4. $0,1R_i < R_n < 10R_i$. Если сопротивление нагрузки сравнимо с внутренним сопротивлением источника по порядку величины (составляет величину от 0,1 до 10 R_i) то при изменении нагрузки в этих пределах меняется как напряжение на выходных клеммах источника, так и ток в цепи нагрузки. То есть генератор не является ни источником *стабильного* напряжения, ни источником *стабильного* тока.

Итак,

реальные генераторы могут выполнять функции генератора стабильного тока, генератора стабильного напряжения или генератора мощности в зависимости от соотношения их выходного сопротивления R_i с сопротивлением подключенной к ним нагрузки R_n .

Добавим, что сказанное в данном параграфе справедливо для любого источника электрической энергии, например, для фотодиода. Если мы желаем измерить фотоэдс, возникающую в нем под действием света, то должны позаботиться, чтобы нагрузка (например, входное сопротивление измерительного прибора) имела сопротивление много больше внутреннего эквивалентного сопротивления фотодиода, а для получения максимального фототока должны обеспечить обратное соотношение нагрузки и внутреннего сопротивления.

3.3. Примеры, поясняющие важность выполнения условия согласования источника с нагрузкой

1. Как известно, напряженность электрического поля вблизи поверхности Земли при хорошей погоде (сухой воздух и отсутствие облаков) примерно равна 150...300 В/м. Отсюда следует, что разность потенциалов (напряжение) на высоте нашего роста примерно равна 300 В! Почему нас «не убивает»? Причину легко понять при использовании представления источника (атмосферного поля) и нагрузки (нашего тела) в виде эквивалентного источника эдс (рис. 5). Его параметрами будут $E = 300$ В и сопротивление, определяемое сопротивлением столба воздуха, равного нашему росту $R_i \sim 10^{14}$ Ом. Сопротивление нашего тела (нагрузки) $R_n \sim 10^5$ Ом. Если вы освоили этот параграф, то легко сообразите, что доля напряжения атмосферного поля, приходящаяся на наше тело, составляет величину порядка $R_n/R_i \approx 10^{-9}$, что неощутимо мало для того, чтобы мы почувствовали действие этого поля.

2. Попробуйте ответить на следующий вопрос. Если речь идет не об использовании атмосферного поля Земли в качестве источника электрической энергии, а об измерении его величины, то можно ли провести это измерение, взяв обычный вольтметр и подсоединив одну его клемму к земле, а вторую с помощью соединительного проводника поднять на высоту 1 м над землей? Ответ на этот вопрос вы проверите после выполнения работы, когда будете лучше знать параметры вольтметров.

3.4. Способы обеспечения работы генераторов в режиме стабильного напряжения или тока

Мы показали, что при условии $R_n \gg R_i$ напряжение на нагрузке U_n близко к максимальному для источника ($U_n \approx E$) и слабо зависит от изменения нагрузки, т. е. генератор работает в режиме стабилизации выходного напряжения. И наоборот, в случае $R_n \ll R_i$ генератор работает в режиме источника стабильного тока по отношению к нагрузке. Но на практике выходное сопротивление генератора и сопротивление нагрузки (входное сопротивление подключаемого к генератору устройства) уже заданы. Что делать, если соотношение этих величин не удовлетворяет нужным условиям (стабилизации выходного напряжения или тока)?

Оказывается, во многих случаях нужный режим выхода генератора можно все-таки выполнить ценой уменьшения его максимального выходного напряжения. Простейший способ решения задачи заключается в следующих приемах.

1. Генератор стабильного тока. Пусть сопротивление нагрузки равно $R_n = 1$ кОм, и нам нужно, чтобы ток через него не изменялся при изменении нагрузки в пределах $\pm 10\%$. (Точнее сказать, чтобы изменение тока через нагрузку не превышало $\pm 1\%$ при изменении самой нагрузки на $\pm 10\%$). Выходное сопротивление генератора равно 50 Ом.

Если нагрузку подключить к генератору через последовательное сопротивление $R_d = 10 \cdot R_n = 10$ кОм (рис. 6, а), то получим новый генератор с выходным сопротивлением 10 кОм (рис. 6, б) и при изменении нагрузки в пределах $\pm 10\%$ ($R_n = 1 \pm 0,1$ кОм) ток через нагрузку практически не будет меняться.

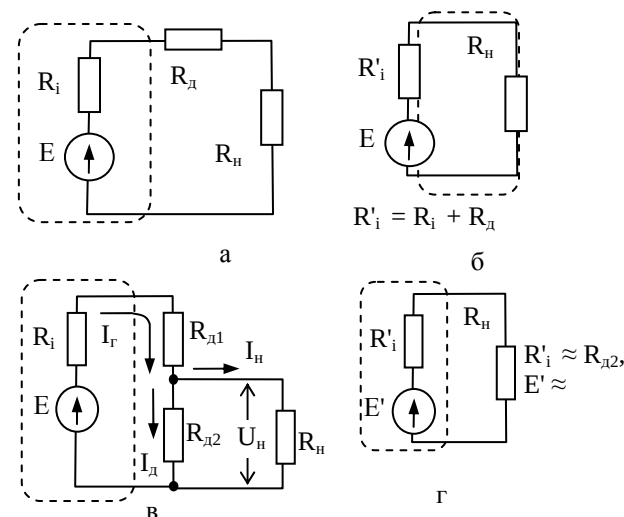


Рис. 6. Преобразование генератора
а, б – генератор стабильного тока;
в, г – генератор стабильного напряжения

Конечно, максимальное выходное напряжение, которое способен обеспечить генератор в нагрузке, уменьшится примерно в 10 раз (проверьте).

2. Генератор стабильного напряжения. Задача уменьшения выходного сопротивления генератора, необходимая для обеспечения режима стабильного напряжения ($R_n \gg R_i$), решается аналогично. Только сейчас между генератором и нагрузкой нужно включить не добавочное сопротивление, а делитель напряжения, показанный на рис. 6, в. Если величина $R_{d2} \ll R_n$ и R_i , то она будет новым выходным сопротивлением преобразованного генератора (рис. 6, г) и условие стабильности напряжения (независимости от величины незначительного изменения нагрузки) будет выполнено.

Пример выбора делителя. Пусть нагрузка составляет $R_n = 20$ Ом, и необходимо выполнить условие $R_n \gg R_i$. Если новое выходное сопротивление генератора будет равно $0,1R_n$, то выходное напряжение генератора будет стабильным с точностью 1 % при изменении нагрузки на $\pm 10\%$ (проверьте). Выберем $R_{d2} = 0,1R_n = 2$ Ом. Для выбора величины R_{d1} мы имеем два условия. С одной стороны, чем

больше отношение $(R_i + R_{д1})/R_{д2}$, тем стабильнее величина тока $I_{д}$ через $R_{д2}$. А значит, точнее поддерживается неизменным напряжение на $R_{д2}$ и R_n . С другой стороны, чтобы генератор мог отдавать максимальную мощность в нагрузку, нельзя выбирать величину $R_{д1}$ слишком большой. Поэтому выберем $R_{д1} = R_i$.

3.5. Определение выходного сопротивления генератора

Если эквивалентное выходное сопротивление генератора (или другого источника сигнала, например, фотоэлемента) неизвестно, то его можно измерить следующим образом.

1-й способ. Обычно выходное сопротивление источника сигналов $R_{вых} = R_i$ мало по сравнению с входным сопротивлением измерителей напряжения $R_{вх} = R_n$. В параграфе 3.2 было показано, что при $R_i \ll R_n$ выходное напряжение источника с высокой точностью равно эдс E . Измеренное таким образом напряжение (при условии $R_i \ll R_n$) называют *напряжением холостого хода* и обозначают U_{xx} . При обратном соотношении $R_i \gg R_n$, напротив почти все напряжение источника будет падать на его внутреннем сопротивлении, а ток, выдаваемый источником, будет максимальным. Этот ток (при $R_n \rightarrow 0$) называют *током короткого замыкания* и обозначают $I_{кз}$. Очевидно, что отношение $U_{xx} / I_{кз} = R$ будет равно выходному сопротивлению источника $R = R_i$. Схема для определения выходного

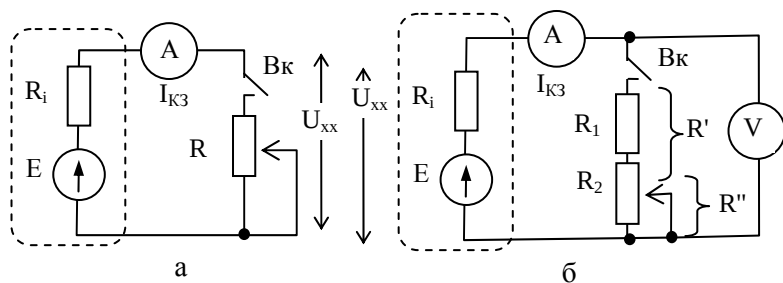


Рис. 7. Измерение выходного сопротивления источника R_i

сопротивления данным способом изображена на рис. 7, а. Сначала при выключенном Вк измеряется U_{xx} . Затем включают Вк и, уменьшая сопротивление резистора, измеряют ток $I_{кз}$.

Внимание: прежде чем включать Вк, убедитесь, что переменный резистор R поставлен в положение максимального сопротивления.

Иначе ток может оказаться больше того, на который рассчитан измеритель А, и последний выйдет из строя.

2-й способ. Для источников, способных выдать большой ток, первый способ может оказаться неприемлемым из-за слишком больших токов $I_{кз}$. В этом случае последовательно с переменным резистором R_2 устанавливают постоянный резистор R_1 , ограничивающий максимальный ток I . Если выходное сопротивление источника ориентировочно известно, то величину R_1 выбирают меньше R_i , а величину R_2 такой, чтобы $R_1 + R_2 = (1,5...2)R_i$. При отключенном Вк измеряют значение U_{xx} . Включив Вк, уменьшают сопротивление R_2 до тех пор, пока напряжение на выходе не будет равно $U_{xx}/2$. Измеряют получившееся суммарное сопротивление $R' + R''$. Очевидно, что в этом случае $R_i = R' + R''$.

4. Источники питания

4.1. Виды источников питания

Широко распространенными источниками питания являются гальванические элементы (ГЭ), аккумуляторы и сетевые блоки питания (выпрямители, стабилизаторы). В лаборатории мы имеем дело с ГЭ и сетевыми блоками питания.

Гальванический элемент – это химический источник электриче-

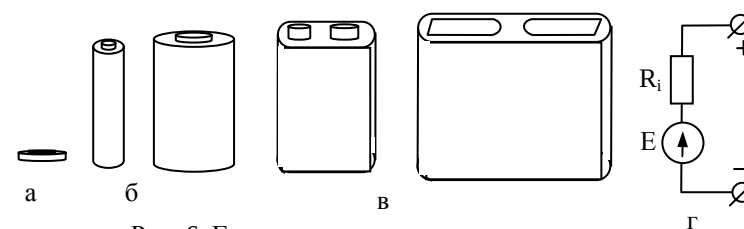


Рис. 6. Гальванические элементы:
а – дисковые; б – цилиндрические; в – прямоугольные

ской энергии, действие которого основано на возникновении разности потенциалов между двумя электродами из разнородных проводников, помещенных в электролит. Раствор электролита в современных ГЭ адсорбирован специальными порошкообразными или желеобразными материалами – сепараторами и поэтому современные ГЭ называются «сухими». ГЭ различаются по электрическим параметрам

рам и конструкции. Конструктивно различают дисковые, цилиндрические и прямоугольные ГЭ (рис. 6).

По материалам электродов и составу электролита различают следующие элементы (в скобках – эдс): угольно-цинковые (1,5 В), щелочные (1,6 В), ртутные (1,45 В), литиевые (1,5 и 3,0 В), серебряные (1,7 В) и др. Из отдельных ГЭ могут формироваться батареи элементов (последовательно либо параллельно соединенных), конструктивно выполненные в едином корпусе (типа: «Крона» – 9 В, батарея 3336 – 4,5 В).

Эквивалентная схема ГЭ изображена на рис. 6, г: внутреннее сопротивление R_i определяется сопротивлением электролита, а эдс E – электрохимическим потенциалом электродов. Внутреннее сопротивление дисковых ГЭ обычно составляет 5...10 Ом, а небольших цилиндрических («пальчиковых») типа «Duracell» и прямоугольных (типа «Крона», 3336) – 0,1... 1,0 Ом.

Аккумуляторы отличаются от ГЭ тем, что допускают перезарядку, т. е. «восстановление» израсходованного заряда от внешних источников электрической энергии (например, от сетевого блока питания). Внутреннее сопротивление аккумуляторов может быть весьма малым, так что в отличие от ГЭ даже кратковременное короткое замыкание может привести к их разрушению. Небольшие аккумуляторы по внешнему виду могут быть похожи на ГЭ, поэтому отличать их от ГЭ приходится по маркировке, а не по внешнему виду. Их эквивалентная схема та же, что и для ГЭ.

4.2. Сетевые блоки питания. Стабилизаторы напряжения и стабилизаторы тока

Сетевые блоки питания – основной вид источников питания, либо включенных в приборы в качестве внутреннего узла, либо оформленных в виде отдельного прибора – лабораторного блока питания (БП). Условная функциональная схема **лабораторных БП** изображена на рис. 8, а и обычно включает следующие узлы:

- преобразователь величины напряжения сети (обычно трансформатор Tr);
- выпрямитель (преобразователь переменного напряжения в постоянное);
- устройства стабилизации напряжения и / или тока $Ст$;

– устройства установки величины выходного напряжения U и тока I .

Сетевой выпрямитель обеспечивает постоянное напряжение U_+ в точках АВ схемы (рис. 8, а). Его уже можно было бы использовать для питания цепей в качестве источника с эдс E и внутренним сопротивлением R_i . Однако выходное напряжение и ток такого источника энергии сильно зависели бы от величины подключаемой нагрузки, как было показано в п. 3.2. На практике часто необходимо, чтобы источник гарантированно поддерживал с заданной точностью либо стабильный (неизменный) ток в цепи нагрузки $I_{ст}$, либо стабильное напряжение на ней $U_{ст}$ при изменении самой нагрузки в заданных пределах. Поэтому лабораторные БП включают дополнительные узлы (справа от точек АВ на рис. 8, а), позволяющие использовать их в качестве стабилизаторов напряжения либо стабилизаторов тока.

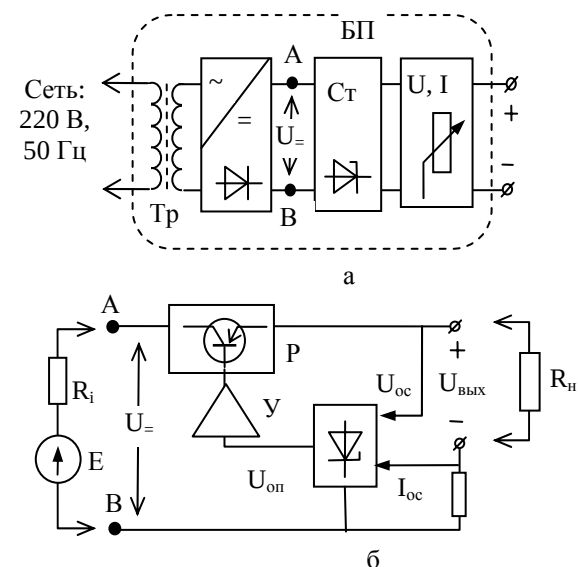


Рис. 8. Лабораторный блок питания:
а – условная функциональная схема БП;
б – функциональная схема стабилизатора

Стабилизатор тока – это устройство, поддерживающее заданный неизменный ток $I_{ст}$ на нагрузке при изменении ее величины (в установленных пределах).

Стабилизатор напряжения – это устройство, поддерживающее заданную неизменную величину напряжения $U_{\text{ст}}$ на нагрузке при изменении ее величины (в установленных пределах).

Очевидно, что *одновременно* эти требования соблюсти невозможно (примените закон Ома для проверки этого утверждения). Практические электронные схемы таких стабилизаторов весьма разнообразны, поэтому не имеет особого смысла рассматривать какую-нибудь одну из них. Нам достаточно представить их некоторой эквивалентной схемой, которая адекватно отображает **функциональные** свойства подобных источников.

Функциональная схема стабилизатора показана на рис. 8, б. Между источником $U_{\text{н}}$ (точки АВ на рис. 8, а) и выходом БП включен регулирующий элемент Р (рис. 8, б). С выхода БП снимаются сигналы обратной связи $U_{\text{ос}}$ и $I_{\text{ос}}$ и сравниваются с калиброванным опорным напряжением $U_{\text{ос}}$. Разница между этими сигналами и опорным напряжением усиливается усилителем У и поступает на регулирующий элемент Р, который восстанавливает выходное напряжение (или ток) таким образом, чтобы он соответствовал заданным величинам $U_{\text{ст}}$ или $I_{\text{ст}}$.

