



В. И. Козлов

**ОБЩИЙ
ФИЗИЧЕСКИЙ
ПРАКТИКУМ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
И МАГНЕТИЗМ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА

В. И. Козлов

ОБЩИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

**Под редакцией А. Н. МАТВЕЕВА
Д. Ф. КИСЕЛЕВА**

*Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
физических специальностей вузов*

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1987**

Козлов В. И. Общий физический практикум. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие/Под ред. А. Н. Матвеева, Д. Ф. Киселева. — М.: Изд-во МГУ, 1987. — 270 с.

Пособие составлено в соответствии с действующими программами по общему курсу физики и физическому практикуму для вузов страны. Лабораторные работы, включенные в пособие, поставлены в общем физическом практикуме физического факультета МГУ. Традиционные для общего физического практикума работы подверглись существенной технической модернизации и методически усовершенствованы, наряду с ними представлены новые по содержанию и нетрадиционные по тематике работы. Все лабораторные работы предусматривают широкое использование ЭВМ для обработки результатов эксперимента, приводятся соответствующие описания и рекомендации. В приложениях содержатся основные физические константы, таблицы физических величин и сведения о некоторых электро- и радиоизмерительных приборах.

Для студентов физических специальностей вузов.

Рецензенты:

кафедра физики Московского станкоинструментального института,
проф. **А. М. Васильев**

Содержание

Предисловие	4
Введение	5
Лаборатория электростатики и постоянного тока	6
1. Изучение электростатического поля	6
2. Градуирование электростатического вольтметра	13
3. Определение элементарного заряда	18
4. Электрические компенсационные измерения	24
5. Гальванометр магнитоэлектрической системы	31
6. Сегнетоэлектрики	43
Лаборатория электронных явлений	50
7. Определение работы выхода электрона	50
8. Определение удельного заряда электрона	55
9. Электронная лампа	59
10. Полупроводниковый диод	69
11. Тиристор	72
12. Транзистор	80
13. Усилитель переменного напряжения на интегральной микросхеме	87
Лаборатория магнетизма	97
14. Методы создания магнитного поля и измерения его индукции	97
15. Импульсное магнитное поле	115
16. Магнитная индукция в ферромагнетиках	123
17. Определение температуры Кюри ферромагнетиков	132
18. Эффект Холла	135
19. Доменная структура ферромагнетика	143
20. Ларморова прецессия	151
21. Магнитострикция	158
Лаборатория переменного тока	163
22. Переходные процессы в L -, C -, R -цепях	163
23. Амплитудные и фазовые соотношения в цепях переменного тока	169
24. Резонанс в цепи переменного тока	178
25. Измерения в цепях переменного тока мостовыми методами	190
Лаборатория радиофизики	197
26. Электронный осциллограф	197
27. RC -генератор гармонических колебаний	205
28. Тиратронный генератор релаксационных колебаний	211
29. Гармонический анализ	217
30. Изучение волнового поля трехсантиметровых электромагнитных волн, излучаемого рупором	222
31. Электромагнитные поверхностные волны в однопроводной линии	226
32. Электромагнитные волны в двухпроводной линии	229
Лаборатория основ автоматизации эксперимента	233
33. Электронное аналоговое моделирование	233
34. Физическая реализация элементов алгебры логики	241
35. Триггеры	255
36. Выделение сигнала из шума	265
Приложения	268

Предисловие

Книга содержит описания лабораторных работ раздела «Электричество и магнетизм» общего физического практикума физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Раздел состоит из пяти лабораторий, в которых студенты работают в течение второго семестра. Предварительно студенты проходят обучение в лаборатории по курсу «Введение в технику эксперимента», где они знакомятся с основами электрических и радиоизмерений. Тематика лабораторных работ соответствует программе общего физического практикума. За время, прошедшее после выхода в свет книги «Физический практикум. Электричество и оптика» под ред. В. И. Ивероновой (1968 г.), лаборатории практикума сильно изменились. Появился ряд принципиально новых лабораторных работ. Большинство прежних лабораторных работ подверглось столь существенной модернизации и методической переработке, что в настоящей книге они представлены практически новыми лабораторными работами, связанными с прежними лишь тематически. Работы, подвергшиеся незначительному изменению, сохранены лишь при наличии достаточно высоких учебных и методических достоинств.

Ряд лабораторных работ выполняется с обработкой результатов эксперимента на ЭВМ ЕС-1010. В описании таких работ объясняются подход к составлению программы и методики расчета.

Создание общего физического практикума для физического факультета является результатом многолетнего коллективного труда большого числа сотрудников кафедры общей физики и ряда сотрудников других подразделений. Имена всех сотрудников, внесших свой вклад в развитие практикума, невозможно указать. Всем им выражается признательность и благодарность.

В заключение приводим список авторов описаний отдельных лабораторных работ: Б. Б. Буховцев (3); В. С. Венкина (6, 21, 28); С. Ю. Галузо (14); С. В. Журавлев (34, 35); Е. Н. Ильичева (18); В. И. Ионов (1, 5); Н. Г. Канапина (16, 19); В. П. Кандидов (33); В. И. Козлов (6, 8 — 15, 18, 20 — 27, 29, 33, 36, введение и приложение, при участии в работе над описаниями лабораторных работ 1 — 5, 16, 18, 27, 30 — 32, 34, 35); Т. М. Козлова (17); Я. А. Крафтмахер (7); М. К. Кульман (33); И. Е. Лексина (16); Т. Н. Летова (13); В. С. Никольский (2); В. К. Петерсон (22); И. И. Попова (8, 21, 29); В. Н. Слудский (26, 27, 29); В. В. Снегирев (34, 35); Л. П. Стрелкова (27, 30, 31, 32), Ю. В. Тихонов (11, 12, 24); А. Г. Шишков (18); А. П. Штыркова (22, 24); И. А. Яковлев (1, 4, 5).

Введение

В лаборатории раздела «Электричество и магнетизм» общего физического практикума приходят студенты первого курса, уже получившие основные сведения о технике измерения физических величин, об измерительных приборах, о лабораторном оборудовании в процессе обучения по курсу «Введение в технику эксперимента».

Этот курс изучается студентами в лаборатории, где они приобретают практические навыки ведения экспериментальной работы, монтажа радиосхем, выполнения различных других лабораторных приемов. Опыт, полученный здесь, и сведения об электро- и радиоизмерительных приборах, технике измерения электрических величин [1], несомненно, должны способствовать более осмысленному выполнению студентами лабораторных работ общего физического практикума. Большинство лабораторных работ в методическом отношении построено таким образом, что студенту предоставляется возможность выполнить небольшое самостоятельное исследование. Студент сам должен установить режим работы приборов, выбрать область изменения, выбрать форму регистрации результатов измерений и представления результатов обработки эксперимента таким образом, чтобы результаты выполнения лабораторной работы были наиболее убедительными. Советы и указания, как это сделать наилучшим образом, изложены в пособиях [2; 3], уже в течение нескольких лет рекомендуемых студентам при работе в общем физическом практикуме физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.

1. Соболев Д. А. Введение в технику эксперимента. Под ред. А. Н. Матвеева и Н. Н. Журавлева. Изд-во Моск. ун-та, 1983.
2. Деденко Л. Г., Керженцев В. В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. Под ред. А. Н. Матвеева. Изд-во Моск. ун-та, 1977.
3. Булкин П. С., Волков Б. И., Воронцов М. А. и др. ЭВМ в курсе общей физики. Под ред. А. Н. Матвеева. Изд-во Моск. ун-та, 1982.

ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ И ПОСТОЯННОГО ТОКА

При выполнении работ лаборатории студенты знакомятся с электростатическими полями различной конфигурации, движением заряженных частиц в электростатическом поле, силовым взаимодействием заряженных тел, изучением полей методом электростатической ванны, влиянием диэлектрика на электростатическое поле, выполняют опыт Милликаена по определению величины элементарного заряда, изучают гальванометр магнитоэлектрической системы и метод компенсационных измерений.

Лабораторная работа 1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Выполняются экспериментальное исследование электростатического поля в простейших случаях и описание его при помощи силовых линий и поверхностей равного потенциала.

Методика исследования. Ортогональность силовых линий и поверхностей равного потенциала существенно облегчает как экспериментальное, так и теоретическое исследование электростатического поля. Именно, коль скоро найдены значения вектора напряженности поля, облегчается задача нахождения поверхностей равного потенциала. Справедливо и обратное: найденное положение поверхностей равного потенциала позволяет построить силовые линии поля. Последняя возможность и реализуется в настоящей лабораторной работе.

Теоретически, как правило, легче вести расчет потенциалов, чем напряженностей поля, так как первые суть величины скалярные, а вторые — векторные. Экспериментально измерения потенциалов также оказываются проще, чем измерения напряженностей поля, так как большинство приборов, пригодных для изучения полей, измеряет разность потенциалов, а не напряженности поля. Поэтому и в настоящей работе экспериментально изучается распределение потенциалов поля, а не напряженностей этого поля. Силовые линии изучаемых полей строятся уже потом как ортогональные к экспериментально найденным поверхностям равного потенциала.

В основу изучения распределения потенциалов в электростатическом поле часто кладется так называемый метод зондов. Его сущность заключается в следующем: в исследуемую точку поля вводится специальный дополнительный электрод — зонд, по воз-

возможности устроенный так, чтобы он минимально нарушал своим присутствием исследуемое поле. Этот зонд соединяется проводником с прибором, измеряющим приобретенный зондом в поле потенциал относительно потенциала какой-нибудь точки поля, принятого за нулевой. При этом необходимо обеспечить такие условия, чтобы зонд принял потенциал той точки поля, в которую он помещен. Только тогда показания прибора, соединенного с зондом, будут давать правильную картину распределения потенциалов в исследуемом поле.

Сложности работы с зондами и вообще трудности электростатических измерений привели к разработке особого метода изучения электростатических полей путем искусственного воспроизведения их структуры в проводящих средах, по которым пропускается постоянный ток. Таким путем прямое изучение электростатического поля заменяется изучением его точной, но более удобной модели. Оказывается, что при некоторых условиях распределение потенциалов в среде, по которой течет ток между установленными в ней электродами, может быть сделано тождественным с распределением потенциалов между теми же электродами, когда между ними имеется электростатическое поле в вакууме или в однородном диэлектрике. Измерения же распределения потенциалов в проводящей среде, по которой течет постоянный ток, — сравнительно легкая экспериментальная задача.

Поясним только что сказанное простым примером. Пусть имеются две концентрические металлические сферы. Если эти сферы заряжены, то в разделяющем их шаровом слое существует электростатическое поле, задаваемое зарядом только внутренней сферы. Поверхности равного потенциала в этом случае — концентрические сферы, силовые линии направлены радиально, напряженность поля убывает как $1/R^2$. Заполним шаровой слой между сферами однородным проводящим веществом, проводимость которого много меньше электропроводности сфер. Пусть далее к внешней и внутренним сферам подведены провода от источника тока, поддерживающего между сферами ту же разность потенциалов, которая была между сферами в первом случае. В шаровом слое, разумеется, идет постоянный ток.

Как известно, в однородном проводнике при прохождении по нему постоянного тока нет объемных зарядов; это значит, что поле в шаровом слое между сферами должно остаться таким же, каким оно было при наличии на сферах только статических зарядов и в отсутствие проводящей среды в шаровом слое.

Таким образом, можно заменить изучение электростатического поля между системой заряженных проводников изучением электростатического поля постоянного тока между той же системой проводников, если потенциалы проводников поддерживаются постоянными и соотношение проводимостей среды и проводника допускает предположение об эквипотенциальности последних.