5. Основные законы и элементы линейных цепей постоянного и переменного тока

Электрическая цепь – это цепь, в которой протекают токи и на элементах которой существуют напряжения (разность потенциалов). Основные элементы цепей представлены на рис. 9. Элементы R , C , L и M (рис. 9, а) называются *пассивными*, а источники питания ГЭ, E и I (рис. 9, б) – *активными*.

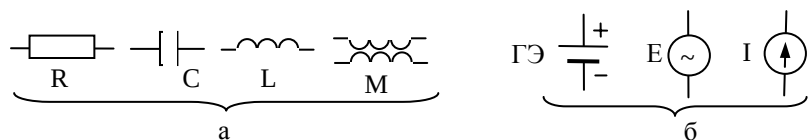


Рис. 9. Основные элементы линейных цепей: а – пассивные; б – активные

Цепь называется *линейной*, если значения величин R , C , L и M не зависят от величин напряжений на них и токов, текущих через них.

5.1. Обозначения и единицы измерения основных элементов линейных цепей

Условно на электротехнических схемах сопротивление R , емкость C , индуктивность L и взаимная индуктивность M (идеальный трансформатор N_1/N_2) изображают, как показано на рис. 9, а.

Нужно только знать, что это *идеальные эквивалентные* изображения соответствующих *материальных* деталей – резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности и катушек взаимной индуктивности. Чем они отличаются (материальные детали от их эквивалентных идеальных представлений)? Тем же, чем реальные источники питания отличаются от идеальных источников напряжения E и тока I , о которых мы говорили в параграфе 1.3: реальные детали представляются в схемах (когда в этом есть необходимость) не единственным элементом, а соответствующей *схемой замещения* из «набора» идеальных элементов.

Поясним отличие идеальных элементов от материальных деталей на двух примерах. Идеальный элемент индуктивности L обычно реализуется материальной деталью, называемой катушка индуктивности. Она представляет собой некоторое число витков медного провода (иногда 1000 и более!), намотанных на цилиндрическом каркасе. Сам провод имеет сопротивление, а потому эквивалентная схема замещения реальной катушки индуктивности должна содержать не только элемент L , но и R (рис. 10, а). Кроме того, между витками (и слоями витков) такой катушки реализуется распределенная емкость C . Поэтому на высоких частотах схема замещения катушки индуктивности содержит и C (рис. 10, б).

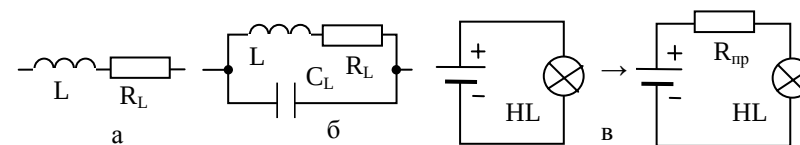


Рис. 10. Схемы замещения катушки индуктивности и проводника

Другой пример. Выше мы уже использовали обычное изображение электрических схем, например, схема для измерения тока и напряжения в цепи с электрической лампочкой на рис. 3. Все элементы цепи (источник питания, лампочка, амперметр и вольтметр) соединены между собой проводниками. Но реальные проводники все-

гда обладают конечным сопротивлением, которое на схемах обычно не показано!

Следовательно, на схемах мы изображаем не реальные проводники, а их эквивалентное идеальное представление – соединительную линию, не имеющую сопротивления.

В некоторых случаях сопротивление реального проводника необходимо учитывать (например, в тех случаях, когда оно сравнимо с внутренним эквивалентным сопротивлением самих соединяемых приборов и элементов). В этом случае на соответствующей соединительной линии нужно изобразить еще одно сопротивление, равное по величине сопротивлению проводника $R_{пр}$ (рис. 10, в).

Ниже в таблице приведены названия деталей, соответствующие им эквивалентные идеальные элементы и единицы их измерения.

Физическая деталь	Эквивалентный элемент	Основная единица	Производные единицы
Резистор	Сопротивление, R	Ом (Ω)	кОм (10^3), Мом (10^6), Гом (10^9)
Конденсатор	Емкость, C	Фарада (Ф, F)	мкФ (10^{-12}), нФ (10^{-9}), мФ (10^{-6})
Катушка индуктивности	Индуктивность, L	Генри (Гн, H)	мкГн (10^{-6}), мГн (10^{-3})
Катушка взаимной индуктивности (идеальный трансформатор)	Взаимоиндуктивность, M , (коэффициент трансформации, N_1/N_2)	Генри (Гн, H)	мкГн (10^{-6}), мГн (10^{-3})
Источник напряжения	Источник эдс, E	Вольт (В, V)	мкВ (10^{-6}), мВ (10^{-3}), кВ (10^3)
Источник тока	Источник тока, I	Ампер (А)	мкА (10^{-6}), мА (10^{-3}), кА (10^3)

Для производных единиц используются следующие приставки к названию основной единицы:

множитель	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	$10^0=1$	10^3	10^6	10^9	10^{12}
приставка	пико	нано	микро	милли	осн.ед.	кило	мега	гига	тера
обозначение	п, р	н, п	мк, μ	м, m		k	M	Г, G	T

5.2. Расчет цепей постоянного тока

Простейшие расчеты цепей основаны на трех следующих законах.

1. Закон Ома для участка цепи, не включающем в себя источников сторонних эдс, связывает падение напряжения U на суммарном сопротивлении этого участка R при протекании по нему тока I : $U = RI$ (рис. 11, а).

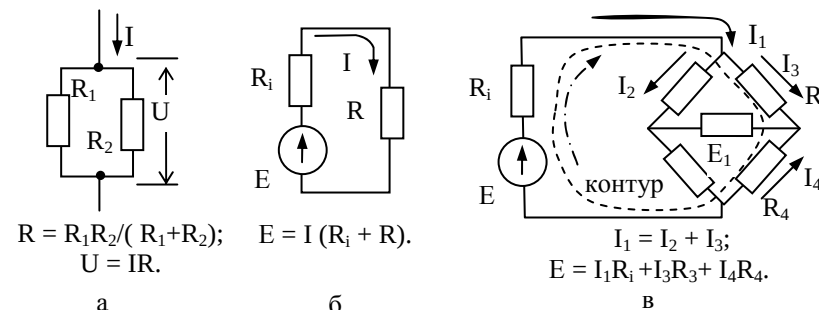


Рис. 11. Законы Ома и Кирхгофа:

а – закон Ома для участка цепи; б – закон Ома для полной цепи; в – законы Кирхгофа

Для полной цепи (с внешним источником эдс E – рис. 11, б) закон Ома имеет вид

$$E = (R + R_i)I.$$

Для сложных разветвленных цепей из закона Ома и закона неразрывности токов вытекают два простых закона Кирхгофа.

2. Первый закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, втекающих в некоторый узел, равна сумме токов, вытекающих из него (рис. 11, в):

$$\sum I = 0.$$

3. Второй закон Кирхгофа: алгебраическая сумма всех падений напряжения в каком-либо замкнутом контуре равна алгебраической сумме всех эдс вдоль данного контура (рис. 11, в):

$$\sum IR = \sum E, \quad \text{или} \quad \sum U = \sum E, \quad \text{или} \quad \sum (E - U) = 0.$$

При обходе контура нужно соблюдать правило знаков: если падение напряжения или эдс совпадают по знаку с выбранным направлением обхода, то данное слагаемое берется со знаком плюс, не совпадают – минус, как показано на рис. 11, в.

5.3. Основные параметры переменного тока

Постоянный ток характеризуется только двумя параметрами – величиной тока (напряжения) и его направлением (полярностью). *Переменный ток* для своего описания требует введения целого ряда других параметров, число которых зависит от формы переменного тока. Мы будем пользоваться в своем описании главным образом гармоническими токами.

Гармоническими называются периодические функции, значение которых изменяется с течением времени по закону синуса или косинуса. Они могут быть записаны в форме: $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ или $x = A \cos(\omega t + \varphi)$, где x – значение колеблющейся величины в данный момент времени t (для механических величин, например, смещение или скорость, для электрических – напряжение или сила тока), A – амплитуда колебаний, ω – угловая частота колебаний, $(\omega + \varphi)$ – фаза колебаний, φ – начальная фаза колебаний. В технической литературе наряду с термином «гармонические величины» часто в качестве синонима используется термин «синусоидальные величины».

Главенствующая роль гармонических сигналов определяется двумя факторами: 1) они наиболее часто используются на практике, 2) любой периодический импульсный ток, какой бы сложной ни была форма импульсов, можно разложить в спектр Фурье, т. е. представить в виде суммы синусоидальных сигналов различной частоты и фазы. А затем «отслеживать», как данная цепь откликается на каждую составляющую спектра.

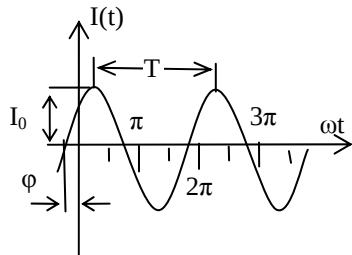


Рис. 12. $I(t) = I_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

Примечание: последнее утверждение полностью справедливо только для линейных цепей, для цепей с нелинейными элементами разложением в ряд Фурье нужно пользоваться с осторожностью.

Форма синусоидального тока представлена на рис. 12. Его основными параметрами являются амплитуда I_0 , частота (линейная f и круговая $\omega = 2\pi f$), начальная фаза φ , полная фаза $(\omega t + \varphi)$, период колебания T . Основные соотношения для этих величин:

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad U(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}.$$

Кроме амплитуды, переменный ток характеризуется *действующим* (среднеквадратичным, эффективным) и *средним* (среднеарифметическим) значениями. Для синусоидальных токов действующее I_0 и среднее I_{cp} значения определяются формулами:

$$I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_0 \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_0, \quad I_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_0^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0.$$

Примечание. В современных осциллографах часто вводят еще одну величину «Pk-Pk», т. е. «от пика до пика», которая называется также «двойной размах». Для чисто синусоидального сигнала она равна удвоенной амплитуде. Отдельный смысл она приобретает в тех случаях, когда на переменное напряжение накладывается постоянная составляющая или когда периодический сигнал имеет сложную форму.

Соответствующие формулы для синусоидального *напряжения* получаются заменой I на U . Для сигналов другой (несинусоидальной) формы интегральная запись среднего и среднеквадратического значений остается верной, но коэффициенты (численные соотношения) между амплитудным, средним и среднеквадратическим значениями будут другими.

Что измеряют приборы (вольтметры, амперметры) переменного тока? Вопрос о том, какую из величин – амплитудную, среднюю или среднеквадратическую – измеряет прибор, в настоящее время приобретает важное значение, поскольку современные мультиметры, как правило, цифровые приборы, в которых измеряется одно из трех значений (например, среднеквадратическое), а остальные два индицируются на шкале прибора путем пересчета измерен-

ного значения с помощью *коэффициента формы* (или *коэффициента амплитуды*).

Коэффициентом формы k_ϕ называется отношение действующего значения периодической функции к ее среднему за полпериода значению:

$$k_\phi = \frac{I_\phi}{I_{cp}}; \quad \text{для синусоидальной функции} \quad k_\phi = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Коэффициентом амплитуды k_a называется отношение амплитудного значения периодической функции к ее действующему (среднеквадратическому) значению:

$$k_a = \frac{I_0}{I_\phi}; \quad \text{для синусоидальной функции} \quad k_a = \sqrt{2} = 1,41.$$

Коэффициент формы *несинусоидальной функции*:

$$k'_\phi = \frac{I_\phi}{|I|_{cp}}.$$

где $|I|_{cp}$ – среднее по модулю значение функции.

Зачем нужно знание различных величин (U , U_{cp} или U_ϕ)? Причина в том, что различные физические устройства «реагируют» на различные значения переменного тока. Например, мощность, выделяемая на сопротивлении (на активной нагрузке), пропорциональна *действующему* значению синусоидального тока. Действительно, количество теплоты, выделяемое на R за период равно:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \sin \omega t \cdot I_0 \sin \omega t dt = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_0}{\sqrt{2}} = U_\phi I_\phi = I_\phi^2 R.$$

Это соотношение используют для определения физического смысла действующего (эффективного, среднеквадратического) значения переменного тока, даже если периодический сигнал имеет сложную форму:

действующее (эффективное) значение переменного тока – это такая величина тока, которая оказывает то же тепловое действие на активное сопротивление, какое оказывает постоянный ток, равный по величине действующему значению переменного.

На действующее значение тока «реагируют» вольтметры (амперметры) *электромагнитной* и *электростатической* системы, ваттметры, измерительные приборы *теплового* типа. Вольтметры (амперметры) *магнитоэлектрической* системы реагируют на постоянный ток, а с выпрямительным диодом – на среднее (среднеарифметическое, а не среднеквадратическое) значение переменного тока.

5.4. Расчет цепей переменного тока.

1. Емкость и индуктивность в цепи переменного тока. Конденсатор в идеале представляет собой две пластины, разделенные диэлектриком – непроводящей средой. Поэтому для постоянного тока конденсатор представляет собой разрыв цепи, и постоянный ток через него не проходит. Однако в первый момент после включения источника постоянного тока (рис. 13, а) ситуация иная: конденсатор начинает заряжаться и в цепи потечет ток заряда $I(t)$. Изменение заряда и напряжения на конденсаторе (рис. 13, б) описывается формулами

$$U(t) = E(1 - e^{-t/RC}) = U_c(t), \quad q = U_c C,$$

где $R = R_i$ – внутреннее сопротивление источника напряжения, C – емкость конденсатора, q – заряд на конденсаторе, $U_c(t)$ – напряжение на конденсаторе, $E = E_-$ – постоянная эдс источника.

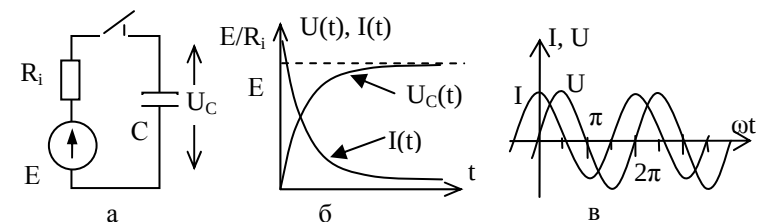


Рис. 13. Конденсатор в цепи постоянного и переменного тока

Когда конденсатор зарядится, напряжение на нем станет равно величине $U_c = E$ и ток в цепи прекратится (вспомните второй закон Кирхгофа: действующее напряжение в контуре равно разности источника эдс E и падения напряжения на элементах цепи; в данном случае $E - U_c = 0$ и «причина» тока в цепи исчезла).

Ток зарядки максимален в момент включения и ограничен только величиной сопротивления R_i ($I_{нач} = E / R_i$), а затем экспоненциально уменьшается (рис. 13, б). Поэтому говорят, что конденсатор в первый момент после включения источника эдс представляет собой «короткое замыкание». В процессе зарядки ток максимален при минимальном напряжении на конденсаторе и минимален – при максимальном.

Если источник постоянной эдс заменить источником синусоидального напряжения $E = E_0 \sin \omega t$, то конденсатор будет периодически заряжаться и разряжаться, так что *переменный ток через конденсатор течет непрерывно*. При этом прежнее условие относительно сдвига максимума и минимума тока и напряжения перейдет в новое: ток через конденсатор опережает по фазе напряжение на $\pi/2$ (рис. 13, в):

$$I_C(t) = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CU_0 \sin \omega t) = \omega CU_0 \cos \omega t = \omega CU_0 \sin(\omega t + \pi/2).$$

Если обозначить величину $1/(\omega C) = R_C$, то легко увидеть, что амплитуда тока через конденсатор связана с амплитудой напряжения на нем соотношением

$$I_{C0} = U_{C0}/R_C, \quad R_C = 1/(\omega C),$$

которое соответствует *закону Ома для переменного тока*.

Величину R_C по аналогии называют сопротивлением конденсатора переменному току. В отличие от сопротивления резистора величина сопротивления конденсатора зависит не только от емкости C , но и от частоты переменного тока ω : чем больше ω , тем меньше сопротивление емкости переменному току. (Для запоминания можно сформулировать себе фразу: «С ростом частоты сопротивление конденсатора стремится к нулю»). Кроме того, следует заметить, что в отличие от активного сопротивления на емкости не происходит выделения тепловой энергии, энергия попеременно накапливается в нем (при зарядке конденсатора) и отдается обратно в цепь (при разрядке).