Указанная замена изучения поля неподвижных зарядов изучением поля стационарного тока дает больше экспериментальных

преимуществ: 1) вводя в проводящую среду в качестве зондов простые металлические электроды, мы автоматически получаем выравнивание потенциалов зонда и той точки поля, в которую введен зонд; 2) зонды в этом случае могут быть соединены с токоизмерительными приборами, а не с электростатической аппаратурой, которая всегда гораздо сложнее и ненадежнее в работе, чем токовые приборы.

Надо иметь в виду, что электрическая цепь зонда должна обладать большим сопротивлением по сравнению с сопротивлением проводящих слоев вещества между точкой, в которую помещен зонд, и ближайшим электродом. В противном случае включение зонда исказит распределение потенциалов в исследуемом поле.

Отдельного замечания заслуживает вопрос об изучении строения электростатического поля в пространстве, заполненном диэлектриком, в особенности неоднородным диэлектриком. Как известно, в тех случаях, когда весь объем поля заполнен однородным диэлектриком, структура поля остается такой же, как и в отсутствие диэлектрика. Поэтому такое поле может быть заменено на общих основаниях полем стационарного тока. Если же объем изучаемого поля заполнен неоднородным диэлектриком, то такому полю должно быть приведено в соответствие поле стационарного тока в среде с неоднородной проводимостью. Мы не останавливаемся здесь на дальнейшем обсуждении этого вопроса, так как он в лабораторной работе экспериментально не исследуется, но предостерегаем от одной довольно распространенной среди начинающих работать ошибки. Именно: иногда предполагают, что введение в проводящую среду (в которой поле тока воспроизводит электростатическое поле) диэлектрических тел изменит конфигурацию поля в соответствии со значением диэлектрической проницаемости введенных тел. Это ошибочное предположение. Поле тока изменится в таком случае в соответствии со значением проводимости введенного тела, а не его диэлектрической проницаемости.

Практическое осуществление описанного приема изучения электростатического поля будет ясно из объяснения устройства применяемой для этой цели простейшей установки.

Описание экспериментальной установки. В ванну, сделанную из материала с хорошими электроизолирующими свойствами (например, из оргстекла), помещают металлические электроды *A* и *B*, поле между которыми хотят изучить (рис. 1); контуры ванны показаны пунктирными линиями. Ванна заполняется жидким электролитом, проводимость которого мала по сравнению с проводимостью металла (например, водой). Электроды опираются на дно ванны и возвышаются над поверхностью налитого в ванну электролита.

Напряжение на электроды подается с потенциометра *R*, включенного на выходе выпрямителя *B* (см. рис. 1). В измерительную часть схемы входят зонд *Z*, нулевой гальванометр *G* и вольтметр *V*. Нулевым гальванометром называется стрелочный гальвано-

метр, нулевое деление шкалы которого расположено посредине шкалы, и стрелка прибора может отклоняться от него симметрично в обе стороны. Такой гальванометр удобен при работе с зондом, когда при поисках эквипотенциальной поверхности направление тока через гальванометр может менять знак. Принцип работы измерительной части схемы легко понять из следующих соображений.

Перемещая движок на делителе напряжения R , этому движку можно придавать различные значения потенциала относительно электродов, погруженных в ванну (разумеется, в пределах полной разности потенциалов, наложенной на электроды и на делитель). Наличие или отсутствие тока в цепи гальванометра зависит при этих условиях от того, в какой точке поля находится зонд. Если он находится в такой точке поля, потенциал которой равен потенциалу, установленному на движке делителя, то тока в цепи зонда и гальванометра не будет.

Геометрическое место всех точек поля, для которых в цепи зонда ток будет равен нулю (при данном положении движка на делителе), образует эквипотенциальную поверхность в исследуе-

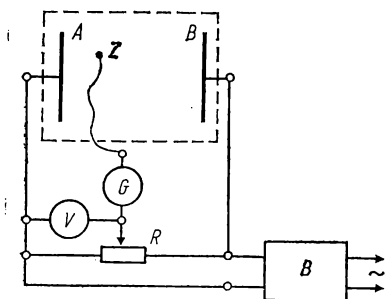


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

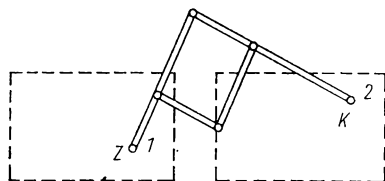


Рис. 2. Устройство пантографа

мом поле. Для измерения потенциала этой поверхности (относительно электродов, помещенных в ванну) служит вольтметр, включенный между движком и одним из электродов.

Процесс изучения исследуемого поля сводится, таким образом, к следующему: перемещая по этапам движок на делителе напряжения, придают движку различные значения потенциала. Для каждого установленного на движке значения потенциала находят путем перемещения зонда в ванне соответствующую эквипотенциальную поверхность исследуемого поля.

Теперь остается только выяснить, каким образом надо рационально фиксировать положение и форму всех находимых с помощью зонда эквипотенциальных поверхностей изучаемого поля.

Это делается графическим путем с помощью специального прибора, называемого пантографом (рис. 2). К концу рычага 1

пантографа прикрепляется вертикальный зонд Z , могущий беспрепятственно вместе с рычагами перемещаться в горизонтальной плоскости над электролитической ванной, в которой создано поле. Контуры этой ванны показаны на рисунке пунктиром. Нижний конец зонда погружен в электролит, а верхний при помощи гибкого провода соединен с гальванометром. Таким устройством зонда с рычагами можно обследовать всю ванну.

Для фиксации эквипотенциальных поверхностей служит правая часть пантографа. К концу рычага 2 пантографа прикреплен вертикальный карандаш K . Карандаш может свободно перемещаться вместе с рычагами над листом бумаги, контуры которого показаны на рисунке пунктиром. С помощью пружины карандаш в нормальном положении приподнят над бумагой и движется в горизонтальной плоскости, не касаясь поверхности бумаги. При нажиме сверху на карандаш пружина укорачивается, и нижний очищенный конец карандаша достает бумагу.

Система рычагов пантографа устроена таким образом, что все горизонтальные перемещения зонда в ванне автоматически воспроизводятся перемещением карандаша на бумаге. Пусть зондом с помощью гальванометра последовательно отыскиваются в ванне точки на исследуемой в данный момент времени эквипотенциальной поверхности. Если после нахождения каждой такой точки нажимать на карандаш пантографа, то этот карандаш будет наносить точку (отметку) на лежащем под ним листе бумаги. Если нанести на бумаге таким путем отметки, соответствующие всем отысканным с помощью зонда точкам некоторой эквипотенциальной поверхности, то, соединяя потом эти отметки плавной линией, мы воспроизведем на бумаге геометрическую форму и размеры горизонтального сечения исследуемой эквипотенциальной поверхности. Таким способом можно по ходу работы с зондом зафиксировать все находимые с его помощью эквипотенциальные поверхности. Если предварительно обойти (ощупать) зондом контуры поверхности электродов (это будут, по условиям опыта, также эквипотенциальные поверхности), непрерывно нажимая на карандаш, то мы получим на бумаге контуры горизонтальных сечений установленных в ванне электродов.

Разумеется, при всех описанных операциях лист бумаги под карандашом пантографа должен быть закреплен, иначе можно исказить всю геометрическую картину поля в результате случайных сдвигов бумаги. Указанным способом можно получить семейство эквипотенциальных линий. Так как эквипотенциальные поверхности и силовые линии ортогональны, то легко дополнить полученную картину и силовыми линиями. Это даст полное представление об изучаемом электростатическом поле.

Описанный метод исследования электростатического поля имеет не только иллюстративное значение; но и широкие применения на практике. Метод этот практически полезен для изучения сложных электростатических полей, точный расчет которых затруднителен из-за сложности граничных условий (многоэлек-

тродные радиолампы в отсутствие объемного заряда, электростатические линзы, фотоэлектронные умножители). При этом принципиальное значение имеет правило подобия потенциальных полей, позволяющее в большом масштабе воспроизводить подлежащие изучению поля. Правило подобия утверждает, что если размеры электродов, создающих поле, и все расстояния между электродами изменены в одной пропорции, то структура поля остается прежней.

При практическом выполнении лабораторной работы очевидно, что отыскание зондом эквипотенциальных поверхностей не должно проводиться бессистемно. Необходимо для каждого набора установленных в ванне электродов руководствоваться разумными соображениями о возможной в общих чертах конфигурации поля. В частности, необходимо привлекать при этом предварительное рассмотрение поля свойства симметрии данной системы электродов. Но для полного анализа структуры поля уже необходимы планомерные опыты с зондом. Наконец, необходимо в ходе опытов обеспечивать безопасные для гальванометра условия работы. Именно, устанавливая то или иное положение движка на делителе напряжения, надо перемещать и зонд в соответствующем направлении. При необдуманных действиях между зондом и движком реостата легко создать разность потенциалов, равную полной разности потенциалов между электродами, а это приведет к сгоранию обмотки рамки гальванометра.

Упражнение 1. ПОЛЕ ПЛОСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ

Установить в ванне систему двух плоских электродов. Поместить зонд вблизи одного из электродов, движок на делителе напряжения установить вблизи того конца реостата делителя, к которому присоединен этот электрод. Включить питание установки.

Исследовать зондом и зарисовать пантографом эквипотенциальные поверхности поля между электродами, надписывая соответствующие показания вольтметра около каждой линии на бумаге, обозначающей эквипотенциальную поверхность.

При всех измерениях особенно подробно обследовать зондом все участки сильных неоднородностей в поле, где эквипотенциальные поверхности, построенные через равные интервалы напряжения, располагаются особенно густо.

По полученной системе эквипотенциальных поверхностей построить картину силовых линий.

Упражнение 2. ПОЛЕ ПЛОСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ НАЛИЧИИ МЕЖДУ НИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЦИЛИНДРА

Положить в середину ванны, в только что исследованное поле, металлический цилиндр и исследовать поле в новых условиях.

Получить картину эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

Упражнение 3. ПОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОДОВ

Заменить плоские электроды цилиндрическими, удалить металлический цилиндр из середины ванны.

Исследовать поле цилиндрических электродов. Представить картину эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

Упражнение 4. ПОЛЕ КОАКСИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Поместить в ванну систему двух коаксиальных электродов и исследовать поле в пространстве между ними. Получить картину эквипотенциальных поверхностей и силовых линий.

Построить графики распределения потенциала в поле между электродами в зависимости от расстояния до оси внутреннего электрода.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими параметрами характеризуется электростатическое поле? Какая связь существует между ними в общем случае и в случае однородного поля? Какой из этих параметров предпочтительней измерять экспериментально и рассчитывать теоретически и почему?
2. Единицы измерения напряженности и потенциала в системах СИ и СГСЭ.
3. Какие экспериментальные методы существуют для изучения электростатического поля? В чем состоят трудности электростатических измерений?
4. Как создается модель электростатического поля в данной задаче? Какие экспериментальные преимущества имеет эта модель? Как на практике применяется метод подобия потенциальных полей?
5. Как теоретически обосновывается возможность замены экспериментального изучения электростатического поля полем постоянного тока? Показать, что при некоторых условиях электростатическое поле и поле постоянного тока удовлетворяют одинаковому дифференциальному уравнению и одинаковым граничным условиям, т. е. оба поля совпадают.
6. Нарисовать схему установки и пояснить порядок работы.
7. Как влияет на электростатическое поле внесение в него металлических и диэлектрических тел?
8. Построить график $U(R)$ для коаксиальных цилиндрических электродов.
9. Рассчитать сопротивление проводящей среды в электролитической ванне между двумя плоскими электродами (сферическими, цилиндрическими).
10. Оценить точность выполнения измерений.