Индуктивность L в цепи переменного тока ведет себя дуально (противоположно) по отношению к емкости. Физическая причина этого заключается в дуальности свойств электрического и магнитного поля и в том, что емкость характеризует способность запасать в себе электрическую энергию, а индуктивность – магнитную. Поэтому мы не будем повторять для индуктивности все рассуждения,

проделанные по отношению к емкости, а ограничимся констатацией результатов в виде следующих правил:

	Емкость	Индуктивность
1.	Запасает электрическую энергию W_C	Запасает магнитную энергию W_L
2.	$W_C = CU^2/2$	$W_L = LI^2/2$
3.	Для постоянного тока – разрыв цепи	Для постоянного тока – короткое замыкание
4.	Ток опережает напряжение на $\pi/2$	Ток отстает от напряжения на $\pi/2$
5.	Сопротивление переменному току обратно пропорционально частоте $R_C = 1/(\omega C)$ С ростом частоты $R_C \rightarrow 0$.	Сопротивление переменному току прямо пропорционально частоте $R_L = \omega L$ С ростом частоты $R_L \rightarrow \infty$.

Выпишем в явном виде зависимость падения напряжения на индуктивности от тока через нее (закон Ома для переменного тока):

$$U_L(t) = L \frac{dI}{dt} = \omega LI_0 \cos \omega t = \omega LI_0 \sin(\omega t + \pi/2).$$

2. Векторное изображение синусоидально изменяющихся величин. Поскольку токи и напряжения на реактивных элементах (емкости и индуктивности) не совпадают по фазе, то при расчете цепей переменного тока нужно учитывать как амплитуду, так и фазу токов и напряжений. Существует довольно простой способ одновременного учета величины и фазы синусоидальных по форме сигналов. Он основан на использовании векторного изображения синусоидальных величин. Мы проиллюстрируем этот метод на примере цепи, показанной на рис. 14, а.

Через элементы последовательной цепи, изображенной на рисунке, течет один и тот же ток I . Падение напряжения на сопротивлении $U_R = RI$ и совпадает по фазе с током. Будем откладывать его вместе с током I по оси x (рис. 14, б).

Напряжение на индуктивности равно по модулю $U_L = \omega LI$ и опережает ток на $\pi/2$, поэтому откладывается на оси y в положительном направлении. Напряжение на емкости равно по модулю $U_C = I/(\omega C)$ и отстает от тока на $\pi/2$, поэтому откладывается по оси y в отрицательном направлении (рис. 14, б).

А далее суммируем падения напряжения на соответствующих элементах по законам векторного сложения (по правилам «параллелограмма сил»), как показано на рис. 14, б. Сначала напряжение на сопротивлении складываем с напряжением на индуктивности, получая вектор $U_L + U_R$, а затем складываем его с вектором U_C . В

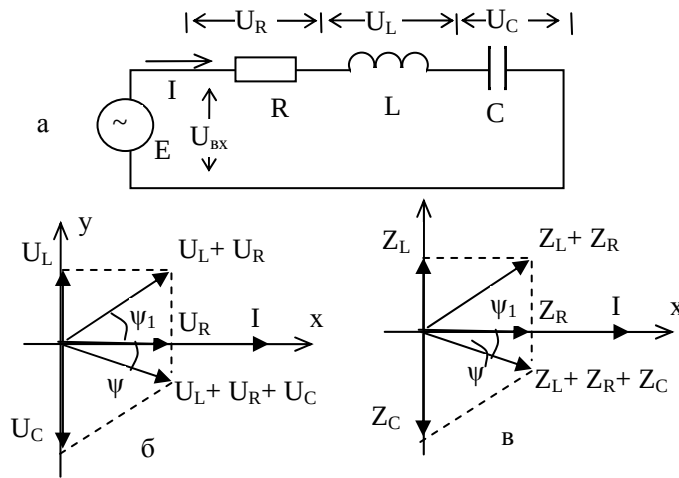


Рис. 14. Расчет напряжений и импедансов

результате мы получаем вектор $U_L + U_R + U_C$, равный сумме падений напряжения на всех трех элементах цепи.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа он равен напряжению внешнего источника: $U_L + U_R + U_C = U_{BX}$. Угол ψ , получившийся в результате векторного сложения, равен углу сдвига фаз между током и входным напряжением. Его величина определяется применением правил тригонометрии к треугольникам, изображающим напряжения на различных элементах цепи (рис. 14, б). Например, угол ψ_1 определяется из соотношения $\tan \psi_1 = U_L/U_R = \omega L/R$.

В данном случае соотношение величин R , L и C таково, что ток в цепи *отстает* от входного напряжения на угол ψ . Поэтому можно сделать вывод, что полное сопротивление данной цепи в целом носит *индуктивный* характер. Для простоты мы считали, что внутреннее сопротивление источника E равно нулю, тогда $U_{BX} = E$. Учет R_i приведет к тому, что $U_{BX} = E - IR_i$.

Теперь мы можем уточнить понятие «сопротивление» для элементов цепей переменного тока. Поскольку сопротивление реактивных элементов характеризуется не только величиной, но и углом сдвига фаз между током и падением напряжения на данном элементе, *полное* сопротивление принято называть **импедансом**. Поэтому введенные выше обозначения R_C и R_L на самом деле являются модулем соответствующих импедансов:

$$|Z_R| = R; \quad |Z_C| = R_C = 1/(\omega C); \quad |Z_L| = R_L = \omega L.$$

Соответствующие сдвиги фаз между током и напряжением на этих элементах, равные $\pi/2$ с нужным знаком $+$ или $-$, выписаны выше в таблице.

Заметим, что импеданс суммы различных элементов (например R и L) уже не может быть определен как сумма их импедансов. Для определения общего импеданса цепи, как и суммы импедансов любых двух элементов, нужно воспользоваться методом *векторного* сложения, как показано на рис. 14, в. Действительно, если разделить U_L , U_R и U_C на ток I , проходящий через каждый элемент, то вместо напряжений по осям x и y будут отложены соответствующие импедансы.

6. Измерения: основные определения

Принципиальное положение всей теории измерений заключается в том, что измерительный прибор в идеале не должен вносить никакого изменения в действие схемы, в которой производятся измерения.

В *экспериментальной* физике положение «в идеале не вносит» означает «вносит минимальные или строго контролируемые и известные по величине изменения».

6.1. Общая классификация измерений

Измерение – нахождение значения физической величины экспериментальным путем с помощью специальных технических средств.

По способу получения результата измерения бывают *прямые*, *косвенные* и *совокупные* (соединение двух первых). *Прямые* измерения – измерения непосредственно той физической величины, которая нас интересует. *Косвенные* измерения – определение интересующей нас величины по прямым измерениям других величин, связанных с искомой известными функциональными зависимостями.

По методам измерения делятся на два основных класса – метод непосредственной оценки и метод сравнения.

Метод непосредственной оценки – получение значения всей измеряемой величины по показаниям прибора, шкала которого отградуирована в единицах измерения данной величины. Вторичные эталонные меры единиц при этом применяются не непосредственно для измерения интересующей нас величины, а лишь в процессе градуировки самих измерительных приборов.

Пример метода непосредственной оценки: измерение температуры с помощью термодпары, подсоединенной к стрелочному прибору, шкала которого отградуирована в значениях температуры.

Методы непосредственной оценки – самые быстрые и «массовые», но точность и надежность полученных результатов зависят от ряда приводящих факторов.

Метод сравнения основан на сравнении измеряемой величины с эталонной величиной *той же самой физической природы*, причем, как правило, оценивается лишь часть измеряемой величины. К методам сравнения относятся:

- дифференциальные методы (измеряется разность между измеряемой величиной и образцовой мерой);
- нулевые методы (разность дифференциального метода сводится к нулю);
- методы замещения (измеряемую величину заменяют в установке образцовой мерой и добиваются того же результата показаний приборов установки).

6.2. Преимущества компенсационных измерений

К методам сравнения, применяемым в данной лаборатории, относятся **компенсационные** методы (мосты и потенциометры), которые по указанной классификации можно отнести к «дифференциальным нулевым методам».

Различие компенсационных методов и методов непосредственной оценки покажем на примере двух типов измерителей массы тел. В пружинных весах (динамометрах рис. 15, а) мы измеряем массу тела методом уравнивания его веса силой упругости пружины. Это метод *непосредственной оценки*. Шкала динамометра заранее отградуирована в единицах массы по образцовым мерам массы. Но действие интересующей нас величины – массы – компенсируются действием силы упругости пружины, т. е. физической величины *другой* природы (масса тела сравнивается с упругостью пружины).

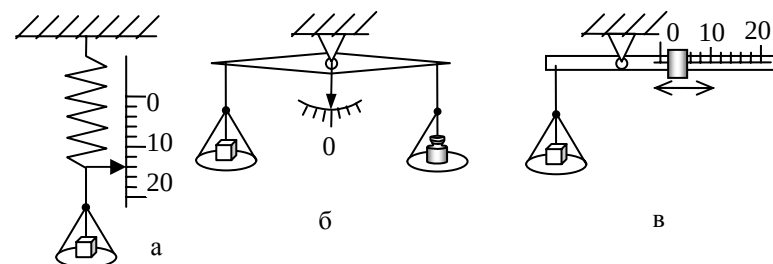


Рис. 15. Методы измерения массы

При использовании рычажных весов с гирями вся масса тела (в равноплечих весах – рис. 15, б) или ее часть (в случае так называемого «безмена» – рис. 15, в) сравнивается непосредственно с образцовой массой – гирей. (В безмене положение гири, т.е. длину плеча рычага, можно изменять). Поэтому данный метод измерения массы относится к *методам сравнения*.

Важное отличительное свойство компенсационных методов проиллюстрируем следующим примером. Если мы перенесем весы всех трех типов в лунную лабораторию, то рычажные весы будут действовать по-прежнему, а динамометр будет давать ошибочные результаты. Его придется вновь калибровать эталонами массы или вносить поправки в его показания на изменение ускорения свободного падения на Луне по сравнению с Землей.

Обобщая, можно сказать: изменение *некоторых* условий в процессе измерения может внести существенные ошибки в методы непосредственной оценки, но никак не скажется на результатах измерений компенсационными методами. Конечно, это не означает, что *любые* изменения физических условий не сказываются на результатах компенсационных измерений.

6.3. Погрешности измерения. Правила записи результатов измерений

1. Погрешности измерения. Любое экспериментальное измерение физической величины может быть произведено не «абсолютно точно», а лишь с точностью до гарантированной данным экспериментом *величины погрешности*. Нужно понимать, что это положение обусловлено не только недостаточной точностью измерительных приборов, но и тем, что физические условия, в которых реализуется сама измеряемая величина, не могут с абсолютной точностью соответствовать той идеальной модели, для которой написана теория. Это приводит к тому, что общая погрешность измерения определяется не только погрешностью примененных для измерения приборов, но и методикой эксперимента.

На начальном этапе приобретения экспериментального мастерства важно усвоить два положения о погрешностях измерения.

1. Основная задача начинающего экспериментатора не уменьшение величины погрешности измерения, а такое её определение, которое *гарантирует*, что истинное значение измеряемой величины не выходит за пределы вычисленной вами погрешности. Уменьшение абсолютной величины погрешности эксперимента – это задачи следующих ступеней совершенствования экспериментального мастерства.

2. В понятие «истинное значение» измеряемой величины не нужно вкладывать эмоциональную оценку обыденного опыта, в соответствии с которой «истинное» – это нечто существующее и непогрешимо точное, но недоступное нам в силу нашего несовершенства.

2. Истинное значение измеряемой величины. Чаше всего в качестве истинного значения в измерениях выступает:

- либо теоретически введенная идеальная величина;
- либо справочное значение величины, определенное более точными экспериментальными средствами, чем данный эксперимент;
- либо среднее значение, вычисленное в данном эксперименте.

Рассмотрим все три понятия истинного значения. Теоретический идеал вводится по отношению к идеальным условиям двух видов. Во-первых, все другие величины и параметры среды, от которых может зависеть значение измеряемой величины, считаются заданными абсолютно точно. Во-вторых, никаких иных (неизвестных)

влияний на измеряемую величину и приборы не существует. В реальности не выполняется ни то, ни другое. Поэтому истинно (т. е. в материальном мире) существующая величина всегда будет отличаться от теоретически определенного «истинного» значения.

Второе представление об истинном значении связано с тем, что для измеряемой величины могут существовать справочные данные, полученные более точными методами измерения. В учебных лабораториях дело, как правило, обстоит именно таким образом. Но не нужно думать, что если справочные данные существуют, то менее точный эксперимент по определению данной величины осуществляется только в учебных целях. Во-первых, более точные эксперименты дорогостоящи и требуют много времени для реализации, тогда как «рабочие» (технологические) установки требуются для *оперативного* определения данной величины. Во-вторых, данная измерительная установка может быть предназначена для измерения параметров других сред, не внесенных в справочники, а измерение справочно известной величины на данной установке служит для определения погрешности самой установки. Именно так и должны восприниматься установки учебной лаборатории.

Третий смысл понятия истинного значения рассмотрим несколько подробнее. Пусть нам нужно измерить сопротивление некоторого образца, и мы решаем определять его косвенным измерением, используя закон Ома: $R = U/I$.

Простейший способ экспериментального определения R заключается в том, чтобы пропустить через него ток I , измеряемый амперметром A , измерить получившееся на нем падение напряжения U вольтметром V (рис. 16, а) и вычислить значение R по приведенной формуле.

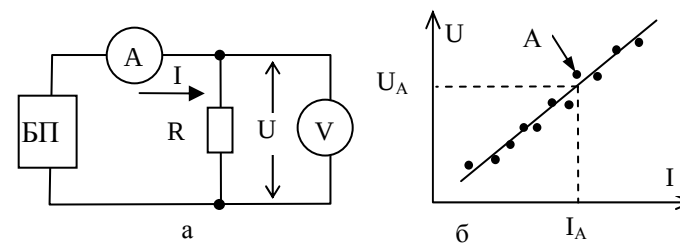


Рис. 16. Схема для измерения величины R

Мы описали так называемый метод вольтметра-амперметра для измерения сопротивлений, о котором будем более подробно говорить в разделе о приборах для измерения различных величин. Данный метод является *косвенным* методом измерения R .

Однако существует более совершенная экспериментальная методика определения значения подобных косвенно измеряемых величин, функциональная связь которых с другими величинами, подлежащими прямому измерению, известна. Она заключается в том, что в эксперименте определяется не значение интересующей величины *в одной точке*, а характер функциональной зависимости на каком-то конечном участке параметров.

Если в нашей установке будем менять входное напряжение, то получим ряд экспериментальных значений тока I_n , соответствующих различным значениям напряжения U_n (точки на рис. 16, б). Усреднив экспериментальные точки методом наименьших квадратов, получим прямую, выражающую искомую функциональную зависимость $I = f(U) = U / R$. Угловым коэффициентом этой прямой будет равен искомому значению R . Например, истинным значением R для экспериментальной точки А (рис. 16, б) будет значение $R_A = U_A / I_A$, лежащее на прямой. Это и есть истинное значение величины, определенное как среднее по результатам данного эксперимента.

С подобным определением истинного значения как среднего *случайной* величины мы встречаемся в работе 1.1.

3. Типы (классы) погрешностей.

1. По «происхождению» и характеру проявления погрешности делятся на промахи, систематические и случайные.

Промахи (по другой терминологии – *недоверенные измерения*) совершаются чаще всего из-за неопытности экспериментатора и их нельзя учесть каким-то научно определенным способом. К счастью, промахи обычно резко выпадают из «правильных» значений измерений и поэтому сравнительно легко исключаются.

Систематические погрешности проистекают в общем случае из трех источников: 1) погрешности измерительных приборов (приборные погрешности); 2) систематические погрешности методики измерения; 3) неполное знание о природе самой измеряемой величины.

Случайные погрешности – погрешности, обусловленные случайным изменением самой измеряемой величины, условий измерения (среды измерения) или случайными воздействиями на измерительные приборы. Природа случайных погрешностей в общем случае неизвестна, но сам факт того, что они случайны, позволяет определить их с большой точностью и сделать случайную погрешность меньше систематической путем простого увеличения числа произведенных измерений. Обычно для этого используется теория математической статистики. (Однако заметим, что, хотя статистический подход в настоящее время является наиболее разработанным и широко распространенным, он не является единственным и всеобъемлющим. Используется, например, метод интервальных оценок, методы, основанные на теории нечетких множеств и т. д.). Поскольку случайным величинам и случайным погрешностям посвящена лабораторная работа № 1, то в данной работе мы не будем их рассматривать.

2. По форме отображения погрешности делят на абсолютные и относительные.

Абсолютная погрешность ΔX выражается разностью между измеренным X' и истинным X значением величины и вносится в результат измерения в тех же единицах, что и сама величина:

$$\Delta X = X' - X,$$

Например для точки А (рис. 17, б) $\Delta I = I' - I_A$, где I' – измеренное при данном U_A , а I_A – лежащее на прямой значение тока для этого же значения U_A . Запись результата измерения в данной точке: $\Delta I = 14,5 - 13,6 = 0,9$ мА.

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности к истинному значению:

$$\delta X = \Delta X / X.$$

Пример: $\delta I = 0,9 / 13,6 = 0,066$.

Относительную погрешность более удобно выражать в процентах (**процентная погрешность**):

$$\delta X \% = (\Delta X / X) \cdot 100 \%.$$

Пример: $\delta I = 6,6 \%$.