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 2

ГРАДУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВОЛЬТМЕТРА ПО АБСОЛЮТНОМУ ЭЛЕКТРОМЕТРУ

Задачей данной работы является применение метода абсолютных измерений разности потенциалов для градуирования электростатического вольтметра, т. е. для установления соответствия между делениями шкалы прибора, отсчитываемыми по этой шкале, и значениями измеряемого напряжения.

Методика измерений

Измерения физической величины являются абсолютными, если они состоят в измерении физических величин другого рода. В настоящей лабораторной работе абсолютные измерения разности потенциалов состоят в измерении геометрических размеров элементов экспериментальной установки и силы их взаимодействия.

Измерение с помощью абсолютного электрометра сводится к измерению силы притяжения между двумя пластинами плоского конденсатора, которая может быть выражена через разность потенциалов пластин.

Рассмотрим плоский конденсатор, состоящий из двух круглых горизонтальных пластин P_1 и P_2 (рис. 1), расположенных параллельно на расстоянии d друг от друга.

Верхняя пластина P_1 окружена кольцом O , имеющим ту же толщину, что и P_1 , и находящимся в одной плоскости с P_1 . Между пластиной P_1 и кольцом O имеется незначительный зазор. Если нижнюю пластину P_2 зарядить до потенциала U_1 , а P_1 и O — до потенциала U_2 , то электрическое поле между P_1 и P_2 будет однородно, так как рассеяние поля заметно сказывается только у внешних краев кольца и пластины P_2 . Такое кольцо, позволяющее осуществить однородность электрического поля в плоском конденсаторе, получило название охранного кольца. Зная напряженность поля плоского конденсатора с воздухом между пластинами, легко подсчитать силу взаимодействия F между пластинами. Тогда для разности потенциалов $U_1 - U_2$ получим

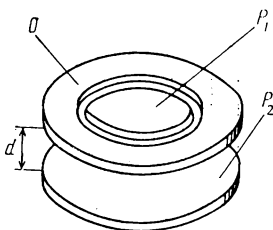


Рис. 1. Устройство плоского конденсатора

$$U_1 - U_2 = \frac{2d}{D} \sqrt{\frac{2F}{\pi\epsilon_0}}, \quad (1)$$

где d — расстояние между пластинами, а D — диаметр пластины P_1 . Силу F можно измерить с помощью чувствительных рычажных весов, если заменить одну из их чашек пластиной P_1 . Приборы, служащие для измерения разности потенциалов путем определения силы притяжения между пластинами заряженного плос-

кого конденсатора, носят название абсолютных электрометров, так как позволяют производить абсолютные (т. е. без предварительного градуирования прибора) измерения разности потенциалов.

Для других видов электрометров (например, струнного или квадрантного) не удастся рассчитать достаточно точно и просто зависимость между силой, действующей на подвижную систему электрометра, и размерами последней. Поэтому, чтобы с помощью таких приборов можно было измерять разности потенциалов, необходимо их заранее проградуировать по абсолютному электрометру. В этом случае измерения будут относительными.

В настоящей лабораторной работе абсолютный электрометр применяется для градуирования электростатического вольтметра.

Описание экспериментальной установки

Абсолютный электрометр. Главной частью этого прибора, схематически изображенного на рис. 2, является описанный выше

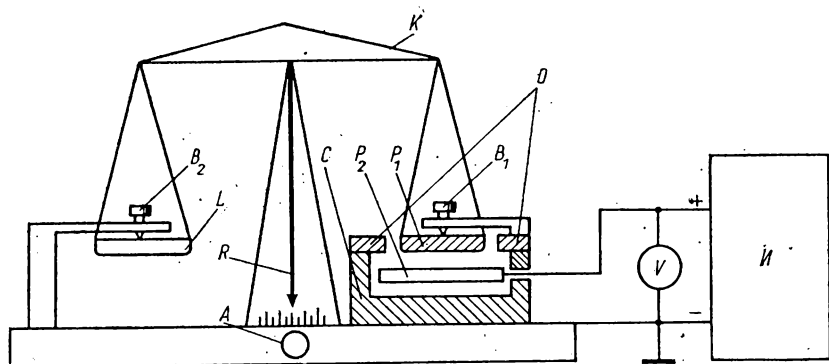


Рис. 2. Устройство электрометра

конденсатор, состоящий из пластин P_1 , P_2 и охранного кольца O . Верхняя пластина P_1 подвешена горизонтально к коромыслу K аналитических весов; нижняя пластина P_2 установлена параллельно P_1 внутри металлического цилиндра C , на верхней части которого укреплено охранное кольцо. К пластине P_2 , изолированной от цилиндра C , подводится проводник, потенциал которого измеряется. Так как цилиндр C заземлен, пластина P_1 также находится под потенциалом земли благодаря наличию электрического соединения между цилиндром C и этой пластиной через винт M , проводящий стержень N (укрепленный в нижней части весов), стойку весов S , коромысло K и нити подвеса. Цилиндр C служит экраном от внешних электрических воздействий на поле конденсатора, а также защитой от высокого потенциала, под которым может находиться нижняя пластина P_2 .

При незаряженном конденсаторе верхняя пластина уравнивается на одном уровне с охранным кольцом на расстоянии d от нижней пластины. Винт B_1 поддерживает пластину P_1 в этом положении, когда чашка L весов нагружена гирьками. Для того чтобы при зарядке конденсатора верхняя пластина под действием силы притяжения не соединилась с нижней, предусмотрен задерживающий винт B_2 . В начале измерений расстояние между концом этого винта и чашкой весов устанавливается 1—1,5 мм.

Для предохранения прибора от пыли и воздушных потоков электрометр заключен в ящик со стенками из органического стекла; передняя стенка сделана подъемной.

В нижней части прибора помещена ручка A для арретирования весов.

О равновесии весов можно судить по положению указателя R .

Электростатический вольтметр. В данной работе в качестве прибора V (рис. 2), подлежащего градуированию, взят электростатический вольтметр типа С-95.

Принцип действия такого вольтметра основан на электростатическом взаимодействии заряженных проводников. Измерительный механизм прибора состоит из неподвижного электрода 1 (рис. 3), представляющего собой металлическую камеру, и подвижного алюминиевого электрода 2 в форме пластинки. Камера укреплена на изоляционной колонке 3 из вещества, обладающего большим сопротивлением на высоких частотах (керамики, стеатита). Пластина 2 закреплена на оси 4 , которая установлена вертикально с помощью двух нитей 5 из бронзы (так называемых растяжек). Пружины 6 , укрепленные на стойке 7 , растягивают эти нити.

Измеряемое напряжение подводится одним полюсом к камере, а другим — к пластинке. Камера и пластинка заряжаются противоположными по знаку зарядами, и возникающая сила притяжения втягивает подвижную пластинку внутрь неподвижной камеры. Противодействующий момент создается упругими силами растяжек.

Для быстрого успокоения подвижной пластинки конец ее помещается в поле постоянного магнита 8 . Торможение возникает благодаря силам, действующим со стороны магнитного поля магнита на ток, индуцируемый в той части пластинки, которая движется между полюсами магнита.

Так как обычно в таких электростатических приборах моменты, действующие на подвижную часть, малы, то для отсчета по-

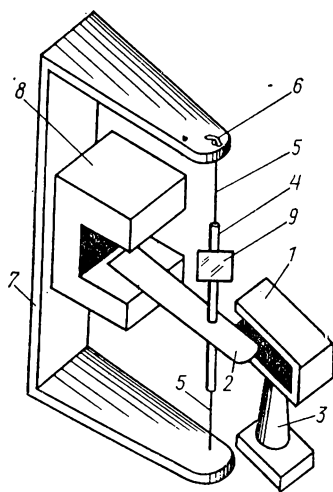


Рис. 3. Устройство электростатического вольтметра

казаний прибора пользуются световым лучом, отраженным от небольшого легкого зеркальца 9, укрепленного на оси 4.

Для уменьшения влияния внешних электрических полей прибор снабжен экраном, который заземляется.

Теория электростатического вольтметра дает следующее выражение для угла отклонения α подвижной части:

$$\alpha = \frac{1}{2K} \frac{dC}{d\alpha} U^2. \quad (2)$$

Здесь U — напряжение, подаваемое на вольтметр, C — емкость между электродами, K — момент кручения растяжек, приходящийся на единицу угла отклонения.

Из формулы (2) видно, что угол α зависит как от квадрата напряжения U , так и от изменения емкости C . Подбором размеров и формы электродов удастся сделать величину $dC/d\alpha$ постоянной. Поэтому обычно шкала электростатических вольтметров имеет квадратичный характер.

Квадратичная зависимость угла отклонения от напряжения позволяет применять такие приборы для измерения не только постоянного напряжения, но и напряжения переменного тока (до частоты порядка 30 МГц).

Эти приборы имеют малую входную емкость и высокое сопротивление изоляции; поэтому измерение постоянного напряжения происходит практически без потребления мощности самим прибором и с очень малым потреблением мощности при измерении переменного напряжения. Электростатические вольтметры пригодны для измерений высоких напряжений постоянного, а также переменного тока, причем при измерении высокого напряжения переменного тока не требуется применения специальных измерительных трансформаторов.

Источник напряжения. В качестве источника постоянного напряжения V_i (см. рис. 2) в работе используется высоковольтный стабилизированный выпрямитель, дающий плавно регулируемое напряжение от 0 до 1500 В.

Выполнение эксперимента

Проверить электрическую схему установки.

Источник напряжения, абсолютный электрометр и электростатический вольтметр, подлежащий градуированию, соединяются в соответствии со схемой, представленной на рис. 2. Весы электрометра освобождают от арретира и замечают положение стрелки R весов, соответствующее равновесию. Затем весы арретируют и на чашку кладут груз весом в 10 мг. Поворачивая винт B_2 , устанавливают его конец на расстоянии 1—1,5 мм от чашки (регулировка винта B_1 производится лаборантом до начала выполнения работы студентом). После освобождения весов от арретира пластина P_1 прижмется к винту B_1 . Далее, включают источник напряжения и, дав ему прогреться, через 2—3 мин начинают посте-

пенно повышать напряжение, плавно вращая ручку регулятора напряжения на щитке выпрямителя. При этом внимательно следят за показаниями градуируемого вольтметра. Увеличение напряжения производится до тех пор, пока стрелка весов не отклонится от начального положения. (Или пластина P_1 не оторвется от винта B_1 .) В этот момент замечают показание вольтметра n и сводят напряжение до нуля, устанавливая ручку регулятора в крайнее левое положение. При равенстве между силой притяжения пластины и весом гирьки, находящейся на чашке весов, происходит отрыв верхней пластины конденсатора.

Затем увеличивают груз еще на 10 мг и вновь повторяют весь процесс измерений. Измерения производятся до тех пор, пока не будет пройдена вся шкала вольтметра, причем при каждом последующем измерении нагрузка увеличивается на 10 мг.

Обработка результатов эксперимента. Для каждого значения веса гирек F , при котором происходит уравнивание весов, по формуле (1) вычислить значение напряжения U . Результаты оформить в виде таблицы и графика. На графике сначала нанести только экспериментальные точки $[U, F]$. Далее, провести расчет на основе метода наименьших квадратов и найти уравнение такой линии, которая окажется наилучшей с точки зрения метода.

Показания электростатического вольтметра n связаны с разностью потенциалов U , как это следует из формулы (2), следующим образом:

$$U^2 = \beta n. \quad (3)$$

После замены переменных

$$X = n, Y = U^2 \quad (4)$$

будем искать линию, описываемую линейным уравнением

$$Y = \beta X. \quad (5)$$

Программа для расчета на ЭВМ составлена таким образом, что вычисляется коэффициент β . Затем этот коэффициент подставляется в формулу

$$U_\tau = \sqrt{\beta n}, \quad (6)$$

по которой вычисляются теоретические значения напряжения U_τ , лежащие на кривой, наилучшим с точки зрения метода наименьших квадратов образом проходящей по экспериментальным точкам. Провести эту кривую на графике. Эта кривая и будет градуировочной кривой вольтметра.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие измерения называются абсолютными, относительными?
2. Вывести формулу, связывающую разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора с параметрами конденсатора и силой взаимодействия между пластинами.

3. Устройство и принцип действия абсолютного электрометра, используемого в работе.
4. Каково назначение охранного кольца, которым окружена верхняя пластина конденсатора абсолютного электрометра?
5. Принцип действия электростатического вольтметра.
6. Можно ли измерять данным электростатическим вольтметром переменные напряжения?
7. В каких единицах измеряется разность потенциалов в системах СГСЕ и СИ?
8. Какие существуют системы электроизмерительных приборов?
9. Повлияет ли на градуировочный график заполнение пространства между пластинами конденсатора диэлектриком?
10. Какие причины приводят к отличию зависимости между отклонением вольтметра и подаваемым на него напряжением от квадратичной?
11. Оцените точность выполненных измерений.

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1985.
3. Фриш С. Э., Тиморева А. В. Курс общей физики. Т. II. М.: Физматгиз, 1962.

Лабораторная работа 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЗАРЯДА

Методика эксперимента. Определение элементарного заряда может быть выполнено при помощи ряда методов:

- а) измерением заряда сосчитанных непосредственно частиц;
- б) статистической обработкой результатов наблюдений шротт-эффекта (дробовой шум в электронных лампах);
- в) из равенства $e_0 N = F$, где F — число Фарадея, N — число Авогадро (число Фарадея определяется непосредственно; число Авогадро может быть очень точно определено, например, из наблюдений дифракции на кристалле рентгеновских лучей известной длины волны);
- г) из измерения скорости перемещения заряженных микроскопических частиц в однородном электрическом поле.

В настоящей работе используется метод измерения скорости заряженных частиц в электрическом поле, так как он является одновременно наиболее прямым и убедительным доказательством прерывного строения электрических зарядов.

В основу метода положено изучение движения заряженных капелек жидкости (масла) в однородном электрическом поле известной напряженности.

Измеряя скорости капелек, падающих в поле силы тяжести (при отсутствии электрического поля), и скорости капелек, поднимающихся в поле сил тяжести при наличии электрического

поля, можно вычислить действующую на капельку силу электрического поля. Затем, зная величину напряженности электрического поля, уже нетрудно определить заряд капельки.

Измерение элементарного заряда по этому способу и доказательство дискретности электрического заряда были проведены в классических опытах Р. Милликена в 1914—1916 гг.

Получение значения e_0 с точностью, достигнутой Милликоном, невозможно в условиях учебной лаборатории. При выполнении настоящей задачи необходимо лишь обратить внимание на изучение метода и на доказательство дискретности зарядов, удовлетворяясь значением e_0 , полученным с невысокой точностью.

К микроскопическим капелькам жидкости, движущимся в воздухе, применим закон Стокса, в соответствии с которым сила сопротивления воздуха

$$F = 6\pi\eta v_g a, \quad (1)$$

где η — коэффициент внутреннего трения воздуха, v_g — скорость падения капли, a — радиус капли. При установившемся (равномерном) падении капельки в поле только силы тяжести сумма сил, действующих на капельку, равна нулю:

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma g - 6\pi\eta a v_g = 0. \quad (2)$$

Здесь σ — плотность вещества капли (масла), ρ — плотность воздуха, g — ускорение силы тяжести.

Установившаяся скорость движения заряженной капли, если она поднимается в электрическом поле, определяется уравнением

$$Ee + \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma g - 6\pi\eta a v_E = 0, \quad (3)$$

где E — напряженность электрического поля, e — заряд капли, v_E — скорость подъема капли.

В этих уравнениях все величины, за исключением заряда капельки e и ее радиуса a , доступны непосредственному измерению. Непосредственное измерение радиуса капельки сопряжено со значительными трудностями ввиду ее микроскопических размеров. Исключая из уравнений (2) и (3) радиус капельки a , находим выражение для величины заряда:

$$e = \frac{9\sqrt{2}\pi\eta^{3/2}}{E(\sigma - \rho)^{1/2}g^{1/2}} v_g^{1/2} (v_g + v_E). \quad (4)$$

Многokrатно повторяя измерение заряда одной и той же капли, можно заметить, что этот заряд время от времени меняется. Причиной изменения заряда капли может быть ионизация воздуха космическими лучами. Изменение заряда капли может происходить также в результате фотоэффекта при взаимодействии фотонов с веществом капли.

Сравнивая величины заряда одной и той же капли, получен-

ные из различных опытов, можно убедиться, что величина изменения заряда и сам заряд капли являются целыми кратными одной и той же величины. Эту величину e_0 естественно считать элементарным зарядом.

Наиболее точное значение этой величины по последним данным следующее: $e_0 = 4,80298 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЕ $= 1,6021892$ Кл.

При проведении эксперимента следует использовать капли микроскопических размеров, так как в этом случае заряд капли, а также его приращения равны достаточно малому числу элементарных зарядов. Поэтому кратность заряда капельки элементарному заряду e_0 устанавливается легче.

Точность измерения заряда капельки существенно зависит от точности измерения скорости ее движения (см. формулу (4)). При этом скорость v_g падения капли в отсутствие электрического поля, которая остается постоянной для одной и той же капли при изменении ее заряда, может быть измерена достаточно точно путем многократного повторения измерений. Для получения достаточной точности измерения скорости движения капельки в электрическом поле используют малую напряженность поля. Однако при этом на движении капль сказывается влияние воздушных конвекционных потоков, которое становится особенно заметным при малых скоростях перемещения капельки. Поэтому при осуществлении эксперимента существенное внимание уделяется уменьшению воздушных потоков.

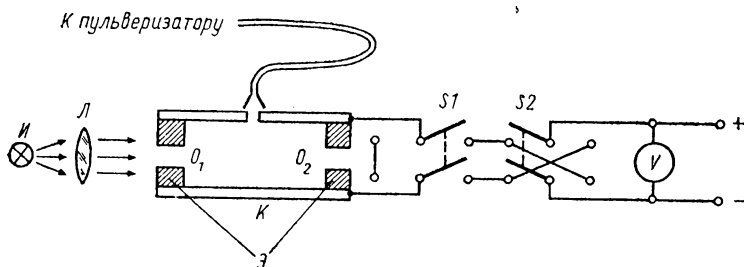


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Описание экспериментальной установки. Схема установки представлена на рис. 1.

В пространство между пластинами конденсатора K через отверстие в центре верхней пластины при помощи пульверизатора вводятся капли масла микроскопических размеров. За их движением наблюдают в оптическую трубу. Частицы освещаются пучком света, падающим перпендикулярно трубе от источника $И$, и видны в затемненном поле как светящиеся точки. Для уменьшения движения воздуха внутри конденсатора, которое могло бы исказить движение капелки, пространство между пластинами конденсатора ограничено с боков эбонитовым кольцом $Э$, имеющим три окошка. Два из них (O_1 и O_2) служат для прохождения

через конденсатор светового пучка, третье, перпендикулярное к первым двум, используется для наблюдения движения капель.

Разность потенциалов подается на пластины конденсатора от выпрямителя.

Выполнение эксперимента. Ознакомиться с элементами экспериментальной установки. При помощи пульверизатора в пространство между пластинами конденсатора вводятся микроскопические капельки масла. При распылении большинство капель электризуется, приобретая больший или меньший положительный или отрицательный заряд. Перемещением трубы, а также вращением конденсатора L , закрепленного несколько эксцентрично в оправе, добиваются отчетливой видимости капелек в виде звездочек на темном фоне.

Чтобы убрать капельки, несущие слишком большой заряд, пластинам конденсатора на некоторое время сообщают разность потенциалов около 300 В. При этом капельки с большим зарядом быстро двигаются к пластинам, капли же с малым зарядом двигаются медленно и не успевают за это время достигнуть электродов.

Все последующие измерения производят при разности потенциалов 200—250 В, которую поддерживают неизменной в течение всего эксперимента и периодически контролируют при помощи вольтметра V .

Выбрав ясно видимую обособленную капельку, которая под действием поля медленно движется вверх, выключают поле, при помощи ключа $S1$ замыкая конденсатор K накоротко. В отсутствие поля капля падает вниз.

Следует иметь в виду, что труба дает перевернутое изображение, поэтому наблюдатель будет видеть, что при наличии поля капля движется вниз, при отсутствии поля — вверх.

Определяют скорость падения капли, измеряя секундомером время прохождения капель нескольких (не менее трех) делений окулярного микрометра. Затем снова накладывают электрическое поле и измеряют уже скорость подъема той же капельки, отсчитывая время, затрачиваемое капелькой на прохождение того же числа делений окулярного микрометра. Перемещения данной капельки вверх и вниз повторяют много раз (не менее 15 в каждую сторону) одновременно включением и выключением поля.

Необходимо провести измерение не менее чем для восьми различных капелек, из которых некоторые должны обладать зарядом противоположного знака. При наблюдении за каплей, несущей противоположный заряд, надлежит соответственно изменить полярность пластин конденсатора, чтобы обеспечить движение капли вверх при наложении поля. Для этого служит переключатель $S2$.

В процессе измерения возможна перезарядка капельки, что резко меняет скорость ее подъема.

Пластины конденсатора K при измерениях должны находиться в строго горизонтальном положении. Правильность установки

может быть проверена с помощью уровня или по отсутствию систематического движения капелек вправо или влево в поле зрения трубы. Строго горизонтальное положение пластинам конденсатора может быть придано с помощью установочных винтов.

Обработка результатов измерений. Считая поле в центре конденсатора однородным, формулу (4) можно переписать в виде

$$e = \frac{9\sqrt{2}\pi d\eta^{3/2} P^{3/2} S^{3/2}}{U(\sigma - \rho)^{1/2} g^{1/2}} \frac{1}{t^{1/2}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_E} \right) = Ke^*, \quad (5)$$

где U — разность потенциалов на пластинах конденсатора, d — расстояние между пластинами, S — цена деления окулярного микрометра, t_g — время прохождения капель P делений окулярного микрометра в отсутствие электрического поля, t_E — то же при наличии электрического поля.

В формуле (5) выражение

$$e^* = \frac{1}{t^{1/2}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_E} \right) \quad (6)$$

можно рассматривать, как численное значение заряда капли, выраженное в некоторых относительных единицах. Величина K остается постоянной для всех капель при неизменном напряжении на конденсаторе и одном и том же числе делений окулярного микрометра, проходимых каждой каплей.

Результаты измерений рекомендуется представить в виде таблицы

t_g	t_E	$e^* = \frac{1}{t^{1/2}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_E} \right)$	Δe^*	Δn	$e_0^* = \frac{\Delta e^*}{\Delta n}$	n	$e_0^* = \frac{e^*}{n}$	a

В первой и второй графах записываются соответственно время опускания и время подъема капли, усредненные для ряда наблюдений за движением капли с одним и тем же зарядом. Изменение заряда капли, сопровождающееся резким изменением скорости, происходит довольно редко, вследствие чего мы получаем ряд значений скорости для одного и того же заряда. Разброс скоростей в этом случае относится к погрешностям эксперимента. В третьей графе записывается заряд капли в относительных единицах. В четвертой графе помещаются разности между двумя последующими числами третьей графы. Эти разности являются численными значениями изменения заряда капель, выраженного в относительных единицах. Если эксперимент был проведен достаточно тщательно, то при рассмотрении чисел четвертой графы

можно заметить, что они являются приблизительно целыми кратными некоторого числа e_0^* .