Определение приборной погрешности производится по классу точности использованных приборов.

Класс точности прибора (приведенная погрешность средства измерения) G – отношение максимальной абсолютной погрешности

прибора в данном диапазоне измерения $\Delta X_{\max}$ к конечному значению диапазона (шкалы показаний прибора) $X_{\max}$, выраженное в процентах:

$$G = (\Delta X_{\max} / X_{\max}) \cdot 100.$$

Величина $F_G = \Delta X_{\max} / X_{\max}$ называется приведенной погрешностью прибора. Широко применяемые измерительные приборы обычно имеют классы точности 0,2; 0,5; 1,0; 2,5; 4,0. Приборы без указания класса точности имеют точность ниже 4 % и называются индикаторными, а не измерительными.

Чувствительность прибора E . В общем случае чувствительность – это отношение отклика к воздействию, т. е. отношение изменения показания к изменению измеряемой величины ΔX . Для приборов, имеющих линейную (или равномерную) аналоговую шкалу (например, стрелочных) чувствительность – это отношение минимального фиксируемого отклонения стрелки ΔL к максимальному значению измерения на данном диапазоне (к максимальному показанию шкалы).

Например, если максимальное значение шкалы – 300 мА, а длина шкалы 10 см = 100 мм, то $E = \Delta L / \Delta X = 100 / 300 = 1/3$ мм/мА. Если вся шкала при этом разбита на 100 делений, то величина, обратная чувствительности, будет равна цене деления – 3 мА/дел.

Заметим, если шкала неравномерная (например, шкала стрелочных измерителей электромагнитного принципа действия), то чувствительность прибора в разных точках диапазона будет различной.

Для цифровых приборов отклик (изменение показаний) выражается в единицах младшего разряда (в шаге квантования) ΔN : $E = \Delta N / \Delta X$.

4. Систематические погрешности. Из трех источников систематических погрешностей, указанных в определении, **приборная погрешность** обязательно присутствует в любом измерении. Зато ее величина всегда может быть определена по характеристикам измерительных приборов (по классу точности приборов). В прямых измерениях приборная погрешность $\Delta A_{\text{пр}}$ просто прибавляется к результату измерения со знаком $\pm$, поскольку знак приборной погрешности в общем случае неизвестен:

$$A = A_{\text{изм}} \pm \Delta A_{\text{пр}}.$$

При косвенных измерениях значение измеряемой величины определяется по ее функциональной зависимости от других величин, определяемых прямыми измерениями каждая со своей систематической (в данном случае – приборной) погрешностью. Общая погрешность результата косвенного измерения зависит от вида функции, связывающей искомую величину с непосредственно измеряемыми.

Ниже в таблице приведены простейшие правила расчета погрешности косвенного измерения для наиболее часто встречающихся зависимостей.

Таблица

Погрешности косвенных измерений

Функция, N	Абсолютная погрешность, ΔN	Относительная погрешность, δN
$N = A + B + C$	$\Delta A + \Delta B + \Delta C$	$\Delta N / (A + B + C)$
$N = A - B$	$\Delta A + \Delta B$	$\Delta N / (A - B)$
$N = A \cdot B \cdot C$	$\Delta A \cdot B \cdot C + A \cdot \Delta B \cdot C + A \cdot B \cdot \Delta C$	$\Delta A / A + \Delta B / B + \Delta C / C$
$N = A^n$	$n A^{n-1} \Delta A$	$n \cdot \Delta A / A$
$N = (A)^{1/n}$	$1/n \cdot A^{(1/n-1)} \Delta A$	$1/n \cdot \Delta A / A$
$N = A/B$	$B \Delta A + A \Delta B / B^2$	$\Delta A / A + \Delta B / B$
$N = \sin A$	$\Delta A \cos A$	$\Delta A \operatorname{ctg} A$
$N = \cos A$	$\Delta A \sin A$	$\Delta A \operatorname{tg} A$
$N = \operatorname{tg} A$	$\Delta A / \cos^2 A$	$\Delta A / (\cos A \cdot \sin A)$
$N = \operatorname{ctg} A$	$\Delta A / \sin^2 A$	$\Delta A / (\cos A \cdot \sin A)$

5. Правила записи результатов измерения.

В современной практике все расчеты осуществляются с применением автоматических средств, в частности, калькуляторов. При этом результат вычисления, индицируемый на индикаторе, включает столько цифр, сколько позволяет разрядность данного средства. Поэтому чрезвычайно важно с самого начала усвоить одну истину.

Запомните: записывая результат измерения, *последней значащей цифрой этого результата вы даете гарантию на точность проведенного вами измерения!* И если она не соответствует точности данного метода измерения, то это свидетельствует о неграмотности экспериментатора и подрывает доверие ко всему эксперименту!

Результаты измерения могут быть представлены в цифровом или графическом виде.

1. Запись в цифровом виде обязательно должна содержать саму величину и погрешность измерения, представленные *в одних и тех же единицах*.

2. Число значащих цифр, приводимых в результате, зависит от погрешности измерения и не должно превышать последнего разряда погрешности. В промежуточных расчетах рекомендуется использовать на одну значащую цифру больше.

Примеры: 1) диаметр прутка $D = 8,3 \pm 0,1$ мм (измерен штангенциркулем, погрешность измерения которого равна 0,1 мм); 2) скорость звука в воздухе $v = 343 \pm 12$ м/с (измерения проведены при 20° C).

7. Приборы для электрических измерений

Электрическими измерениями называются измерения электрических величин: напряжения U , тока I , мощности P , частоты f и фазы φ переменного тока, заряда q , электрической энергии W , сопротивления R , индуктивности L , электрической ёмкости C , импеданса Z и др.

Приборы для электрических измерений можно условно разделить на два класса:

– приборы для измерения «активных» электрических величин (U , I , P , q , f и др.), действие которых основывается на непосредственном воздействии измеряемых величин на измерительное устройство и, как правило, сопровождается потреблением некоторого количества электрической энергии от объекта измерений;

– приборы для измерения «пассивных» электрических величин (R , L , C , Z и др.), для измерения которых необходимо применять внешние источники энергии, действующие на измеряемый объект и «заставляющие» его проявить свои свойства.

В практике наиболее часто приходится иметь дело с измерениями тока, напряжения и сопротивления (импеданса). В данном параграфе мы рассмотрим основные методы измерения этих величин.

Но прежде введем некоторые представления об общих особенностях приборов для электрических измерений.

7.1. Общие сведения о приборах для электрических измерений

1. Аналоговые и цифровые приборы. По способу представления и переработки информации приборы можно разделить на аналоговые и цифровые. Аналоговым или цифровым может быть любой из измерителей перечисленных параметров. Пока нам достаточно отличать аналоговые и цифровые сигналы следующим упрощенным образом.

Аналоговой называется такая функция $A(x)$, значение которой изменяется непрерывным образом при непрерывном изменении аргумента x (рис. 17). Большинство физических величин являются непрерывными (например, напряжение $U(t)$), или принимаются таковыми в теоретической модели. Например ток $I(t)$ физически является потоком дискретного числа частиц – электронов или ионов, но из-за слишком большого количества заряженных частиц, протекающих через проводник в единицу времени, и его случайного изменения ток считается непрерывной величиной. Это означает, что за величину тока мы принимаем некоторое статистически среднее, а среднее случайных дискретных величин само по себе может быть величиной непрерывной. Например, температура газа определяется распределением по скоростям конечного числа дискретных молекул, но сама является величиной непрерывной.

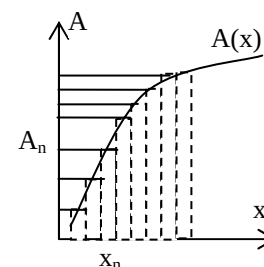


Рис. 17. Аналоговая функция

При передаче аналогового сигнала от одного устройства к другому в схеме измерения, представленной на рис. 1, сигнал может быть преобразован из аналоговой формы в цифровую. Такое преобразование основано на том, что аргумент каждой однозначной аналоговой функции $A(x)$ можно разбить на интервалы и передавать ее значение средним значением A_n , соответствующим данному интервалу x_n (рис. 17). Эта операция и будет переводом аналоговой величины в цифровую.

Точность перевода значения из аналоговой в цифровую форму определяется ценой наименьшего интервала и может быть сделана теоретически сколь угодно высокой. (Некоторые ограничения на переход от аналоговых величин к цифровым, связанные с «экзотическими» для нашего практикума случаями характера аналоговых функций, мы не рассматриваем).

Смысл преобразования сигналов из аналоговой формы в цифровую обусловлен целым рядом факторов, среди которых можно выделить: большую помехозащищенность передачи цифрового сигнала, более высокую скорость обработки цифровых сигналов по сравнению с аналоговыми, возможность компьютеризированной обработки, передачи и хранения цифровой информации. Поэтому в современной метрологии (науке об измерениях) тенденция перехода на цифровую технику все возрастает.

2. Основные типы измерительных приборов для измерения тока и напряжения. Для измерения токов и напряжений применяются *электромеханические* и *электронные* приборы.

В *электромеханических* приборах электрический сигнал непосредственно переводится в показания прибора (например, в движение стрелки вдоль шкалы прибора, которая прокалибрована в единицах измерения величины U или I).

В *электронных* приборах измеряемая величина сначала подвергается различным преобразованиям (например, усиливается, усредняется, переводится в цифровой код и т. д.), и лишь затем измеряется и регистрируется. Причем регистрация значения величины может осуществляться как с помощью приборов стрелочного (электро-механического) типа, так и в цифровой форме.

3. Измерения на постоянном и переменном токе. Методы и средства электрических измерений в цепях постоянного и переменного тока существенно различаются. В цепях переменного тока они зависят от частоты и формы электрических сигналов, а также от того, какие характеристики переменных электрических величин (мгновенные, действующие, максимальные, средние) измеряются.

Приборы для измерения «пассивных» реактивных элементов (индуктивности, емкости, импеданса и т. д.) вообще могут быть реализованы только с внешними источниками *переменного* тока.

Ниже будут рассмотрены основные принципы действия электро-механических и электронных измерителей тока, напряжения и сопротивления (импеданса).

7.2. Эквивалентные схемы амперметра и вольтметра

1. Эквивалентная схема амперметра. Приборы для измерения тока называются *амперметрами* (милли-, микроамперметрами, гальванометрами). Независимо от того, являются ли амперметры электро-механическими или электронными, их можно представить общей эквивалентной схемой (рис. 18, а).

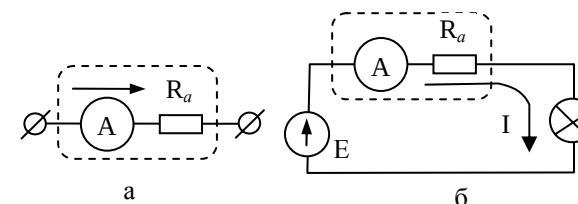


Рис. 18. Эквивалентная схема измерения тока

Содержательный смысл такого замещения основан на том, что измеряемый ток должен протекать через прибор и отдавать часть своей энергии для приведения в действие «механизма» измерителя. Величина потери энергии сигнала, вносимой прибором, представлена в эквивалентной схеме сопротивлением амперметра R_a , а сам амперметр A в этой схеме является идеальным устройством, представляющим собой короткое замыкание для тока.

Для переменного тока вместо активного сопротивления R_a в схеме а рис. 18 должен стоять импеданс Z_a . Это означает, что показания и погрешность прибора будут зависеть не только от величины тока, но и от частоты. Поэтому приборы для переменного тока соответствуют своему классу точности только в оговоренном частотном диапазоне.

Рассмотрим влияние эквивалентного сопротивления амперметра на точность измерений. Пусть мы измеряем постоянный ток в цепи питания лампочки с сопротивлением R_n (рис. 18, б). Тогда величина тока в цепи без амперметра равна $I_0 = E/R_n$. Введение в схему амперметра определит новое значение тока в цепи: $I_1 = E/(R_n + R_a)$. Изменение тока ΔI , вызванное подключением амперметра:

$$\Delta I = I_0 - I_1 = E/R_L - E/(R_L + R_a) = E \cdot R_a / (R_L^2 + R_a R_L) \approx E \cdot R_a / R_L^2.$$

Относительная погрешность $\delta I = \Delta I / I_0 = R_a / R_L$.

Таким образом, чем меньше отношение R_a / R_L , тем меньшее изменение ΔI вносит амперметр в измеряемую цепь. Эта погрешность, пропорциональная величине R_a / R_L , вносится в измерение независимо от класса точности амперметра. Таким образом, общая приборная погрешность измерения тока δI_A равна сумме погрешности самого прибора $\delta I_{пр}$, определяемой его классом точности, и тем, что введение амперметра в цепь изменяет значение тока в ней: $\delta I_A = \delta I_{пр} + \delta I$.

Правила для запоминания: 1) амперметр включается в разрыв той цепи, в которой производится измерение тока; 2) амперметр должен иметь малое внутреннее сопротивление (в идеале – нулевое); 3) помимо класса точности амперметра погрешность измерения тока зависит от отношения R_a / R , где R – общее сопротивление цепи, в которую включен амперметр.

2. Эквивалентная схема вольтметра. Приборы для измерения напряжения называются *вольтметрами*. В общем случае их также можно разделить на стрелочные и электронные, но независимо от этого любой измеритель напряжения можно представить общей эквивалентной схемой (рис. 19, а).

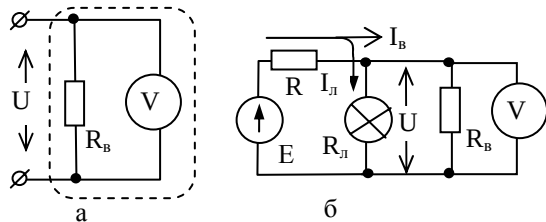


Рис. 19. Эквивалентная схема вольтметра

В эквивалентной схеме сам вольтметр V – идеальный прибор, т. е. имеет бесконечно большое сопротивление, в которое не ответвляется ток. Но реальный вольтметр всегда «потребляет» некоторую мощность, что представлено эквивалентным сопротивлением вольтметра R_B , подключенным параллельно идеальному прибору.

Влияние неидеальности вольтметра на точность измерения иллюстрирует рис. 19, б. При подключении вольтметра часть тока I_B

ответвляется из электрической цепи в вольтметр, внося изменения в режим работы цепи. Определим связанную с этим погрешность измерения. Падение напряжения на лампочке и вольтметре одинаково в силу их параллельного соединения. Следовательно, отношение токов обратно пропорционально отношению их сопротивлений: $I_L / I_B = R_B / R_L$. В цепях постоянного тока и в низкочастотных цепях сопротивление R_B обычно велико по сравнению с эквивалентным сопротивлением участка цепи R , на котором измеряется напряжение. Если, например, $R_B \geq 100R$, то погрешность не превышает 1 %.

Однако это соотношение может нарушаться при измерениях в высокоомных цепях. Мы уже приводили пример таких измерений в п. 3.3. Для измерений атмосферного поля Земли «обычные» вольтметры не годятся, потому что эквивалентное сопротивление «обычных» вольтметров (не электростатической системы) не превышает $10^6 \dots 10^7$ Ом, а эквивалентное сопротивление «источника» атмосферного поля (столба воздуха единичного сечения) $\sim 10^{14}$ Ом. Другой менее «экзотический» пример измерений напряжения, при которых внутреннее сопротивление вольтметра может оказаться недостаточным – измерение фотоэдс вакуумных фотоэлементов. Эквивалентное внутреннее сопротивление вакуумного фотоэлемента при слабом световом потоке $\sim 10^6 \dots 10^7$ Ом, что сравнимо с внутренним сопротивлением вольтметра. Напомним (см. п. 2.2): если выполняется условие $R_B = R_i$, где R_i – внутреннее сопротивление источника эдс (например фотоэлемента), то вольтметр покажет только половину эдс, т. е. $E/2$!

Правила для запоминания: 1) вольтметр включается параллельно тому участку цепи, на котором производится измерение падения напряжения; 2) вольтметр должен иметь максимально большое внутреннее сопротивление (в идеале – бесконечное); 3) помимо класса точности вольтметра погрешность измерения напряжения зависит от отношения R_B / R_i , где R_i – эквивалентное сопротивление участка цепи, на котором производится измерение напряжения.

7.3. Принцип действия электромагнитных и магнитоэлектрических измерителей

1. Стрелочные приборы для измерения тока и напряжения. Основными приборами стрелочного (электромеханического) типа для измерения тока и напряжения являются приборы магнитоэлек-

трической, электромагнитной, электростатической и тепловой системы. Приборы тепловой системы предназначены для измерений в области высоких частот и далее мы их не рассматриваем.

Основой стрелочных измерителей напряжения и тока служит одно и то же устройство соответствующей системы – электромагнитной или магнитоэлектрической, – которое на техническом языке называют «измерительной головкой». Но в амперметрах параллельно ему ставится шунт, а в вольтметрах последовательно с ним включается добавочное сопротивление.

Рассмотрим принцип действия измерительных механизмов различных систем.

2. Действие приборов магнитоэлектрической системы основано на взаимодействии магнитного поля измеряемого тока, протекающего через катушку (рамку) прибора, с магнитным полем постоянного магнита (рис. 20, а).

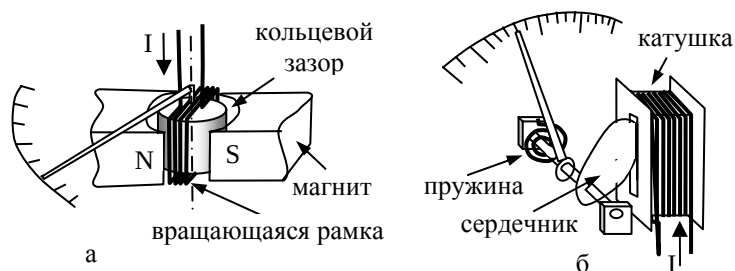


Рис. 20. Устройства магнитоэлектрической (а) и электромагнитной (б) системы

На виток в кольцевом зазоре постоянного магнита действует сила $F_{мэ}$, пропорциональная произведению тока на величину магнитного поля, создаваемого в кольцевом зазоре: $F_{мэ} \propto I \cdot B \propto I$ ($\propto$ – знак пропорциональности).

Сила перпендикулярна к векторам I и B , а потому заставляет катушку вращаться и закручивать легкую спиральную пружину (на рис. 20 не показана), сила упругости которой уравнивает действие силы $F_{мэ}$. Стрелка, жестко связанная с катушкой, показывает величину отклонения, пропорционального току. Шкала прибора проградуирована непосредственно в единицах тока. Поскольку поле

магнита постоянно, то показания прибора прямо пропорциональны величине измеряемого тока $F_{мэ} \propto I$, а шкала прибора – линейная.

Приборы магнитоэлектрической системы непосредственно служат для измерения *постоянного* тока (напряжения). Но включение совместно с выпрямительными диодами позволяет использовать их и для измерения в цепях переменного тока. В этом случае показания прибора будут пропорциональны *среднему* значению переменного тока.

3. Принцип действия приборов электромагнитной системы поясняет рис. 20, б. Здесь магнитное поле катушки, пропорциональное протекающему по ней измеряемому току, намагничивает ферромагнитный сердечник и втягивает его в катушку. Сила втягивания пропорциональна произведению магнитного поля катушки на индукцию сердечника B : $F_{эм} \propto H \cdot B$. В свою очередь индукция сердечника пропорциональна величине поля H и соответственно I . Поэтому результирующая сила, закручивающая ось, на которой закреплен сердечник и стрелка, пропорциональна квадрату тока: $F_{эм} \propto I^2$.

Положительным эффектом квадратичной зависимости $F_{эм}$ от тока является то, что приборы электромагнитной системы могут измерять как постоянный, так и переменный ток, а отрицательным – нелинейность шкалы. Обратите внимание на то, что при измерениях в цепях *переменного* тока в отличие от приборов магнитоэлектрической системы с выпрямительными диодами показания приборов данного типа пропорциональны не среднему, а *среднеквадратичному* значению измеряемой величины.

7.4. Измерители тока и напряжения

Выше мы рассмотрели принцип действия измерительных механизмов («измерительных головок»), на базе которых создаются электромеханические амперметры и вольтметры.

1. Электромеханические амперметры. Верхний предел величины тока, пропускаемой самим измерительным устройством, обычно не превышает 50...100 мА, а для чувствительных «головок» – 50...100 мкА. Для измерения токов большей величины и создания многопредельных амперметров применяют *шунты* – со-

противления, включенные *параллельно* измерительному механизму (рис. 21, а).

Тогда новый предельный ток прибора определится очевидными равенствами $I_a R_a = I_{ш} R_{ш}$ и $I' = I_a + I_{ш}$, откуда необходимая величина сопротивления шунта и новый предел измерения прибора равны:

$$R_{ш} = R_a (I_a / I_{ш}) \quad \text{и} \quad I' = I_a (R_{ш} + R_a) / R_{ш}.$$

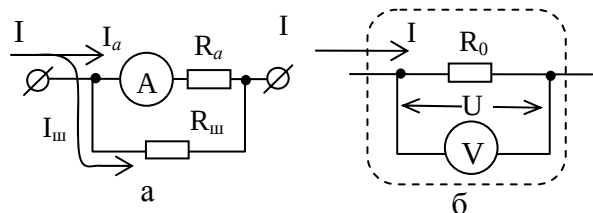


Рис. 21. Схема амперметра (а) и косвенного измерения тока (б).

2. Косвенное измерение тока с помощью измерителя напряжения. Возможно косвенное измерение тока, основанное на законе Ома, по падению напряжения U на образцовом резисторе R_0 (рис. 21, б). Такие методы обычно применяются при автоматическом контроле тока в цепи, а также тогда, когда в цепи уже существует резистор точно известной величины. В этом случае не нужно разрывать цепь и включать в нее дополнительное сопротивление прибора. В приборах электронной системы также чаще всего используется косвенный метод измерения тока.

3. Электромеханические вольтметры. Для превращения измерительного механизма в вольтметр последовательно с ним включается

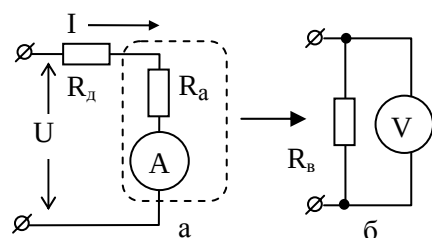


Рис. 22. Схема вольтметра

добавочное сопротивление (рис. 22, а, б). Рассмотрим пример: широко применяемый измерительный механизм («головка») имеет ток полного отклонения $I = 1,0$ мА при сопротивлении рамки $R_a = 1,0$ кОм. Чтобы образовать из него вольтметр с диапазоном полного отклонения

стрелки $U = 300$ В, нужно выполнить очевидное условие (см. рис. 22, а): $U / (R_d + R_a) = I$. Для приведенного примера $R_d + R_a = 300 / 1 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^5$ Ом = 300 кОм. Это и

есть внутреннее сопротивление вольтметра $R_v = 300$ кОм, образованного на базе данной «головки» (рис. 22, б).

Из приведенных соотношений ясно, что чем выше чувствительность «головки» (т. е. чем меньше ток полного отклонения), тем большим внутренним сопротивлением будет обладать изготовленный на ее базе вольтметр.

7.4. Приборы электронной системы

В современной измерительной практике основным средством измерения токов и напряжений становятся универсальные вольтметры (мультиметры) электронной системы, способные измерять постоянные и переменные токи и напряжения. Обычно помимо этих величин мультиметры способны измерять еще и ряд других параметров (сопротивление, емкость, индуктивность и др.).

1. Электронные вольтметры обычно имеют более высокое входное сопротивление (10–20 Мом), чем электромеханические ($10^4 \dots 10^5$ Ом). Это достигается за счет применения в них усилителей, введение которых эквивалентно увеличению чувствительности измерительного механизма электромеханических вольтметров (см. предыдущий пункт). Усилители позволяют также значительно расширить общий диапазон измерения за счет введения переключаемых делителей напряжения. Например, используемый в работе универсальный вольтметр типа GDM-8145 имеет 5 поддиапазонов, позволяющих измерять напряжения от единиц милливольт до 1 200 вольт.

2. Особенности измерения переменного напряжения. В п. 5.3. введения мы уже отмечали, что переменный ток характеризуется амплитудным, среднеарифметическим (средним, средневывряленным) и среднеквадратическим (действующим, эффективным) значениями. Проще всего измеряется среднее (средневывряленное) значение, для чего достаточно простого выпрямления переменного сигнала (одно- или двух-полупериодное выпрямление). Именно этот способ реализуется в большинстве современных мультиметров. Но показания шкалы мультиметров при этом градуируются не в среднеарифметическом, а в *среднеквадратическом* значении, которое определяется введением множителя, называемого коэффициентом амплитуды (см. п. 5.3)

$$k_a = \frac{U_a}{U_d};$$

где U_a – амплитудное; U_d – действующее (среднеквадратическое) значение.

Для синусоидальных сигналов может быть измерен любой из трех параметров U_a , U_d или $U_{ср}$, а остальные вычислены с помощью коэффициента амплитуды. Иначе обстоит дело с сигналами сложной формы.

Сравнение двух сигналов различной формы производится по *среднеквадратической* величине – т. е. по их энергетическому (тепловому) воздействию на активное сопротивление. Для этого прямому измерению должно подлежать именно среднеквадратическое значение сигналов.

Поэтому при использовании электронного вольтметра для измерения величины переменного сигнала сложной формы нужно обязательно знать, какую величину он измеряет непосредственно, а затем домножать ее на коэффициент амплитуды, соответствующий форме сигнала. Для периодических импульсных сигналов относительно простой формы коэффициенты амплитуды для перехода от средневыпрямленного (среднего) значения к среднеквадратическому легко определяются теоретически и обычно приведены в описании вольтметра. Но для сигналов произвольной формы, в частности, шумовых и «пиковых выбросов», характерных для переходных процессов, коэффициент формы в общем случае неизвестен. Для шумовых сигналов он может принимать значение от 3 до 4, а для выбросов – до 7...10 в зависимости от их конкретной формы. То есть ошибки перехода от измеренной к истинно среднеквадратической величине могут составлять от 30 % и почти до порядка величины (1 000 %).

Следует заметить, что существуют специальные электронные вольтметры, непосредственно измеряющие именно среднеквадратические значения переменных сигналов, но они относительно дороги и сложны, а потому приборы массового пользования обычно непосредственно измеряют средневыпрямленные значения переменного сигнала.

3. Измерение тока электронными мультиметрами. Измерение тока электронными вольтметрами и мультиметрами (универсальными измерителями комплекса параметров: обычно постоянных и

переменных U и I , а также R , C и ряда др.) производится косвенным методом. Измеряемый ток протекает через шунт мультиметра R (рис. 23), падение напряжения на котором U_R усиливается усилителем Y , оцифровывается, «переводится» в единицы измерения тока и индицируется.

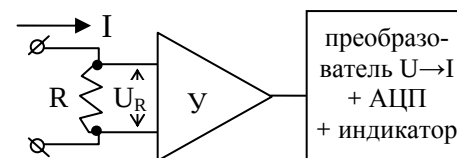


Рис. 23. Измерение тока

Для измерения тока электронными приборами при сложной форме сигнала применимы все правила и "оговорки", сказанные выше для измерителей напряжения соответствующей формы сигнала.

7.5. Методы измерения сопротивления

Для измерения сопротивлений применяются приборы, основанные на прямом методе измерения (омметры), на косвенном (метод вольтметра-амперметра) и компенсационном (мосты).

1. Принцип действия омметров показан на рис. 24. Ток элемента питания с эдс E протекает через микроамперметр μA , регулятор нуля R_0 и измеряемое сопротивление R_x . При замкнутом ключе $Kл$ регулятором нуля устанавливают такой ток в цепи, чтобы прибор показывал максимальное значение тока (чтобы стрелка прибора отклонилась на всю шкалу). Тогда при размыкании ключа ток установится на меньшем показании прибора, соответствующем величине $I = E/(R_i + R'_0 + R_x)$.

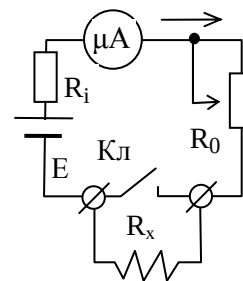


Рис. 24. Омметр

Таким образом, положение стрелки прибора будет обратно пропорционально величине измеряемого сопротивления. Поскольку остальные величины постоянны, то шкалу прибора можно прокалибровать непосредственно в величинах сопротивления. Начало отсчета (нуль шкалы омметра) при этом будет справа (соответствует максимальному отклонению стрелки прибора), а шкала неравномерная пропорциональна $1/R_x$. Точность измерений невелика.

Обычно омметры входят в состав мультиметров (вольт-Ом-амперметров или тестеров) с магнитоэлектрическим микроамперметром в качестве стрелочного механизма, но в современных мультиметрах применяется цифровые методы регистрации.

2. Метод вольтметра-амперметра. Это косвенный метод измерения, основанный на применении закона Ома (рис. 25). Он применим как для измерения активных сопротивлений (применяется ис-

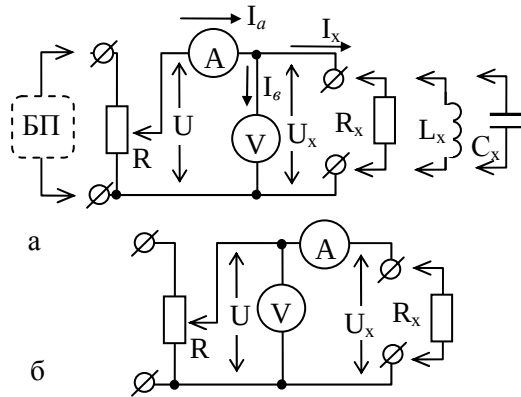


Рис. 25. Метод вольтметра-амперметра

точник постоянного напряжения), так и для измерения импедансов реактивных элементов (при БП с переменным напряжением).

Если считать вольтметр и амперметр в схеме на рис. 25, а идеальными приборами, то искомые значения соответствующих величин R , L или C будут равны:

$$R_X = U_X / I_X; \quad C_X = I_X / \omega U_X; \quad L_X = U_X / \omega I_X.$$

Поскольку метод вольтметра-амперметра по существу является основой измерения R , L , C в электронных мультиметрах, то рассмотрим более подробно влияние неидеальности измерительных приборов на точность измерений.

Ток в схеме рис. 25, а ответвляется не только в измеряемый элемент, но и в вольтметр, а потому показания амперметра завышены на величину I_B . Относительная методическая погрешность, связанная с этим, равна

$$\delta R_I(\%) = (R'_X - R_X) \cdot 100 / R_X = -100 R_X / (R_X + R_B),$$

где R'_X – измеренное по данной схеме значение R_X .

Очевидно, погрешность тем меньше, чем сопротивление вольтметра больше измеряемого. Поэтому данная схема применяется для измерения относительно малых R_X . Для измерения больших значений R_X вольтметр ставят перед амперметром (рис. 25, б). В этом случае амперметр показывает ток через R_X и не влияет на результат. Зато падение напряжения U_a на внутреннем сопротивлении амперметра R_a входит в измеряемое U , что также приводит к методической погрешности:

$$\delta R_2(\%) = (R'_X - R_X) \cdot 100 / R_X = -100 R_a / R_X.$$

Аналогичным образом определяются методические погрешности измерения L и C .

3. Методы измерения комплексных сопротивлений Z . Если измеряемый элемент Z является комплексной величиной $Z = R_Z + jX_Z$, то модуль полного сопротивления $|Z|$ можно измерить методом вольтметра-амперметра (рис. 25)

$$|Z| = U_Z / I = (R_Z^2 + X_Z^2)^{1/2}.$$

Однако определить порознь элементы R_Z и X_Z таким образом невозможно, поскольку сдвиг фаз между током и напряжением в цепи неизвестен.

4. Мостовой (компенсационный) метод измерения сопротивлений. Наиболее точным методом измерения сопротивлений (импедансов) является метод сравнения (компенсационный нулевой метод), осуществляемый с помощью мостов постоянного и переменного тока. Упрощенная схема моста постоянного тока, применяемого для измерения активных сопротивлений, показана на рис. 26.

Если выполняется равенство отношений сопротивлений $R_1/R_X = R_2/R_3$, то потенциалы точек a и b одинаковы и ток через гальванометр G не течет. Таким образом, условием баланса будет равенство $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_X$, откуда

$$R_X = R_1 \cdot R_3 / R_2.$$

Для обеспечения условия баланса для различных R_X сопротивление R_1 делается переменным. Отношение R_3/R_2 также известно и является постоянной прибора. Поэтому переменный резистор R_1 можно объединить со шкалой, проградуированной непосредственно в значениях измеряемого сопротивления R_X . Таким образом, измерение величины R_X происходит методом ее сравнения с известными эталонными сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , причем индикатором баланса является нулевой ток гальванометра. Гальванометр – чувстви-

тельный измеритель тока с ценой деления $10^{-6} \dots 10^{-8}$ А. (Для запоминания условие баланса моста читается так: «произведения сопротивлений противоположных плеч моста равны»).

В мостах переменного тока вместо резисторов R стоят комплексные сопротивления Z , сформированные из соединений резисторов и конденсаторов (или резисторов и катушек индуктивностей).