Числа кратности Δn , округленные до целого, выписываются в пятой графе.

Разделив величину изменения заряда на соответствующую ему кратность, получим ряд численных значений для элементарного заряда e_0^* в относительных единицах (шестая графа).

Если рассмотреть числа третьей графы, можно убедиться, что они также являются приблизительно целыми кратными некоторых чисел, совпадающих с числами шестой графы. Числа кратности n , округленные до целого, выписываются в седьмой графе.

Численные значения элементарного заряда e_0^* (в относительных единицах), полученные путем деления величин заряда (третья графа) на соответствующие кратности (седьмая графа), записываются в восьмой графе. Как указано выше, числа, помещенные в шестой и восьмой графах, должны примерно совпадать.

Представленные в таблице результаты должны явиться доказательством того, что изменение заряда капельки происходит конечными порциями и что заряд капельки состоит из целого числа элементарных зарядов, равных по величине наименьшей порции изменения заряда.

Абсолютное значение элементарного заряда e_0 вычисляется из соотношения (5):

$$e_0 = Ke_0^*.$$

За величину e_0^* следует взять среднее из всех экспериментально определенных относительных значений элементарного заряда.

Для каждой наблюдаемой капельки по формуле (2) следует вычислить радиус капельки a (девятая графа).

В применяемом приборе среднее расстояние между пластинами конденсатора $d = 0,72$ см; цена деления окулярного микрометра $S = 0,036$ см; плотность масла $\sigma = 0,91$ г/см³; плотность воздуха $\rho = 1,29 \cdot 10^{-3}$ г/см³; коэффициент внутреннего трения воздуха $\eta = 1,81 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой метод используется в данной работе для определения элементарного заряда?
2. Написать уравнение движения капельки жидкости в поле силы тяжести при отсутствии электрического поля и при наличии электрического поля.
3. Какие явления могут послужить причиной изменения заряда капли?
4. Какие ограничения накладываются на размеры капелек, исследуемых в эксперименте, и почему?
5. Какие причины влияют на точность измерения заряда капелек?

6. Почему нежелательно наличие в пространстве между пластинами конденсатора капелек с большим зарядом?
7. Каков элементарный заряд в системах СИ и СГСЕ?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Цель настоящей лабораторной работы заключается в изучении *компенсационных методов* измерения электродвижущих сил, токов и сопротивлений и в применении этих методов к некоторым конкретным случаям.

Метод компенсации является в настоящее время одним из основных приемов точных лабораторных электрических измерений.

Метод компенсации

Сущность метода можно понять, анализируя принципиальную схему измерений, изображенную на рис. 1. В этой схеме \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 — источники ЭДС с внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 , R_1 и R_2 — соответственно сопротивления участков цепи AB и BC . Обратим внимание на то, что источники электродвижущих сил соединены друг с другом одноименными полюсами. Обозначим через r_3 сопротивление подводящих проводов от элемента \mathcal{E}_1 и через r_4 — сопротивление подводящих проводов от элемента \mathcal{E}_2 . Токи, идущие в отдельных участках схемы, обозначим I , I_1 и I_4 .

Рассмотрим условия, в которых сила тока I_2 в цепи элемента \mathcal{E}_2 и гальванометра G будет равна нулю. Для этого напомним уравнения первого и второго законов Кирхгофа. Для разветвления токов в точке A имеем

$$I_1 = I + I_2.$$

Для контуров $\mathcal{E}_1 ABC \mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2 AB \mathcal{E}_2$ можем написать

$$I_1 R_1 + I(R_2 + r_1 + r_3) = \mathcal{E}_1, \quad I_1 R_1 + I_2(r_2 + r_4) = \mathcal{E}_2.$$

Решая совместно написанные уравнения при условии, что сила тока в цепи элемента \mathcal{E}_2 равна нулю ($I_2 = 0$), находим, что это будет иметь место, когда

$$\mathcal{E}_2 = I_1 R_1 = \frac{\mathcal{E}_1 R_1}{r_1 + r_3 + R_1 + R_2}. \quad (1)$$

Полученное условие означает, что сила тока в цепи элемента \mathcal{E}_2 равна нулю в том случае, когда падение напряжения на участке цепи AB , параллельно которому присоединен элемент \mathcal{E}_2 , равно электродвижущей силе этого элемента, т. е. компенсирует его.

От слова «компенсация» и получил свое название метод измерений, называемый *компенсационным*. Сущность его будет разъясняться ниже.

Если вместо элемента \mathcal{E}_2 ввести другой элемент \mathcal{E}_3 и вновь добиться отсутствия тока в цепи гальванометра и этого элемента (сохраняя неизменным значение общего сопротивления контура $\mathcal{E}_1ABC\mathcal{E}_1$), то сопротивление участка цепи AB будет равно некоторому значению R_1' . Теперь будет иметь силу равенство

$$\mathcal{E}_3 = \frac{\mathcal{E}_1 R_1'}{r_1 + r_3 + R}. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) легко находим

$$\frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} = \frac{R_1'}{R_1}.$$

Если электродвижущая сила элемента \mathcal{E}_2 известна, например, если это нормальный элемент, имеющий электродвижущую силу \mathcal{E}_N , то, зная R_1 и R_1' , мы можем из последнего равенства определить электродвижущую силу элемента \mathcal{E}_2 . Таким образом, сравнение электродвижущих сил двух элементов может быть практически сведено к сравнению двух сопротивлений, использованных при компенсационных измерениях.

Метод компенсации для измерений электродвижущих сил обладает рядом существенных достоинств. Во-первых, сила тока через элементы, электродвижущие силы которых сравниваются между собой, близка к нулю. Поэтому падения напряжения внутри элемента, снижающего значение измеренной на полюсах элемента разности потенциалов, практически нет. В этом методе ток через элемент при использовании чувствительного зеркального гальванометра может быть уменьшен до значения 10^{-9} — 10^{-10} А. Соответственно не играет также роли и падение напряжения в проводах, соединяющих элемент с измерительной схемой. Во-вторых, при компенсационном методе измерений гальванометр работает как нулевой прибор, и градуировка его шкалы в результате измерений не входит. Сопротивления, входящие в окончательное выражение, могут быть в настоящее время измерены с точностью до сотых долей процента. Наконец, величина электродвижущей силы вспомогательной батареи \mathcal{E}_1 также не входит в окончательный результат. Необходимо лишь, чтобы значение ее электродвижущей силы во время измерений было постоянным, кроме того, электродвижущая сила должна превышать электродвижущие силы сравниваемых элементов. Такую роль может с успехом выполнять батарея аккумуляторов.

Компенсационный метод измерения электродвижущих сил используется, в частности, для измерения электродвижущих сил термоэлементов, применяемых для измерения температуры. Метод компенсации позволяет достигать точности до 0,03% от измеряемой величины.

Описание экспериментальной установки

Практически описанный метод в простейшем варианте реализуется так, как это показано на рис. 2. В изображенной схеме \mathcal{E}_1 — батарея аккумуляторов, R_1 и R_2 — два штепсельных магазина сопротивлений Р-14 по 11111 Ом каждый, R — курбельный магазин сопротивлений на 9999,9 Ом, \mathcal{E}_N — нормальный элемент Вестона с известной электродвижущей силой (она указана в паспорте элемента, находящемся на установке), G — гальванометр, служащий индикатором отсутствия тока, через элемент \mathcal{E}_2 в момент компенсации его ЭДС, S_1 — двойной ключ, замыкающий сна-

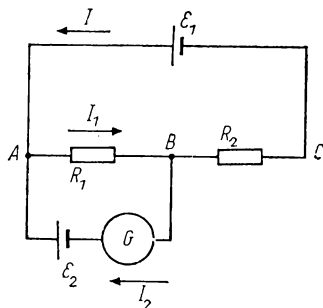


Рис. 1. Принципиальная схема установки

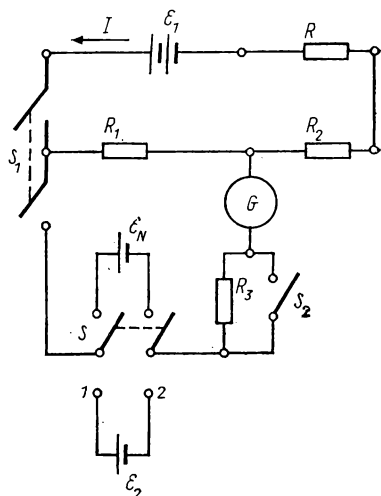


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

чала цепь вспомогательной батареи \mathcal{E}_1 , а затем цепь гальванометра и исследуемого (или нормального) элемента, R_3 — постоянное вспомогательное сопротивление, служащее для уменьшения тока в цепи гальванометра при предварительной, грубой компенсации, S_2 — однополюсный ключ, служащий для замыкания накоротко этого сопротивления при точной компенсации, S — двухполюсный перекидной рубильник, позволяющий включать в схему поочередно нормальный или исследуемый элемент.

Если путем изменения сопротивлений R_1 и R_2 , включенных в схему, достигнута компенсация, т. е. сила тока через исследуемый элемент и через гальванометр равна нулю, то согласно изложенному выше имеет место равенство $\mathcal{E}_2 = IR_1$. Следовательно, для определения электродвижущей силы исследуемого элемента нужно знать величину рабочего тока I , идущего через сопротивление R_1 , при котором наступает компенсация. Если установить ток равным 0,001 А, то значение искомой электродвижущей силы запишется в виде $\mathcal{E}_2 = 0,001 R_1$ В. Для получения определенного значения рабочего тока 0,001 А служат нормальный элемент \mathcal{E}_N и

переменное сопротивление R . Указанный способ осуществления компенсационного метода может показаться отличным от описанного выше принципа подобных измерений. Однако, как будет видно дальше, практически он сводится к тому же самому.

Установление рабочего тока. Установление рабочего тока силой в 0,001 А производится в два этапа. Сначала, зная по паспорту электродвижущую силу нормального элемента, устанавливают по расчету такое сопротивление R_1 (в магазине, включенном параллельно нормальному элементу), чтобы \mathcal{E}_N/R_1 было равно 0,001 А.

Полное сопротивление каждого магазина Р-14 составляет 11111 Ом. Сопротивления по 4, 3 и 2 кОм в магазинах вообще не используются, и штырьки в их гнездах остаются все время вставленными. Перед началом работы необходимо только проверить, насколько плотно они вставлены. Это указание относится также и ко всем другим штырькам неработающих сопротивлений. Следовательно, в каждом магазине привлекаются к работе сопротивления только из 2111 Ом, имеющиеся в каждом магазине сверх 9000 Ом, но и эти сопротивления включаются не полностью (см. ниже).

Итак, после того как установлено нужное значение сопротивления R_1 , включают во втором магазине сопротивления все те катушки, которые остались невключенными в первом магазине. Таким образом, сумма сопротивлений R_1 и R_2 , включенных в обоих магазинах, составляет вместе 2111 Ом. *Эта сумма сопротивлений $R_1 + R_2$ должна оставаться в дальнейшем все время постоянной.*

После этого переходят к фактическому установлению в схеме нужного рабочего тока от аккумуляторной батареи. Это делается с помощью курбельного магазина R (см. рис. 2). (Мы не останавливаемся здесь на описании способа работы с этим магазином, так как он вполне очевиден: нужные сопротивления включаются посредством вращений ручек курбелей, устанавливаемых против соответствующих стрелок.)

Для установления рабочего тока, учитывая сопротивление 2111 Ом, включенное в двух штепсельных магазинах, и ориентировочное значение электродвижущей силы батареи (из расчета 1,3 В на одну банку щелочного аккумулятора), устанавливают в курбельном магазине такое сопротивление R , чтобы приблизительно имело место равенство

$$\frac{\mathcal{E}_1}{R + 2111} = 0,001 \text{ А.}$$

После этого, установив перекидной рубильник в такое положение, чтобы к схеме был присоединен нормальный элемент, размыкают ключ S_2 и замыкают на короткое время двойной ключ S_1 , наблюдая за показаниями гальванометра. Стрелка гальванометра даст какое-то отклонение. Тогда, изменяя сопротивление, включенное в курбельном магазине, и нажимая на короткое время на двойной ключ, добиваются отсутствия тока через гальванометр. Когда от-

клонения стрелки гальванометра перестанут быть заметными, замыкают накоротко ключом S_2 предохранительное сопротивление гальванометра и вновь добиваются отсутствия тока через гальванометр в условиях возросшей чувствительности измерительной схемы.

Когда поставленное требование отсутствия тока в цепи гальванометра и нормального элемента выполнено, в цепи штепсельных магазинов действительно установлен рабочий ток силой в 0,001 А.

Упражнение 1. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Разомкнуть ключ S_2 и с помощью перекидного рубильника S присоединить к схеме элемент с неизвестным значением электродвижущей силы.

Теперь при нажатии на двойной ключ S_1 можно будет опять наблюдать отклонения стрелки гальванометра, так как электродвижущая сила включенного исследуемого элемента не будет скомпенсирована. Изменяя значения сопротивлений R_1 и R_2 в обоих штепсельных магазинах, но так, чтобы их сумма оставалась всегда постоянной и равной 2111 Ом, снова добиваются компенсации, т. е. отсутствия тока в цепи гальванометра. Это делают сначала при разомкнутом ключе S_2 , а затем окончательно при замкнутом ключе S_2 . Разумеется, что при всех этих операциях значение сопротивления R , включенного в курбельном магазине, остается все время постоянным.

Для соблюдения обязательного условия сохранения постоянства суммы двух сопротивлений R_1 и R_2 надо придерживаться следующего правила работы: каждый штырек, вынимаемый при компенсации измеряемого напряжения из рабочего гнезда одного магазина, немедленно вставляется в гнездо, отмеченное той же цифрой, второго магазина. Это гнездо во втором магазине будет обязательно свободным в силу принятого первоначального способа включения сопротивлений в обоих магазинах. Таким образом, автоматически будет сохраняться требуемое постоянство суммы $R_1 + R_2$.

Когда компенсация будет достигнута, значение электродвижущей силы исследуемого элемента может быть найдено из условия

$$\mathcal{E}_2 = 0,001 R_1,$$

где R_1 — сопротивление магазина, включенного в цепь параллельно исследуемому элементу. В самом деле, в процессе компенсации сумма значений всех сопротивлений $R_1 + R_2 + R$ в цепи вспомогательной батареи оставалась неизменной, следовательно, рабочий ток сохранил свое значение, установленное с помощью нормального элемента.

Надо отметить, что в настоящей работе демонстрируется общий принцип компенсационных измерений, и только поэтому используются три отдельных магазина сопротивлений. Практически

в лабораторных работах применяются комбинированные магазины сопротивлений, смонтированные вместе со всеми ключами, а нередко и с гальванометром. Такие установки носят название потенциометров. В потенциометрах обычно имеется отдельный магазин, соответствующий нашему курбельному магазину R , для установления рабочего тока. В качестве двух штепсельных магазинов используются также курбельные магазины. Вращающиеся ручки этих магазинов так соединены между собой, что условие постоянства суммы $R_1 + R_2$ (при изменениях R_1) автоматически выполняется: всякое сопротивление, введенное в одном магазине, одновременно автоматически выключается в другом магазине.

Измерения электродвижущей силы исследуемого элемента произвести два раза, меняя между собой ролями штепсельные магазины при неизменной общей измерительной схеме.

Упражнение 2. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА

Принцип осуществляемых в настоящем упражнении измерений легко понять на основании всего изложенного выше и рис. 3. Пусть надо измерить силу тока в контуре батареи \mathcal{E}_1 . В таком случае в этот контур кроме необходимых для работы приборов (в нашем случае это батарея аккумуляторов \mathcal{E}_1 , переменное сопротивление R , балластное сопротивление R_x , градуируемый миллиамперметр mA) включено еще специально для измерительных целей *эталонное* (или, иначе, *нормальное*) сопротивление R_N . Величина этого сопротивления заранее надежно измерена. Если мы будем знать величину падения напряжения U_N на нормальном сопротивлении, то из соотношений $U_N = IR_N$ можно найти искомую величину силы тока в контуре батареи \mathcal{E}_1 . Следовательно, задача сводится к измерению величины U_N . Но способ измерения U_N нам уже известен из предыдущего упражнения. Именно, присоединяя к клеммам 1 и 2 (рис. 2) перекидного рубильника вместо исследуемого элемента провода от клемм 1 и 2 эталонного сопротивления (см. рис. 3), мы можем измерить величину U_N так же, как измеряли раньше электродвижущую силу.

Надо только, разумеется, правильно задать полярность аккумуляторной батареи в том новом контуре, в котором измеряется сила тока. В противном случае компенсация падения напряжения на эталонном сопротивлении окажется невозможной. Компенсацию необходимо сначала вести при разомкнутом ключе S_2 в схеме рис. 2, а затем при замкнутом ключе.

В данном упражнении компенсационные измерения силы тока используются для градуировки некоторого миллиамперметра. По-

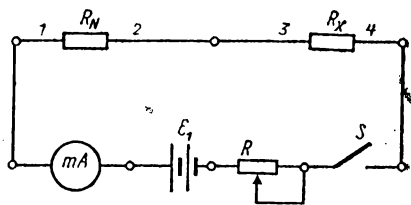


Рис. 3. Схема установки при измерении силы тока

этому в той цепи, в которой измеряется сила тока, кроме постоянного балластного сопротивления R_x имеются еще переменное сопротивление R и миллиамперметр. Переменное сопротивление позволяет устанавливать последовательно по этапам различные значения силы тока, текущего через миллиамперметр, постепенно проходя всю его шкалу. Каждое установленное значение силы тока измеряется компенсационным методом.

По результатам работы следует построить калибровочный график миллиамперметра, выражающий зависимость показаний этого прибора от силы протекающего через него тока. На основании этого графика надо найти среднее значение цены деления шкалы прибора, выраженное в миллиамперах.

Упражнение 3. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Компенсационный метод измерения сопротивлений является дальнейшим развитием описанного выше метода измерения силы тока.

Пусть мы хотим найти значение балластного сопротивления R_x в нашей схеме рис. 3. Так как это сопротивление включено последовательно с R , то через оба сопротивления идет ток одной и той же силы. Исходя из этого, легко написать, что $U_N = IR_N$ и $U_x = IR_x$, где U_N и U_x — соответственно значения падений напряжения на эталонном и балластном сопротивлениях. Следовательно, если мы измерим тем же компенсационным методом величины U_N и U_x , то, зная R_N , мы можем найти

$$R_x = R_N \frac{U_x}{U_N}.$$

Для этого надо к клеммам перекидного рубильника 1 и 2 (см. рис. 2) присоединить поочередно провода от клемм балластного и эталонного сопротивлений (см. рис. 3) и обычным путем измерить с помощью компенсационной схемы величины U_x и U_N . Измерения надо сделать при нескольких значениях силы тока в цепи, варьируя в ней сопротивление R так же, как это делалось при градуировке миллиамперметра. Измерения надо начинать всегда при разомкнутом и заканчивать при замкнутом ключе S_2 (см. рис. 2). В конце работы надо оценить точность сделанных измерений сопротивления.

В заключение необходимо отметить особые преимущества компенсационного метода измерения сопротивлений перед другими способами. При этом способе измерений на результате не сказывается сопротивление подводящих проводов. Существенно также и то, что значение силы тока, идущего через измеряемое и эталонное сопротивления, также никак не входит в конечный результат. Сила тока может иметь совершенно произвольное значение в пределах нагрузок, допустимых для сопротивлений данной конструкции. Кроме того, сила тока должна быть постоянна только в течение времени, достаточного для измерения величин U_N и U_x .

Как показывает ближайшее рассмотрение, компенсационный метод позволяет также полностью исключить влияние паразитных термоэлектродвижущих сил, легко возникающих во всех контактах цепи. Для этого требуется лишь добавление в схему специальных инверсионных переключателей у источников электродвижущих сил, включенных в схему. В настоящей работе мы ими не пользовались, чтобы не затруднять понимание принципиальной стороны.

Компенсационный метод является основным точным лабораторным приемом измерения сопротивлений и используется, в частности, для обслуживания таких важных приборов для измерения температуры, как термометры сопротивления. Метод позволяет при наилучших условиях измерений доводить их точность до сотых долей процента измеряемой величины.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему метод, используемый при измерениях в данной работе, называется компенсационным?
2. Какими существенными достоинствами обладает данный метод в сравнении с другими?
3. Нарисовать электрическую схему измерительной установки. Объяснить порядок действий, выполняемых при измерениях.
4. В чем состоит назначение двойного ключа S_1 ?
5. Каким образом в схеме устанавливается нужное значение рабочего тока?
6. С какой целью общее сопротивление в цепи вспомогательной батареи поддерживается постоянным?
7. Какова точность выполненных измерений? Какие факторы ее ограничивают?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 5

ГАЛЬВАНОМЕТР МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Изучаются устройство и принцип действия гальванометра магнитоэлектрической системы, измеряются его параметры: чувствительность по току и напряжению, период свободных колебаний рамки гальванометра, величина внешнего критического сопротивления, декремент затухания колебаний рамки.

Устройство и принцип действия гальванометра. Гальванометры — приборы, служащие для измерения слабых электрических токов — подразделяются по своей конструкции на две основные группы: 1) с подвижной катушкой, обтекаемой током и вращающейся в поле неподвижного магнита или электромагнита; 2) с подвижным магнитом и неподвижной катушкой.

Для измерения силы тока как в тех, так и в других приборах используется вращение подвижной системы, отклоняющейся от некоторого положения равновесия под влиянием взаимодействия тока и магнита. При точных измерениях применяются исключительно гальванометры первого типа.

Подвижная система такого гальванометра представляет собой в большинстве случаев четырехугольную рамку, составленную из плотно уложенных и склеенных изолирующим лаком четырехугольных витков изолированной тонкой проволоки сечением в несколько сотых миллиметра. Эффективное поперечное сечение такой катушки, пронизываемое линиями сил магнитного поля, составляет nQ , где n — число витков рамки, а Q — площадь сечения отдельного прямоугольного витка проволоки. Число витков в такой катушке бывает от нескольких десятков до сотни. Нить E с укрепленным на ней легким зеркальцем M (рис. 1, a) служит подвесом для рамки C . Рамка может свободно вращаться в зазоре, образуемом двумя полюсами постоянного магнита NS и цилиндром L из мягкого железа. В этом случае магнитное поле в воздушном промежутке почти радиально.