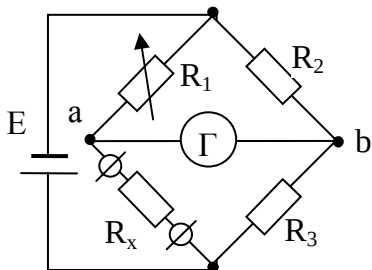


Рис. 26. Мост постоянного тока

Подставив в условие баланса комплексные величины $Z = R_Z + jX_Z$ и разделив мнимые и вещественные части, получим два независимых уравнения баланса:

$$\begin{aligned} R_1 \cdot R_3 - X_1 \cdot X_3 &= R_2 \cdot R_X - X_2 \cdot X_X, \\ X_1 \cdot R_3 + X_3 \cdot R_1 &= X_2 \cdot R_X + X_X \cdot R_2. \end{aligned}$$

Наличие двух независимых уравнений баланса означает, что в данных мостах должны присутствовать не менее двух регулируемых элементов, что и дает возможность независимого определения двух величин – активного и реактивного элементов.

Конкретные схемы мостов переменного тока весьма разнообразны. С их помощью можно измерять не только значения импеданса, но и величины емкости, индуктивности, а также тангенса угла потерь.

Работа 8.1

Измерение тока и напряжения в цепях постоянного тока

Цель работы: познакомиться с основными законами и элементами электрических цепей постоянного тока и методами измерения электрических величин.

Оборудование: блок питания типа НУ-1500 (НУ-1800), вольтметр универсальный типа GDM-8145 (GDM-8135), мультиметры типа VC 97 (88E), М 832, вольтамперметр магнитоэлектрической системы типа М 2018, измеритель иммитанса МТ 4080, набор панелей (макетов) со схемами для выполнения упражнений.

Макетные платы (МП): № 1 «Элементы линейных цепей», № 2 «Законы цепей постоянного тока».

Задание 1. Знакомство с основными компонентами линейных цепей.

Внимание: если вы уже выполняли работу 8.2, то в данной работе можете сразу приступить к выполнению задания 2.

1.1. Макетная плата № 1.

Плата предназначена для знакомства с различными пассивными компонентами электрических цепей: резисторами R , конденсаторами C , катушками индуктивности L и взаимной индуктивности M . Их эквивалентные схемы и единицы измерения представлены в параграфе 5.1. введения.

1.2. Краткая инструкция пользования измерителем иммитансов МТ 4080

Иммитанс – общее название для *импеданса* Z , т. е. комплексного сопротивления, и *адмитанса* Y , т. е. комплексной проводимости: $Y = 1/Z$. На рис. 1. представлено условное изображение передней панели прибора. Верхний ряд цифр индикаторной панели отражает величину (цифровое значение) измеряемого параметра, который высвечивается слева от этих цифр. Нижний цифровой ряд показывает значение вспомогательных параметров, указанных слева от него. Нижняя левая кнопка служит для установки измеряемой величины

L/C/Z/DCR, а правая – для установки вспомогательного измеряемого параметра D/Q/θ/ESR.

Левая кнопка среднего ряда переключает частоту тест-сигнала f (частоту, на которой происходит измерение параметров). Значение частоты высвечивается в нижнем ряду индикаторной панели.

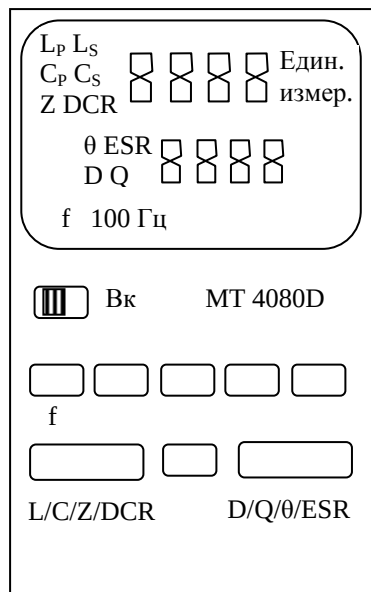


Рис. 1. Измеритель МТ 4080

Z – полное (комплексное) сопротивление элемента или участка цепи, включающего активные и реактивные элементы.

Измерения этих величин производятся на переменном токе, частоту которого можно устанавливать на значениях 100 и 120 Гц, 1 и 10 кГц (частота тест-сигнала f).

DCR – сопротивление постоянному току (активное сопротивление, элементов или участков цепи, измеряемое на постоянном токе).

Со значением остальных величин можно познакомиться в руководстве по эксплуатации измерителя иммитанса. Эквивалентное выходное сопротивление измерителя – $R_i = 100$ Ом.

О схемах замещения, обозначениях и единицах измерения основных элементов линейных цепей прочитайте в п. 5.1. введения.

2. Измерения. После включения прибора кнопкой L/C/Z/DCR выберите нужный параметр (индицируется слева вверху) и проведи-

те измерения по двум схемам замещения катушки индуктивности и конденсатора – по последовательной (L_s , C_s) и параллельной (L_p , C_p).

В нашем случае рекомендуется проводить измерения L_s , C_s .

1. Измеряемые величины:

L_s/L_p – индуктивность при последовательной / параллельной схеме замещения (рекомендуемая для нас схема – последовательная, т. е. значение L_s);

C_s/C_p – емкость при последовательной / параллельной схеме замещения (рекомендуемая для нас схема – последовательная, т. е. значение C_s);

те измерения на частоте тест-сигнала 1 кГц. Помните, что катушка индуктивности представляет собой последовательное соединение индуктивности L и омического сопротивления провода R . Поэтому после измерения L включите режим измерения DCR и измерьте активное сопротивление катушки R_L .

3. Погрешности измерений. Базовая (основная) погрешность измерения составляет 0,2 %. Погрешность измерения может ухудшаться до 1...2 % на краях диапазона (при максимальных и минимальных значениях измеряемых величин), а на частоте тест-сигнала 10 кГц на максимальном поддиапазоне – до 5 %. Более подробные данные о погрешностях измерения на разных частотах тест-сигнала см. в инструкции по эксплуатации прибора.

Упражнение 1.1. Знакомство с элементами электрических цепей (МП № 1):

1. Обратите внимание, что резисторы отличаются не только по значению сопротивления, но и по величине мощности, которую они способны рассеять без превышения рабочей температуры. Резисторы переменной величины с тремя выводами называют *потенциометрами*.

2. Конденсаторы могут быть неполярными $C_1... C_4$ или полярными (электролитическими C_5 , C_6), постоянными (по емкости) $C_1... C_6$, подстроечными и переменными C_7 .

3. Катушки индуктивности могут быть как с ферритовыми сердечниками (либо подстраиваемыми, либо нерегулируемыми), так и без них. Сердечник может быть цилиндрическим (L_1) или кольцевым (L_2), а также броневым – полностью заключающим в себя катушку (L_3).

4. Катушки взаимной индуктивности наматываются либо одна поверх другой (L_4), либо в непосредственной близости друг от друга (L_5) таким образом, чтобы магнитное поле одной катушки пересекало витки другой катушки.

Упражнение 1.2. Измерение значений величин R, L, C, Z.

Познакомьтесь с кратким описанием измерителя иммитанса МТ 4080 (прибор для измерения параметров линейных цепей R, L, C, Z, Q, tgθ). Измерьте величины R, L, C, Z всех элементов, представленных на МП № 1.

Задание 2. Режимы работы источника питания (БП)

2.1. Краткая инструкция по работе с БП типа НУ-1500.

На рис. 2 воспроизведен вид передней панели блока. Прибор может работать в 3-х режимах: 1) стабилизатора напряжения; 2) стабилизатора тока; 3) ограничения по току. О сути этих режимов можете прочитать в § 3 введения к работе. Рассмотрим особенности установки и работы БП в этих режимах.

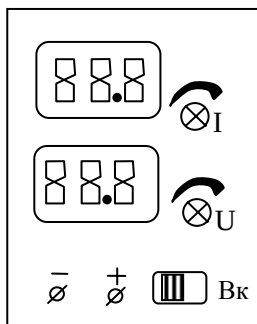


Рис. 2. БП типа НУ-1500

Режим стабилизатора напряжения.

В этом режиме при выключенной нагрузке включаем блок (Вк) и устанавливаем ручкой «I» максимальный ток (по часовой стрелке до упора), а ручкой «U» (справа) устанавливается необходимое значение стабилизированного напряжения $U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}}$, которое индицируется на цифровом табло слева. Затем подключаем нагрузку.

Как работает блок в этом случае? Блок НУ-1500 может обеспечить на выходе максимальное напряжение $U_{\text{макс}} = 15 \text{ В}$ и $I_{\text{макс}} = 3 \text{ А}$. Пусть эквивалентное сопротивление нагрузки меняется во время работы в пределах $R_{\text{н}} = R_{\text{н мин}} \dots R_{\text{н макс}} = 100 \dots 1000 \text{ Ом}$ и нам нужно обеспечить при этом сохранение стабильного напряжения на нагрузке $U_{\text{ст}} = 10 \text{ В}$. Тогда максимальный ток в нагрузке будет равен $I_{\text{макс}} = U_{\text{ст}}/R_{\text{н мин}} = 10/100 = 0,1 \text{ А} = 100 \text{ мА}$, а минимальный $I_{\text{мин}} = U_{\text{ст}}/R_{\text{н макс}} = 10/1000 = 0,01 \text{ А} = 10 \text{ мА}$. При изменении блок питания за счет обратной связи будет поддерживать постоянное (стабильное) напряжение на выходе $U_{\text{ст}} = 10 \text{ В}$ до тех пор, пока значение тока в нагрузке не выйдет за максимальное для данного блока, т. е. до $I_{\text{макс}} = 3 \text{ А}$.

Внимание! Если по какой-то причине нагрузка станет меньше, чем $U_{\text{ст}}/I_{\text{макс}} = 10/3 \approx 3,3 \text{ Ом}$, то напряжение на выходе блока упадет до такой величины, чтобы максимальный ток выхода не превышал 3 А. При коротком замыкании (КЗ) в нагрузке прибор ограничит ток максимальным значением 3 А, но долго держать его в этом положении не рекомендуется. Нужно отключить нагрузку (выключить блок) и устранить причину КЗ, а затем вновь подключить ее.

2. **Режим стабилизатора тока.** Включите блок и, не подключая нагрузки, ручку «U» установите в максимальное (по часовой стрелке до упора), а ручку «I» в минимальное положение. Подключите нагрузку и ручкой «I» установите нужное вам значение $I_{\text{вых}} = I_{\text{ст}}$ (высвечивается на индикаторе слева).

В этом случае блок будет поддерживать стабильную величину тока в нагрузке $I_{\text{вых}} = I_{\text{ст}}$ при ее изменении в пределах $R_{\text{н}} \leq U_{\text{макс}}/I_{\text{ст}}$ за счет соответствующего изменения выходного напряжения. Если $R_{\text{н}}$ превысит этот предел, то блок уже не сможет поддерживать стабильный ток и он будет уменьшаться в соответствии с законом Ома: $I_{\text{вых}} = U_{\text{макс}}/R_{\text{н}}$.

3. **Режим ограничения по току.** Режим, при котором источник в любом случае не выдаст в нагрузку ток больше выставленного значения. Включите блок и, не подключая нагрузки, ручку «I» установите в минимальное положение (против часовой стрелки до упора), а ручкой «U» установите требуемое вам напряжение выхода $U_{\text{вых}}$. Подключите нагрузку и ручкой «I» (по часовой стрелке) установите то значение тока I_0 , которым вы желаете ограничить выход БП при работе.

В этом случае блок будет работать в режиме стабилизации напряжения до тех пор, пока нагрузка не уменьшится до величины $R_{\text{н}} = U_{\text{вых}}/I_0$. При дальнейшем уменьшении нагрузки блок перейдет в режим стабилизации тока с $I_{\text{ст}} = I_0$.

Фактически режим ограничения тока отличается от режима стабилизации тока лишь тем минимальным значением нагрузки $R_{\text{н}} = U/I_0$, начиная с которого блок из режима стабилизации тока переходит в режим стабилизации напряжения. В режиме стабилизации по току $R_{\text{н}} \leq U_{\text{макс}}/I_0 = 15/I_0$, а в режиме ограничения по току $R_{\text{н}} \leq U_{\text{вых}}/I_0$, где $U_{\text{вых}}$ установленное вами значение напряжения выхода.

2.2. Макетная плата № 2

Макетная плата № 2 предназначена для изучения устройств и режимов работы цепей постоянного тока. На плате имеется общая входная часть для подключения БП с дополнительным выключателем Вк (выделена пунктиром на рис. 3) и ряд схем для выполнения заданий. Схемы подключаются к входной части гибкой перемычкой П, в качестве которой при необходимости может быть использован амперметр А.

Упражнение 2.1. Изучение режима стабилизации напряжения (схема 1 МП № 2).

1. Не ставя перемычки П, измерьте значения сопротивлений R_1 и R_2 любым из измерителей (VC97 или МТ 4080). Измерение R_1 производится при полностью выведенной ручке потенциометра R_2 (против часовой стрелки), а при противоположном повороте ручки потенциометра измеряется значение $(R_1 + R_2)$.

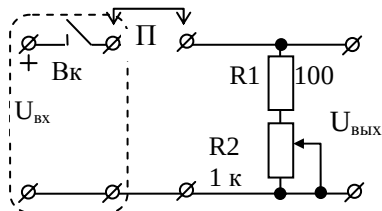


Рис. 3. Вход БП и схема 1

$U_{ВХ}$ – выход БП.

2. Установите потенциометр R_2 на максимальное значение сопротивления (по часовой стрелке). Установите в гнезда 1-2 миллиамперметр (VC97) и подключите к входу

3. Включите БП. Установите ручку «I» БП в положение максимума тока (по часовой стрелке), а ручкой «U» установите напряжение стабилизации $U_{ст} = 10$ В.

4. Подключите к выходу схемы вольтметр GDM-8145 с пределом измерения постоянного напряжения 20 В.

5. Измерьте величину тока при максимальном и минимальном положении потенциометра R_2 и проверьте выполнение закона Ома.

6. Вращая ручку потенциометра R_2 , проследите за значением выходного напряжения. Объясните полученный результат и смысл режима стабилизации БП по напряжению.

Упражнение 2.2. Изучение режима стабилизации тока (схема 1 МП № 2).

1. Поставьте потенциометр в положение с минимальным значением R_2 и тумблером Вк отключите схему от БП. Подключите к выходу схемы вольтметр GDM-8145 с пределом измерения постоянного напряжения 20 В, а в гнезда 1-2 миллиамперметр (VC97).

2. Установите ручку «I» БП в минимальное положение тока, а ручку «U» – в максимальное.

3. Включите Вк и вращением ручки «I» установите значение тока $I_{ст} = 20$ мА.

4. Вращая ручку потенциометра, снимите зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$, где φ – угол поворота ручки резистора в делениях шкалы.

Объясните полученный результат и смысл режима стабилизации БП по току. Сравните результаты упражнений 2.1 и 2.2 и проверьте выполнение закона Ома.

Задание 3. Измерение тока и напряжения в цепях постоянного тока.

Упражнение 3.1. Измерение напряжения в цепях постоянного тока (схема 2 МП № 2).

Примечание: в схеме 2 (рис. 4) в гнезда 1, 2 можно включить либо резистор R_3 , либо короткозамыкающую перемычку П, либо амперметр.

1. Измерьте значения сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и R_3 мультиметром М832.

2. Поставьте в гнезда 1, 2 резистор R_3 . Включите БП и установите на нем $U = 10$ В в режиме стабилизации напряжения (см. упр. 2.1).

3. Измерьте напряжение $U_{ВЫХ1}$ (относительно общей клеммы) при двух крайних положениях резистора R_2 вольтметрами трех типов: GDM-8145, мультиметром М832 и стрелочным

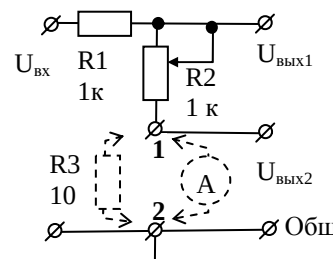


Рис. 4. Схема 2 МП № 2

М2018. Сравните их показания с учетом класса точности приборов.

Примечания: 1. В схемах, имеющих общую шину со значком «⊥», все напряжения $U_{ВХ}$, $U_{ВЫХ1}$ и $U_{ВЫХ2}$ обозначаются относительно общей шины. 2. Обратите внимание на правильность расчета приборной погрешности и записи результатов измерения. Данные представьте в отчете по работе.

Упражнение 3.2. Прямое измерение тока в цепях постоянного тока (схема 2 МП № 2).

1. Рассчитайте величину тока в схеме предыдущего упражнения при минимальном значении сопротивления потенциометра R_2 .

2. При выключенном тумблере Вк включите в гнезда 1, 2 мультиметр VC97 в режиме измерения тока с пределом измерения, удовлетворяющим вашему расчету.

Примечание: амперметр имеет очень малое сопротивление и при значительном превышении тока через него может выйти из строя. Поэтому будьте внимательны при выборе предела измерения.

3. Включите схему (тумблер Вк) и измерьте величину тока в ней при минимальном и максимальном значении R2.

4. При выключенном Вк замените мультиметр стрелочным прибором М2018 с нужным пределом измерения тока. Проведите измерения по пункту 3. Сравните результат с учетом погрешности приборов. Результат представьте к отчету.

Упражнение 3.3. Косвенное измерение тока (схема 2 МП № 2).

1. При выключенном Вк поставьте в гнезда 1, 2 резистор R3. Подключите к выходу $U_{\text{вых2}}$ вольтметр GDM-8145, рассчитав предварительно необходимый предел его измерения по постоянному напряжению.

2. Включите схему и проведите измерения напряжения $U_{\text{вых2}}$ при двух крайних положениях потенциометра R2. Запишите результат и определите величины тока для двух значений R2.

3. По результатам измерения $U_{\text{вых2}}$ рассчитайте величину тока в цепи и сравните результат косвенного измерения тока с прямым измерением, проведенным по пунктам 3 и 4 предыдущего упражнения. Сравнение проведите с учетом погрешности приборов. Результат представьте к отчету.

Задание 4. Проверка законов Ома и Кирхгофа

Напомним основные законы электрических цепей (введение пп. 5.1 ... 5.5):

– *закон Ома* для участка цепи: падение напряжения U на сопротивлении R при протекании по нему тока I равно $U = RI$;

– *первый закон Кирхгофа*: алгебраическая сумма токов, втекающих в некоторый узел, равна сумме токов, вытекающих из него: $\sum I = 0$;

– *второй закон Кирхгофа*: алгебраическая сумма всех падений напряжения в каком-либо замкнутом контуре равна алгебраической сумме всех эдс вдоль данного контура, т. е. $\sum I \cdot R = \sum E$, или $\sum U = \sum E$, или $\sum (E - U) = 0$.

Упражнение 4.1. Проверка закона Ома для участка цепи (схема 3 МП № 2).

В соответствии с законом Ома зависимость между током и падением напряжения на сопротивлении является линейной функцией: $I = f(U) = U / R$, где $R = \text{const}$. Следовательно, для проверки закона Ома нужно экспериментально построить зависимость $I = f(U)$, проверить степень ее линейности и по углу наклона прямой определить значение сопротивления R .

1. При выключенном тумблере Вк макета включите БП и установите на нем $U_{\text{вых}} = 10 \text{ В}$ в режиме стабилизации напряжения.

2. В гнезда AA' схемы 3 включите амперметр, а в гнезда BB' – вольтметр. В качестве амперметра используйте стрелочный прибор М2018 (предел измерения 30 мА), а вольтметра – прибор GDM-8145. Ручку потенциометра $R_{\text{рег}}$ установите в нижнее положение (против часовой стрелки).

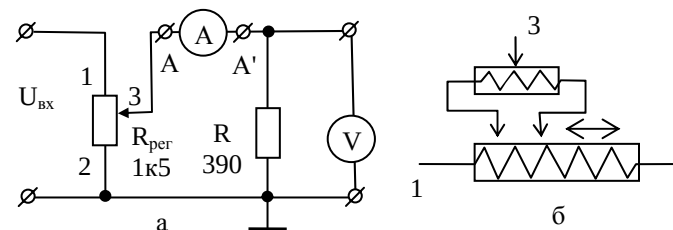


Рис. 5. Схема 3 МП № 2

Примечание: регулировочный потенциометр $R_{\text{рег}}$ позволяет осуществлять двойную регулировку – грубую и точную. При легком повороте ручки ползунок перемещается по верхнему резистору, показанному на рис. 5, б, и осуществляет точную подстройку величины сопротивления в пределах участка нижнего сопротивления, выделенного ползунками верхнего. После перемещения ползунка 3 влево и вправо до концов верхнего резистора последний весь как целое перемещается дальнейшим поворотом ручки по нижнему резистору в новое положение (грубая установка).

3. Включите Вк и, регулируя напряжение на измеряемом сопротивлении R (ручкой резистора $R_{\text{рег}}$), снимите показания приборов для 10...15 точек по всему диапазону регулировки $R_{\text{рег}}$. Пределы измерения амперметра и вольтметра регулируйте по мере надобности.

4. К отчету представьте график зависимости $I = f(U)$ и рассчитанное по угловому коэффициенту сопротивление R с учетом гарантированной величины погрешности измерения.

Упражнение 4.2. Проверка 1-го закона Кирхгофа (схема 4 МП № 2). Проверьте закон Кирхгофа для узла С схемы 4 (рис. 6).

1. Измерьте сопротивления всех трех резисторов в схеме 4.
2. Установите на БП значения $U_{\text{вых}} = 10$ В в режиме стабилизации напряжения.

3. При отключенном БП (выключить Вк) подключите к гнездам схемы амперметры A_1 (типа М2018, предел измерения 30 мА), A_2 и A_3 (типа М832), а к выходу схемы вольтметр GDM-8145.

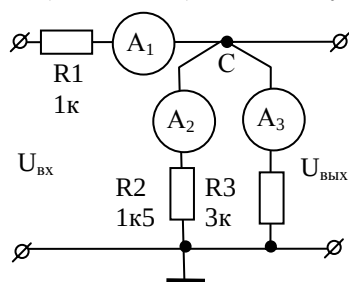


Рис. 6. Схема 4 МП № 2

4. Включите тумблер Вк платы и запишите показания всех приборов.

5. Прделайте те же измерения, уменьшив значение выходного напряжения БП до 5 В.

6 По данным пунктов 4 и 5 проверьте справедливость выполнения первого закона Кирхгофа с учетом точности приборов. Результат представьте к отчету.

Упражнение 4.3. Проверка 2-го закона Кирхгофа (схема 5 МП № 2). Проверьте закон Кирхгофа для контуров $abcd$ и $befc$ схемы 5 (рис. 7).

1. Удалив из схемы сменные резисторы R_3 и R_4 , измерьте сопротивления всех резисторов $R_1, \dots, R_6$ и установите на места резисторы R_3 и R_4 .

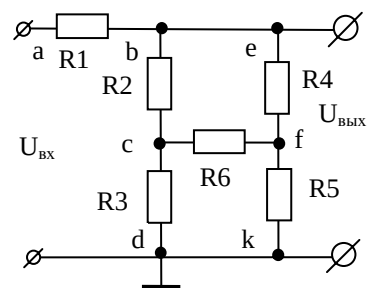


Рис 7. Схема 5 МП №2

2. Установите на БП значения $U_{\text{вых}} = 10$ В в режиме стабилизации напряжения.

3. Подключите БП к схеме и вольтметром GDM-8145 измерьте падения напряжения на всех элементах контуров $abcde$ и $aefk$.

4. Проверьте выполнение 2-го закона Кирхгофа для обоих контуров с учетом погрешности измерения. Результат представьте к отчету.

Задание 5. Влияние входного сопротивления вольтметра на результаты измерения напряжения.

Схема 6 МП № 2 (рис. 8) является высокоомной цепью. Измерение напряжения в такой цепи требует особо аккуратного учета влияния входного сопротивления вольтметра на результаты измерения (см. п. 7.2. введения).

1. Измерьте сопротивления резисторов R_1, R_2 .
2. Установите на БП напряжение $U_{\text{вых}} = 10$ В (режим стабилизации напряжения).

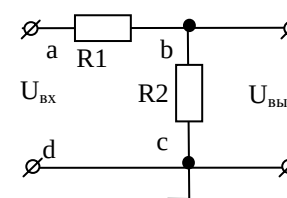


Рис. 8. Схема 6 МП № 2

3. Измерьте напряжение $U_{\text{вх}}$ вольтметром GDM-8145, а затем этим же вольтметром измерьте поочередно падение напряжения на резисторах R_1 и R_2 . Проверьте выполнение второго закона Кирхгофа для контура $abcd$ и объясните полученный результат.

4. Подключите к выходу вольтметр GDM-8145 и измерьте напряжение $U_{\text{вых}}$.

Другим вольтметром типа VC97 измерьте падение напряжения на резисторе R_1 . Обратите внимание на показания вольтметра GDM-8145 при подключенном и отключенном вольтметре VC97. Объясните полученную разницу.

5. Введите поправки к измеренным в пп. 3 и 4 напряжениям на учет входного сопротивления вольтметров. В соответствии с руководством по эксплуатации вольтметр GDM-8145 имеет $R_{\text{вх}} = 10$ Мом и VC97 – $R_{\text{вх}} \geq 10$ Мом. По результатам измерений пп. 3 и 4 оцените величины входных сопротивлений вольтметров.

Результаты измерений и оценки $R_{\text{вх}}$ вольтметров представьте к отчету.

Отчет по работе 8.1.

В отчете по работе 8.1 необходимо представить:

1. Зависимость выходного напряжения БП типа НУ-1500 от величины сопротивления нагрузки (шкала сопротивлений в относительных единицах) с объяснением полученного результата (задание 2 и п. 4 введения). Знать смысл трех режимов работы БП – режим стабилизации напряжения, тока и режим ограничения тока.

2. Эквивалентную схему вольтметра и амперметра. Запись результатов измерений по упражнениям 3.1–3.3 с соблюдением всех правил записи результата и определением величины приборной погрешности (задание 3 и п. 6.3 введения). Приведите значения входных сопротивлений вольтметров и амперметров, использованных в упражнениях.

3. График зависимости $I = f(U)$ с экспериментальными точками и аппроксимирующей прямой (упр. 4.1). Расчет погрешности определения величины R . Влияет ли нагрев резистора при максимальной рассеиваемой мощности на результат?

4. Результат проверки 1-го и 2-го законов Кирхгофа (упр. 4.2, 4.3).

5. Расчет влияния входного сопротивления вольтметров на результаты измерения (задание 5 и п.7 введения).

Работа 8.2

Измерения в цепях переменного тока

Цель работы: познакомиться с основными законами и элементами электрических цепей переменного тока и методами их измерения.

Оборудование: цифровой осциллограф типа Tektronix TDS1012, генератор сигналов типа GFG 8255 (SFG 2110), вольтметр универсальный типа GDM-8135 (GDM-8145), мультиметры типа M832, VC 97 (88E), измеритель иммитансов типа MT 4080, набор панелей (макетов) со схемами для выполнения упражнений.

Макетные платы (МП): № 1 «Элементы линейных цепей», №3 «Законы цепей переменного тока».

Задание 1. Знакомство с основными компонентами линейных цепей.

Внимание: если вы уже выполняли работу 8.1, то в данной работе можете сразу приступить к выполнению задания 2.

1.1. Макетная плата № 1

Плата предназначена для знакомства с различными пассивными компонентами электрических цепей: резисторами R , конденсаторами C , катушками индуктивности L и взаимной индуктивности M . Их эквивалентные схемы и единицы измерения представлены в параграфе 5.1. введения.

1.2. Краткая инструкция пользования прибором MT 4080

Иммитанс – общее название для *импеданса* Z , т. е. комплексного сопротивления, и *адмитанса* Y , т. е. комплексной проводимости: $Y=1/Z$. На рис. 1. представлено условное изображение передней панели прибора. Верхний ряд цифр индикаторной панели отражает величину (цифровое значение) измеряемого параметра, который высвечивается слева от этих цифр. Нижний цифровой ряд показывает значение вспомогательных параметров, указанных слева от него. Нижняя левая кнопка служит для установки измеряемой величины $L/C/Z/DCR$, а правая – для установки вспомогательного измеряемого параметра $D/Q/\theta/ESR$. Левая кнопка среднего ряда переключает частоту тест-сигнала f (частоту, на которой происходит измерение

параметров). Значение частоты высвечивается в нижнем ряду индикаторной панели.

Индуктивность и емкость могут измеряться по двум схемам замещения катушки индуктивности и конденсатора – по последовательной (L_s , C_s) и параллельной (L_p , C_p). В нашем случае рекомендуется проводить измерения L_s , C_s .

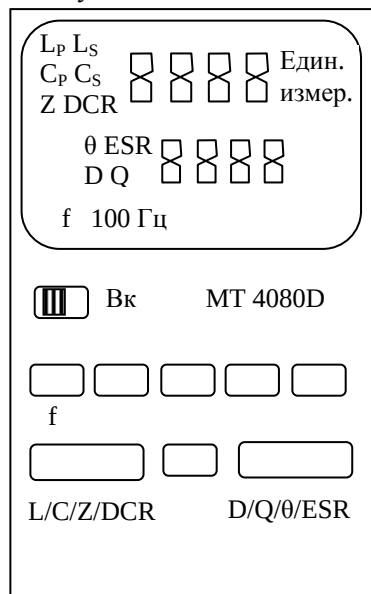


Рис. 1. Измеритель MT 4080

Измерения этих величин производятся на переменном токе, частоту которого можно устанавливать на значениях 100 и 120 Гц, 1 и 10 кГц (частота тест-сигнала f).

DCR – сопротивление постоянному току (активное сопротивление, элементов или участков цепи, измеряемое на постоянном токе).

Со значением остальных величин можно познакомиться в руководстве по эксплуатации измерителя иммитанса. Эквивалентное выходное сопротивление измерителя – $R_i = 100 \text{ Ом}$.

О схемах замещения, обозначениях и единицах измерения основных элементов линейных цепей прочитайте в п. 5.1. введения.

2. Измерения. После включения прибора кнопкой $L/C/Z/DCR$ выберите нужный параметр (индицируется слева вверху) и проведите измерение на частоте тест-сигнала 1 кГц. Помните, что катушка индуктивности представляет собой последовательное соединение индуктивности L и омического сопротивления провода R . Поэтому

замещения катушки индуктивности и конденсатора – по последовательной (L_s , C_s) и параллельной (L_p , C_p). В нашем случае рекомендуется проводить измерения L_s , C_s .

1. Измеряемые величины:

L_s/L_p – индуктивность при последовательной / параллельной схеме замещения (рекомендуемая для нас схема – последовательная, т. е. значение L_s);

C_s/C_p – емкость при последовательной / параллельной схеме замещения (рекомендуемая для нас схема – последовательная, т. е. значение C_s);

Z – модуль полного (комплексного) сопротивления элемента или участка цепи, включающего активные и реактивные элементы.

после измерения L включите режим измерения DCR и измерьте активное сопротивление катушки R_L .

3. Погрешности измерений. Базовая (основная) погрешность измерения составляет 0,2 %. Погрешность измерения может ухудшаться до 1...2 % на краях диапазона (при максимальных и минимальных значениях измеряемых величин), а на частоте тест-сигнала 10 кГц на максимальном поддиапазоне – до 5 %. Более подробные данные о погрешностях измерения на разных частотах тест-сигнала см. в инструкции по эксплуатации прибора.

Упражнение 1.1. Знакомство с элементами электрических цепей (МП № 1).

1. Обратите внимание, что резисторы отличаются не только по значению сопротивления, но и по величине мощности, которую они способны рассеять без превышения рабочей температуры. Резисторы переменной величины с тремя выводами называют *потенциометрами*.

2. Конденсаторы могут быть неполярными $C_1 \dots C_4$ или полярными (электролитическими C_5 , C_6), постоянными (по емкости) $C_1 \dots C_6$, подстроечными и переменными C_7 .

3. Катушки индуктивности могут быть как с ферритовыми сердечниками (либо подстраиваемыми, либо нерегулируемыми), так и без них. Сердечник может быть цилиндрическим (L_1) или кольцевым (L_2), а также броневым – полностью заключающим в себя катушку (L_3).

4. Катушки взаимной индуктивности наматываются либо поверх одна другой (L_4), либо в непосредственной близости друг от друга (L_5) таким образом, чтобы магнитное поле одной катушки пересекало витки другой катушки.

Упражнение 1.2. Измерение значений величин R , L , C , Z .

Познакомьтесь с кратким описанием измерителя иммитансов MT 4080 (прибор для измерения параметров линейных цепей R , L , C , Z , Q , $\text{tg}\theta$). Измерьте величины R , L , C , Z всех элементов, представленных на МП № 1.

Задание 2. Изучение генератора сигналов.

Упражнение 2.1. Знакомство с генератором. Генератор сигналов специальной формы типа GFG 8255 предназначен для генера-

ции сигналов синусоидальной, прямоугольной, пилообразной и треугольной формы в диапазоне частот от 0,5 Гц до 5 МГц.

2.1. Краткая инструкция пользования генератором GFG 8255

На рис. 2 приведено условное изображение передней панели генератора. Верхний ряд кнопок позволяет установить 7 поддиапазо-

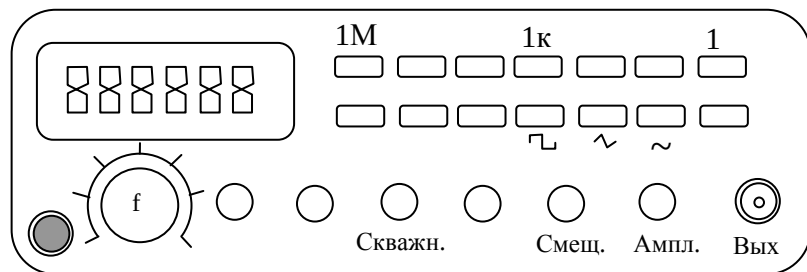


Рис. 2. Генератор GFG 8255

нов регулирования частоты от 0,5 Гц до 5 МГц. Три отмеченные значками кнопки нижнего ряда предназначены для задания формы сигнала.