Нитью подвеса служит тонкая металлическая (платиновая) проволочка или бронзовая ленточка сечением в несколько микрон, или тонкая кварцевая нить, иногда платинированная по поверхности. Вторым подводом тока к катушке служит обычно металлическая серебряная или золотая ленточка толщиной в несколько десятых микрона. В гальванометрах с кварцевым подвесом обычно оба подвода тока к рамке выполняются в виде таких ленточек, соединенных с обмоткой рамки (катушки) гальванометра в нижней ее части. Подводы тока к подвижной системе гальванометра не должны оказывать упругого сопротивления вращению подвижной системы. Таким образом, моментом упругих сил, действующим на рамку, является только крутящий момент нити подвеса.

Перед началом работы гальванометр должен быть правильно установлен, что достигается вращением трех установочных винтов, на которые опирается корпус прибора. Это значит, что подвижная система гальванометра, удерживаемая в фиксированном положении до начала работы специальным приспособлением (арретиром), должна после освобождения арретира свободно двигаться между полюсами магнита, не касаясь их при вращении. Малость зазора между полюсами магнита и центральным цилиндром требует весьма точной установки прибора.

Для правильной установки некоторые системы гальванометров снабжены уровнями. В других системах гальванометров в корпусе прибора установлено специальное наклонное зеркальце, которое облегчает наблюдения положения рамки относительно полюсов магнита.

Приборы первого типа устанавливаются по уровню при арретированной подвижной системе. Приборы второго типа устанавливаются при освобожденной подвижной системе. Арретир приводится в движение специальным рычажком или головкой винта, вы-

веденной где-либо из корпуса гальванометра и снабженной надписью.

Освобождение и закрепление подвижной системы гальванометра перед работой прибора (или по окончании ее) следует производить с большой осторожностью, так как толчки подвижной системы гальванометра, подхватываемой вилкой арретира, передаются непосредственно тонкой нити подвеса. Студентам выполнять самостоятельно эту операцию в практикуме не рекомендуется.

Верхний конец нити подвеса закреплен во вращающейся головке (обозначенной на корпусе прибора надписью «корректор нуля»), выведенной на верхнюю часть корпуса гальванометра. Вращением этой головки можно поворачивать подвижную систему гальванометра для установки ее в нулевое положение между полюсами магнита. Операция поворота рамки (катушки) гальванометра требует тех же предосторожностей, что и освобождение арретира прибора. Необходимо при этом иметь в виду, что при вращении головки корректора нуля рамка следует за вращением головки с запаздыванием, так как передача крутящегося момента к рамке осуществляется через нить подвеса. Поэтому, повернув корректор нуля на небольшой угол, следует всякий раз выждать, пока подвижная система прибора установится в новое положение. Только таким прерывистым вращением корректора нуля можно привести подвижную систему в нужное положение между полюсами магнита. В практикуме эти операции производятся также не студентами, а лаборантами.

Измерение силы тока основано на наблюдении углов поворота α рамки C . При протекании тока через обмотку рамки последняя испытывает вращающий момент сил, действующих на ток в магнитном поле. Как известно, при этом рамка стремится расположиться так, чтобы магнитный момент протекающего по ней тока был направлен вдоль внешнего магнитного поля.

При установившемся отклонении рамки имеет место равенство моментов сил, действующих на рамку со стороны магнитного поля, и крутящего упругого момента нити подвеса:

$$BnQI = D\alpha_{\kappa}, \quad (1)$$

где B есть индукция магнитного поля в воздушном промежутке, Q — площадь витка, n — число витков, D — момент сил кручения на единицу угла поворота, а I — сила тока, протекающего по виткам и сообщающего рамке угловое отклонение α_{κ} . Отсюда

$$I = C\alpha_{\kappa} = \frac{1}{S_I} \alpha_{\kappa}, \quad \text{где } C = \frac{D}{BnQ}$$

есть динамическая постоянная прибора, выражающая численно силу тока, отклоняющую подвижную часть прибора на угол $\alpha=1$. Величина

$$S_I = \frac{1}{C} = \frac{BnQ}{D} \quad (2)$$

называется токовой чувствительностью гальванометра.

Вольтовая чувствительность гальванометра S_U определяется соотношением

$$S_U = \frac{S_I}{R} = \frac{BnQ}{RD},$$

где R — сопротивление обмотки рамки гальванометра.

Из выражения (2) видно, что для увеличения чувствительности гальванометра необходимо, чтобы D было по возможности мало, а B , n и Q — по возможности велики. Уменьшение D достигается уменьшением поперечного сечения нити подвеса или увеличением ее длины. Значение величины B в воздушном промежутке возрастает при уменьшении размеров этого промежутка; увеличение nQ достигается увеличением числа витков, а это неизбежно приводит к уменьшению B . Обычно эти условия подбираются так, чтобы получалось максимальное значение произведения BnQ .

Описанная система приборов позволяет измерять самыми совершенными гальванометрами силу тока до 10^{-11} А и разность потенциалов до 10^{-8} В. Следует заметить, что техника конструирования и изготовления гальванометров достигла в настоящее время такого совершенства, что подвижная система гальванометра реагирует на статистические тепловые флуктуации тока в цепи гальванометра, что мешает точным измерениям в приборах высшей чувствительности.

При работе с гальванометром имеет важное значение не только его токовая или вольтовая чувствительность, но также характер движения его подвижной системы и время, в течение которого последняя займет положение равновесия, отвечающее конечному углу отклонения. Дело не только в том, чтобы экономить время измерений, но и в том, что режим измерительной цепи не всегда возможно поддерживать длительное время постоянным и отсчеты по гальванометру должны соответствовать вполне определенным состояниям той системы, в которую он включен. Движение рамки гальванометра, перед тем как она займет окончательное отклоненное положение после включения тока I , можно исследовать, рассмотрев уравнение ее движения.

Уравнение движения рамки будет

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = BnQI - P \frac{d\alpha}{dt} - Da, \quad (3)$$

где J — момент инерции подвижной системы, $BnQI$ — момент сил, направляющих движение рамки, Da — момент кручения подвеса рамки, $Pd\alpha/dt$ — момент сил, тормозящих движение рамки, причем $P = P_1 + P_2$, где P_1 — коэффициент торможения рамки вследствие трения ее о воздух, P_2 — коэффициент электромагнитного торможения, являющегося следствием того, что в обмотке рамки во время ее движения индуцируется электродвижущая сила.

Если коэффициент P_1 не поддается изменению или регулиров-

ке в готовом приборе, то величину коэффициента P_2 можно легко изменять, что позволяет, как будет видно дальше, изменять характер движения подвижной системы гальванометра.

Величина коэффициента P_2 может быть определена из следующих рассуждений. При повороте рамки на угол $d\alpha$ за время dt скорость возрастания площади двух полосок цилиндрической поверхности, описываемой вертикальными сторонами поворачивающейся рамки, будет $ab \frac{d\alpha}{dt} = Q \frac{d\alpha}{dt}$ (рис. 1, б), а скорость изменения потока магнитной индукции через поверхность этих полосок в радиальном магнитном поле будет $BQ \frac{d\alpha}{dt}$ (см. рис. 1, а).

Следовательно, электродвижущая сила, индуцируемая при этом в витках обмотки, равна

$$\mathcal{E} = -BnQ \frac{d\alpha}{dt}. \quad (4)$$

Если сопротивление обмотки рамки R_Γ , а сопротивление внешней цепи R , то, пренебрегая самоиндукцией обмотки, можно определить индуцируемый в рамке ток I' ; получим

$$I' = \frac{\mathcal{E}}{R_\Gamma + R} = \frac{BnQ}{R_\Gamma + R} \frac{d\alpha}{dt}.$$

Момент пары сил, действующих в магнитном поле на рамку, будет равен

$$BnQI' = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_\Gamma + R} \frac{d\alpha}{dt} = P_2 \frac{d\alpha}{dt},$$

откуда

$$P_2 = \frac{B^2 n^2 Q^2}{R_\Gamma + R}.$$

У готового гальванометра мы можем изменять величину R , а следовательно, и значение $P = P_1 + P_2$.

Вернемся к уравнению (3), рассмотрим его решение и разные случаи движения рамки гальванометра. Из этого уравнения видно следующее. Угловая частота ω_0 свободных колебаний разомкнутой рамки в отсутствие подведенного к ней тока и в условиях, когда можно пренебречь трением рамки о воздух, будет иметь значение $\omega_0 = D/J$. Для замкнутой рамки $\omega^2 = D/J - P^2/4J^2$, и колебания рамки (если ток к ней не подведен, но она была выведена из положения равновесия) будут происходить по закону

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\mu t} \sin(\omega t + \varphi), \text{ где } \mu = \frac{P}{2J}. \quad (5)$$

Если же в покоящуюся рамку ($\alpha=0$ и $d\alpha/dt=0$) будет включен

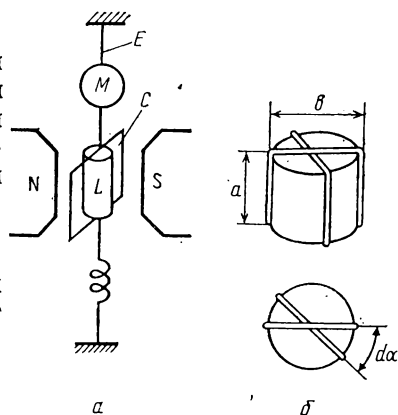


Рис. 1. Устройство гальванометра (а); изменение ориентации рамки (б)

ток постоянной силы, то движение рамки можно описать выражением

$$\alpha = \alpha_k \left[1 - e^{-\mu t} \sqrt{\frac{\mu^2 + \omega^2}{\omega^2}} \sin \left(\omega t + \arctg \frac{\omega}{\mu} \right) \right], \quad (6)$$

где $\alpha_k = BnQI/D$ — установившееся отклонение рамки гальванометра при прохождении по ней тока I (см. формулу (1)).

Рассмотрим следующие частные случаи применения найденного решения уравнения (3).

1. Если между постоянными прибора имеет место равенство $P^2 = 4JD$, то ω равно нулю и поворот рамки на угол α совершается аperiодически, т. е. рамка поворачивается и подходит асимптотически к положению равновесия, не переходя его. Характер движения рамки для этого случая изображен на рис. 2, а (кривая I),

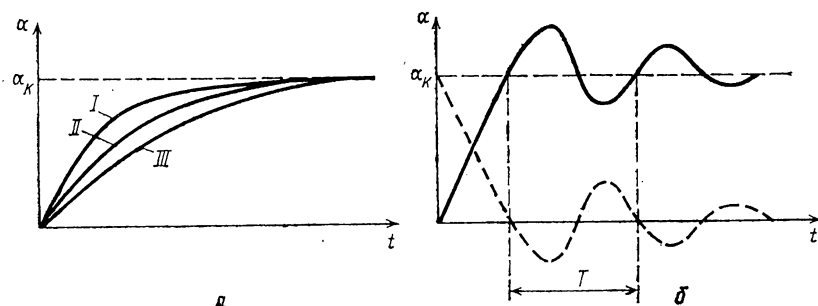


Рис. 2. Различные режимы движения рамки гальванометра

где по оси абсцисс отложено время от момента замыкания для трех разных затуханий, а по оси ординат — углы поворота рамки.

Гальванометр, у которого подобрано указанное равенство постоянных, называется критически успокоенным, причем этого удобнее достигнуть, изменяя величину того внешнего сопротивления R , на которое замкнута обмотка рамки.