Справа внизу находится выходной разъем и левее его – регулятор амплитуды выходного сигнала. Еще левее – регулятор смещения (добавка постоянной составляющей к выходному сигналу). Ручка «скважность» служит для изменения скважности (отношения T/T_n , где T_n – длительность импульса, а T – период повторения). Левая кнопка нижнего ряда – выключатель питания и рядом с ней ручка плавной установки частоты сигнала f в каждом поддиапазоне. Слева вверху – индикаторная панель, отображающая частоту сигнала и ряд вспомогательных параметров.

Этих сведений достаточно для оперативной работы с генератором. Более подробные сведения о режимах его работы нужно смотреть в руководстве по его эксплуатации.

1. Для первого знакомства с генератором подключите его выход к входу CH1 осциллографа Tektronix TDS1012. С краткой инструкцией работы с осциллографом вы можете познакомиться во Введении к лабораторным работам 3.1, 3.2.

Внимание: одна из выходных клемм генератора и осциллографа («земляная») соединена с корпусом. При их совместном

использовании «земляные» наконечники кабелей должны быть присоединены к общей шине схемы! Если клеммы перепутать, то выход генератора окажется закорочен, что опасно для его сохранности!

2. Включите приборы (генератор и осциллограф) и установите на выходе генератора уровень сигнала, близкий к максимальному, форму сигнала – синусоидальную. Получите на осциллографе устойчивую картину синусоидальных колебаний и все дальнейшие переключения режимов генератора контролируйте с помощью осциллографа.

3. Переключая кнопки и используя регуляторы нижнего ряда, проследите за изменением режимов работы генератора. Обратите внимание на действие регуляторов «смещение» и «скважность» при различной форме сигналов. Не забудьте, что в этом случае вход осциллографа должен быть настроен на регистрацию как постоянной, так и переменной составляющей (открытый вход DC).

Задание 3. Согласование выхода генератора с нагрузкой

3.1. Макетная плата МП № 3

Схемы для выполнения заданий работы размещены на макетной плате МП № 3. Слева расположены входные клеммы для подключения источника сигналов, являющиеся общим входом для всех схем. Отдельные схемы подключаются ко входу гибкой перемычкой П (рис. 3).

Упражнение 3.1. Определение выходного сопротивления генератора (схема 1МП № 3).

Генератор GFG 8255 имеет стандартизованный выход: максимальная амплитуда $U_{\text{вых}} \approx 10$ В на сопротивлении нагрузки $R_i = 50$ Ом. Это означает, что его можно представить эквивалентной схемой рис. 3, а. Для понимания сути эквивалентной схемы, роли различных режимов работы генератора и способов измерения его выходного сопротивления прочитайте п. 3 введения.

Схема 1 МП № 3 (рис. 3) включает три функциональных узла: узел *a* – генератор, узел *б* – делитель напряжения и узел *в* – нагрузка с регулируемой величиной сопротивления. Делитель можно исклю-

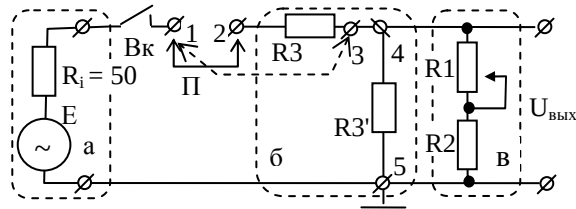


Рис. 3. Схема 1 МП № 3

чить из схемы, удалив резистор $R_{3'}$ из гнезд 1, 2 и замкнув резистор R_3 перемычкой П (пунктир на рис. 3). Сопротивление потенциометра R_1 регулируется (минимальное значение при повороте ручки против часовой стрелки).

1. Измерьте сопротивления резисторов R_1 , R_2 , R_3 и $R_{3'}$ мультиметром VC97. При измерении резистор $R_{3'}$ должен быть вынут из гнезд платы (почему?), а тумблер Вк – выключен.

2. Установите на выходе генератора максимальное выходное напряжение и частоту синусоидального сигнала 1 кГц. Удалите делитель *б*, замкнув резистор R_3 перемычкой П и удалив резистор $R_{3'}$ из гнезд 1, 2. Теперь нагрузка $R_1 + R_2$ с регулируемой величиной сопротивления (потенциометром R_2) подключается непосредственно к выходу генератора (тумблером Вк).

3. *Измерение эдс генератора.* При выключенном Вк измерьте выходное напряжение генератора вольтметром GDM-81345, имеющим входное сопротивление $R_{вх} = 10 \text{ Мом} \gg R_i$. При столь большом отношении $R_{вх}/R_i$ измеренное напряжение холостого хода U_{xx} будет с высокой точностью равно эдс генератора: $U_{xx} = E$.

4. *Измерение выходного сопротивления генератора.* Переключите вход вольтметра GDM-8145 на выход схемы, поставьте потенциометр R_2 на максимальное значение сопротивления (по часовой стрелке) и включите Вк.

Обратите внимание на то, что теперь выходное напряжение генератора уменьшилось $U_{вых} < U_{xx}$, поскольку сопротивление нагрузки $R_{н} = R_1 + R_2$ сравнимо по величине с выходным сопротивлением генератора $R_{н} \sim R_i$.

Уменьшая сопротивление потенциометра R_2 , добейтесь, чтобы выходное напряжение стало равно половине напряжения холостого хода: $U_{вых} = U_{xx}/2 = E/2$. Очевидно, в этом случае $R'_1 + R_2 = R_i$, где R'_1 – часть сопротивления потенциометра, соответствующая положению ручки.

5. Отключите генератор от схемы (тумблером Вк) и измерьте суммарное сопротивление $R'_1 + R_2 = R_i$. Результат (значения E и R_i) представьте к отчету.

Упражнение 3.2. Преобразование выхода генератора для обеспечения стабильной величины выходного напряжения на низкоомной нагрузке (схема 1 МП № 3).

Если нагрузка много больше выходного сопротивления генератора $|Z| \gg R_i$, то при ее небольшом изменении выходное напряжение генератора остается неизменным (п. 3.4, 3.5 введения). Но бывает, что при относительно малом импедансе нагрузки $|Z| \leq R_i$ необходимо выполнить условие стабильности выходного напряжения генератора. Это можно сделать, подключив нагрузку ($R_{н} = R_1 + R_2$) не непосредственно к выходу генератора, а к небольшому по величине сопротивлению $R_{3'}$ делителя напряжения из резисторов R_3 и $R_{3'}$ (рис. 3, б), значение сопротивления которого определяется условием $R_{3'} \ll |Z|$. Конечно, при этом приходится «пожертвовать» максимальным напряжением, которое может быть обеспечено на нагрузке.

1. Переставьте перемычку П в гнезда 1–2, а в гнезда 3–4 поставьте резистор $R_{3'}$. Теперь нагрузка $R_{н} = R_1 + R_2$ подключена к нижнему плечу делителя $R_3 + R_{3'}$.

2. Подключите к выходу вольтметр GDM-8145. Изменяя сопротивление потенциометра R_2 , определите, до какой величины можно изменять сопротивление нагрузки $R_{н}$, чтобы выходное напряжение сохранялось неизменным (с точностью 10 %).

3. Определите элементы новой эквивалентной схемы генератора (E^* и R_i^*) с учетом делителя R_3 , $R_{3'}$. Объясните результат и представьте к отчету.

Задание 4. Цепи переменного тока с активными и реактивными элементами.

Цель данного задания понять отличие электрических процессов в цепях переменного тока, включающих активные и реактивные элементы, и специфику электрических измерений в таких цепях. С законами переменного тока и расчетом реактивных элементов цепи познакомьтесь в пп. 5.2...5.4. введения.

Упражнение 4.1. Законы Ома и Кирхгофа для цепей переменного тока (схема 3 МП № 3).

Формально отличие расчета таких цепей отличаются тем, что

- падение напряжения на элементах цепи зависит от модуля импеданса $|Z|$;
- сам модуль импеданса зависит от частоты генератора;
- поэтому величины падения напряжения на элементах зависят не только от напряжения генератора, но и от частоты сигнала.

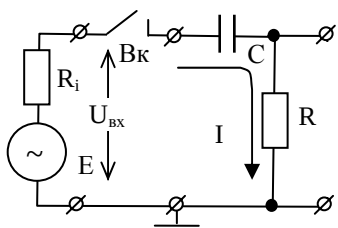


Рис. 4. Схема 2, МП № 3.

1. Подключите к входу схемы вход осциллографа. Включите генератор и установите на нем $U_{\text{вых}} \approx 5 \text{ В}$, $f = 1 \text{ кГц}$, сигнал синусоидальной формы.

2. Измерьте величины R и C .

3. Вольтметром GDM-8145 измерьте напряжения на резисторе U_R и конденсаторе U_C . Проверьте выполнение законов Ома и Кирхгофа для цепи переменного тока:

$$I = U_R/R, U_C = I|Z_C| = I/\omega C, U_{\text{вх}} = IZ,$$

$$Z = R + 1/j\omega C, |Z|^2 = R^2 + (1/\omega C)^2.$$

Второй закон Кирхгофа для цепи с реактивными элементами записывается в векторной форме, т. е. с учетом

разности фаз между напряжениями на элементах цепи. Его можно проверить, используя правила сложения векторов (п. 5.4 введения). Напряжение на емкости отстает по фазе на $\pi/2$ от тока, а следовательно, и от напряжения на резисторе (рис. 5). Векторная сумма падений напряжения на элементах

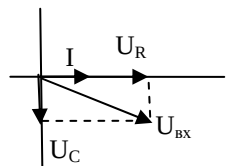


Рис. 5. $U_R + U_C = U_{\text{вх}}$

равна входному напряжению $U_R + U_C = U_{\text{вх}}$.

Упражнение 4.2. Фильтр верхних частот (схема 2 МП № 3).

RC-цепь, выходной сигнал которой снимается с резистора R (рис. 4), называется *фильтром верхних частот*. Основной характеристикой фильтров является АЧХ – амплитудно-частотная характеристика, представляющая зависимость коэффициента передачи K от частоты (рис. 6).

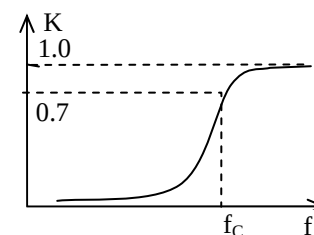


Рис. 6. АЧХ фильтра

Коэффициент передачи $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$. Частота среза f_c – частота, на которой коэффициент передачи K_c уменьшается в $\sqrt{2} = 0,707$ раз. Качественно такую зависимость выходного сигнала от частоты легко понять следующим образом. Для переменного тока емкость C и сопротивление R (рис. 4) составляют делитель напряжения $|Z_C|/|Z_R|$, коэффициент деления которого зависит от частоты. При стремлении частоты к нулю $|Z_C| \rightarrow \infty$ и для постоянного тока ($\omega = 0$) конденсатор представляет собой разрыв цепи. При $\omega \rightarrow \infty$ наоборот, емкостное сопротивление стремится к нулю и входной сигнал полностью проходит на выход.

1. Подключив к выходу схемы 2 (рис. 4) осциллограф, постройте АЧХ фильтра в полулогарифмическом масштабе (шкалу частот нанесите в логарифмическом масштабе). Определите *частоту среза* f_c схемы – т. е. частоту, при которой коэффициент передачи уменьшается до 0,7.

2. Отключите генератор и измерьте величины R и C мультиметром. Рассчитайте постоянную времени RC-цепи: $\tau = RC$ и сравните ее с величиной $1/\omega_c$. Результат расчета, АЧХ и значение f_c представьте к отчету.

Упражнение 4.2. Фильтр нижних частот (схема 3 МП № 3).

Если в RC-фильтре, рассмотренном выше, емкость заменить индуктивностью, то получится *фильтр нижних частот* (рис. 7). В данном случае с уменьшением частоты импеданс (полное сопротивление) катушки индуктивности будет уменьшаться и стремиться к омическому сопротивлению провода R_L , которым намотана катушка. И наоборот: с ростом частоты

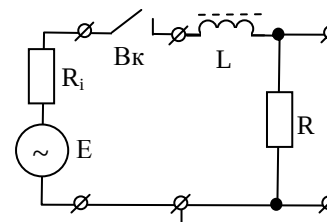


Рис. 7. Схема 3, МП № 3.

И наоборот: с ростом частоты

ты ($\omega \rightarrow \infty$) растет модуль $|Z_L| = [R_L^2 + (\omega L)^2]^{1/2}$, а выходное напряжение стремится к 0.

1. Подключив к выходу схемы 3 (рис. 4) осциллограф, постройте АЧХ фильтра в полулогарифмическом масштабе (шкалу частот нанесите в логарифмическом масштабе). Определите *частоту среза* f_c схемы – т. е. частоту, при которой коэффициент передачи уменьшается до 0,7.

2. Отключите генератор и измерьте величины R , L и R_L измерителем иммитансов МТ 4080. Рассчитайте постоянную времени RL -цепи: $\tau = L/R$ и сравните ее с величиной $1/\omega_c$. Результат расчета, АЧХ и значение f_c представьте к отчету.

Задание 5. Измерение коэффициента амплитуды и формы сигналов

Для описания величины переменных сигналов (напряжения и тока) используется ряд параметров, число которых зависит от формы переменного тока (см. п. 5.3. введения). Периодические сигналы обычно характеризуются следующими значениями: *мгновенным* значением $U(t_i)$, *постоянной* составляющей U_{Σ} , *амплитудным* значением U_a , *средним* (средневыпрямленным) значением U_c , *среднеквадратическим* (эффективным, действующим) значением U_o и *пиковым* значением U_n . Эти значения относятся как к напряжению, так и к току, хотя ниже мы будем говорить о напряжении.

Мгновенное значение – это значение напряжения в данный момент времени. Оно может быть определено только с помощью осциллографа по осциллограмме. Все остальные параметры могут быть измерены соответствующими вольтметрами (амперметрами).

Пиковое значение – это максимальное значение напряжения за заданный промежуток времени. Для *периодических* сигналов в качестве пикового значения принимается *амплитудное*.

В современных измерительных приборах в качестве дополнительной характеристики вводят значение R_k-R_k («от пика до пика»), которое для гармонических сигналов равно двойному амплитудному.

Для периодических сигналов соотношения между различными значениями (амплитудным, средним, среднеквадратическим) постоянны и характеризуются коэффициентами формы и амплитуды (п. 5.3. введения).

Упражнение 5.2. Измерения напряжения и определение коэффициента формы и амплитуды (МП № 3).

1. Подключите осциллограф и вольтметр GDM-8135 непосредственно к выходным клеммам входа генератора на плате (после выключателя Вк). Установите на генераторе синусоидальный сигнал частотой 1 кГц, амплитудой 1 В.

2. Измерьте коэффициенты формы k_ϕ и амплитуды k_a для сигналов синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы.

$$k_\phi = \frac{U_o}{U_c}; \quad k_a = \frac{U_a}{U_o}.$$

Для сигналов простой формы эти параметры известны (таблица):

	синусоид.	прямоуг.	треуг.
k_ϕ	1,11	1	1,155
k_a	1,414	1	1,733

Учтите, что шкалы вольтметров переменного тока обычно калибруются в среднеквадратических значениях (кроме вольтметров пиковых значений).

Отчет по работе 8.2

В отчете по работе 8.2 необходимо представить:

1. Эквивалентную схему генератора с измеренной величиной E и R_i .

2. Новую эквивалентную схему (считая выходной делитель «частью» генератора) и график зависимости $U_{\text{вых}} = f(R)$, где R в условных единицах его шкалы (по упр. 3.2).

3. По упр. 4.1 – результаты измерений и данные проверки законов Ома и Кирхгофа для цепей с реактивными элементами.

4. По упр. 4.2 и 4.3 – АЧХ фильтров и частоты среза. Объясните работу фильтров.

5. По заданию 5 представьте результаты измерения амплитудного, среднеквадратического напряжения и расчетные значения коэффициентов формы и амплитуды.

Библиографический список

1. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. Изд. 6. М.: Высш. Школа, 1973. 752 с.
2. *Измерения в электронике: Справочник* / Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 512 с.
3. *Левшина Е. С., Новицкий П. В.* Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). Учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат., Ленингр. отд-е, 1983. 320 с.
4. *Воронцов Ю. И.* Теория и методы макроскопических измерений: Учеб. Руководство / Под ред. В. Б. Брагинского. М.: Наука; Физматлит, 1989. 280 с.

9