Пренебрегая P_1 , положим $P = P_2$, т. е. $P = B^2 n^2 Q^2 / (R_\Gamma + R)$, а так как, с другой стороны, $P = 2\sqrt{JD}$, то для данного случая необходимо, чтобы

$$R_\Gamma + R = \frac{B^2 n^2 Q^2}{2\sqrt{JD}}, \quad (7)$$

что легче всего осуществить, подобрав соответствующее сопротивление R внешней цепи, на которую замкнута обмотка рамки. Иногда гальванометры снабжаются переменным магнитным шунтом, который, изменяя величину B , позволяет добиться критического успокоения при заданном значении R . В случае соблюдения равенства (7) величина $R_\Gamma + R$ называется полным критическим сопротивлением.

Следует обратить внимание на то, что электромагнитное торможение пропорционально B^2 , в то время как чувствительность пропорциональна B , поэтому изменения в напряженности поля значительно сильнее влияют на условия успокоения гальванометра, чем на его чувствительность.

Практически наиболее удобным для измерений является режим работы гальванометра, близкий к критическому, так как он обеспечивает минимальное время подхода подвижной системы гальванометра к положению равновесия. Обычно режим работы сдвигают несколько в сторону периодического колебательного движения рамки, устанавливая для суммы величин $R_{\Gamma} + R$ значение, равное 1,1 полного критического сопротивления.

2. Увеличивая трение, т. е. уменьшая сопротивление R внешней цепи гальванометра так, чтобы P^2 стало больше $4JD$, мы заставим поворачиваться рамку гальванометра тоже аperiodически, но с меньшей скоростью (см. кривые II и III на рис. 2, а). В этих случаях гальванометр называется переуспокоенным.

3. Если между постоянными гальванометра имеет место неравенство $P^2 < 4JD$, то движение рамки происходит периодически (колебательно). На рис. 2, б сплошная кривая изображает движение рамки в этом случае после замыкания цепи гальванометра, а пунктирная — то же после размыкания.

Колебательный характер движения рамки гальванометра описывается периодом T колебания и величиной затухания колебаний. Декремент затухания Δ определяется отношением двух следующих друг за другом амплитуд:

$$\Delta = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_2}{A_3} = \dots = \frac{A_n}{A_{n+1}}, \text{ где } A_n = \alpha_n \sqrt{\frac{\mu^2 + \omega^2}{\omega^2}} e^{-\mu n T} \quad (8)$$

(см. уравнение (6)). Натуральный логарифм этого отношения $\ln \Delta = \Lambda$, называемый логарифмическим декрементом затухания, весьма просто зависит от соотношения постоянных гальванометра:

$$\Lambda = \frac{PT}{2J}.$$

Это выражение легко получить из уравнений (6) и (8).

Период колебаний T в свою очередь зависит от соотношения постоянных гальванометра. Из уравнения (6) находим

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{J} - \frac{P^2}{4J^2}}}.$$

Из этого выражения видно, что у готового гальванометра период колебания рамки можно изменять, воздействуя на постоянную торможения P , ибо J и D не меняются.

При $P \approx 0$, чего можно достигнуть, заставляя работать гальванометр при замкнутой цепи рамки, период колебания его подвижной системы

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}}. \quad (9)$$

Период T_0 является, как мы увидим дальше, одной из основных характеристик гальванометра.

Из всего изложенного видно, что характер движения рамки (при неизменных J и D) можно легко изменять в широких пределах — от периодического с малым затуханием и до аperiodического, причем тот или иной режим движения рамки достигается в основном регулированием постоянной электромагнитного торможения P_2 , а последняя зависит от сопротивления внешней цепи, на которую замкнута обмотка рамки прибора. На этом же основан способ быстрого успокоения колебаний рамки (демпфирование). Достаточно ее обмотку замкнуть накоротко в тот момент, когда она в процессе колебаний проходит через положение покоя (нуля), чтобы она быстро остановилась.

Для уяснения вопроса о том, от каких факторов зависит чувствительность гальванометра, полезно выразить ее теперь в функции периода колебаний рамки и критического сопротивления гальванометра. Из ранее приведенных выражений имеем

$$R_{\Gamma} + R = \frac{B^2 n^2 Q^2}{2\sqrt{JD}} \quad \text{и} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}},$$

но $S = BnQ/D$, следовательно,

$$S^2 = \frac{2(R_{\Gamma} + R)\sqrt{JD}}{D^2} = \frac{(R_{\Gamma} + R)T_0}{\pi D}. \quad (10)$$

Таким образом, при заданном периоде гальванометра (практически 1—5 с) чувствительность пропорциональна корню квадратному из критического сопротивления, которое, казалось бы, надо поэтому делать возможно большим. Однако надо иметь в виду, что увеличение значения критического сопротивления ведет к понижению вольтовой чувствительности прибора. Между тем именно вольтовая чувствительность гальванометра определяет его ценность в целом ряде случаев.

В самом деле, гальванометр может иметь два разных назначения: он применяется как прибор для измерения либо малых токов, либо малых напряжений. Практически оказывается, что режимы работы цепей, в которых важно измерение малых токов и малых напряжений, в большинстве случаев резко различны. Так, измерение малых токов характерно для случаев, когда измерительная схема содержит большие сопротивления (фотоэлементы, ионные или электронные трубки). В этих случаях большие значения критического сопротивления гальванометра не являются помехой. Другое дело, когда гальванометр применяется для измерения малых разностей потенциала (термоэлектродвижущие силы, гальваномагнитные эффекты, включения гальванометра в потенциометрические или мостовые схемы). Обычно в этих случаях

сопротивление той цепи, на которую включается гальванометр, невелико, и при больших значениях критического сопротивления прибора он будет практически полностью задемпфирован. Поэтому в цепь гальванометра, обладающего значительным критическим сопротивлением, приходится искусственно вводить последовательно с прибором дополнительное сопротивление, создающее для подвижной системы режим движения, более близкий к критическому. А это значит, что вольтовая чувствительность гальванометра будет практически определяться частным от деления его токовой чувствительности не на внутреннее сопротивление прибора, а на его критическое сопротивление.

Таким образом, чувствительный к току гальванометр, но с большим критическим сопротивлением оказывается часто, несмотря на формально значительную чувствительность, малопригодным для измерения малых разностей потенциала. Между тем измерение малых разностей потенциала или контроль за доведением их до нуля является одним из распространеннейших назначений прибора. Изготовление гальванометров специально для этих целей (с малым значением критического сопротивления) не так просто, потому что значение критического сопротивления пропорционально величине тех же параметров (сравни соответствующие формулы), которые входят в выражение для токовой чувствительности,

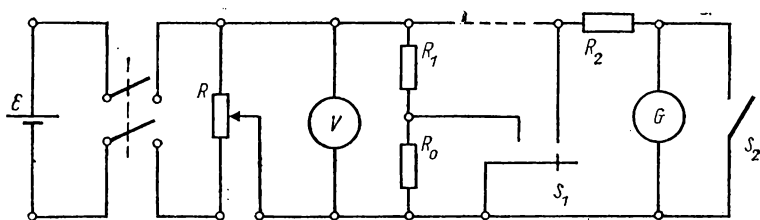


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

и растет пропорционально ее квадрату. Разумный компромисс между этими требованиями и составляет нелегкую задачу конструктора прибора.

Из всего сказанного следует, что выбор гальванометра для рационального обслуживания заданной электрической схемы имеет большое значение для успеха измерений.

Описание экспериментальной установки. Схема установки представлена на рис. 3. Здесь G — гальванометр М-21 или М-17, \mathcal{E} — аккумулятор на 1,4 В, R — делитель напряжения, V — вольтметр, R_0 — постоянное сопротивление (9000 Ом), R_1 — магазин сопротивления (1—50 Ом), R_2 — магазин сопротивления (1—9999 Ом), S_1 — переключатель цепи гальванометра, S_2 — ключ для демпфирования гальванометра.

Упражнение 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГАЛЬВАНОМЕТРА ПО ТОКУ

Сила тока в цепи гальванометра, как легко видеть из схемы, определяется следующим приближенным выражением:

$$I_{\Gamma} = \frac{U \cdot \frac{R_1}{R_0}}{R_{\Gamma} + R_2}, \quad (11)$$

где I_{Γ} — сила тока в цепи гальванометра, R_{Γ} — сопротивление рамки гальванометра. Значение R_{Γ} , входящее в формулу, может быть определено следующим образом.

При неизменном токе через гальванометр, но при различных значениях U и R_2 можно написать

$$\frac{U' \cdot \frac{R_1}{R_0}}{R_{\Gamma} + R_2'} = \frac{U'' \cdot \frac{R_1}{R_0}}{R_{\Gamma} + R_2''}, \text{ откуда } R_{\Gamma} = \frac{U'' R_2' - U' R_2''}{U' - U''}. \quad (12)$$

Входящие в правую часть формулы (12) величины определяются из опыта (см. ниже). Зная R_{Γ} , можно определить I_{Γ} , а затем и чувствительность к току по формуле

$$S_I = \frac{N}{I_{\Gamma} l} \quad (13)$$

или динамическую постоянную по формуле

$$C_1 = \frac{I_{\Gamma} l}{N},$$

где N — число миллиметров отклонения светового указателя по шкале от нулевого положения, l — расстояние в метрах от шкалы до зеркальца гальванометра. Чувствительность обычно выражают в миллиметрах отклонения, вызываемого током в 1 мкА при расстоянии от зеркальца до шкалы в 1 м ($\text{мм} \cdot \text{мкА}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$).

Постоянная гальванометра определяется силой тока (в мА), вызывающей отклонение указателя на 1 мм при расстоянии от зеркальца до шкалы в 1 м (мкА/мм/м).

Зная чувствительность к току, легко получить чувствительность к напряжению (вольтовую чувствительность) по формуле

$$S_U = \frac{S_I}{R_{\Gamma}}. \quad (14)$$

Однако, как подробно указано выше, практически эту величину часто приходится заменять другой, именно

$$S_U = \frac{S_I}{R_{\Gamma} + R} = \frac{S_I}{R_{\text{кр}}}. \quad (15)$$

В настоящей лабораторной работе подлежат вычислению вольт-вые чувствительности, найденные и по формуле (14), и по формуле (15).

После сборки схемы (см. рис. 3) и проверки ее преподавателем необходимо установить шкалу так, чтобы изображение нити светового указателя отсчетного устройства находилось на средней части его шкалы.

Включить рубильник и установить напряжение по вольтметру 0,5—0,8 В.

Включить сопротивление R_1 на 3—5 Ом, а сопротивление R_0 — на 9000 Ом и после этого ключом K_1 включить гальванометр. Если отклонение будет невелико, то, уменьшая сопротивление R_2 , добиться отклонения на 100—150 мм от нулевого положения и затем перейти к выполнению упражнения.

Подбирая по два значения U и R_2 , дающих одинаковые отклонения гальванометра, зафиксировать их в рабочей тетради.

Выполнив измерения несколько раз, по формулам (12), (13) и (14) вычислить средние значения величин S_I , S_U и R_I и оценить ошибки измерения.

Упражнение 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАМКИ ГАЛЬВАНОМЕТРА

Для определения периода свободных колебаний рамки гальванометра необходимо получить отклонение светового указателя по шкале на 150—200 мм, а затем разомкнуть цепь гальванометра ключом S_1 . После этого следует измерить время нескольких полных колебаний рамки с помощью секундомера и найти их период T .

Упражнение 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕГО КРИТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА

Получив отклонение светового указателя гальванометра на 150—200 делений, быстро переключают ключ S_1 таким образом, чтобы отделить гальванометр от источника напряжения и замкнуть рамку гальванометра на сопротивление R_2 . Ключ S_2 при этом, разумеется, остается все время разомкнутым. Затем наблюдают, в каком режиме движения (колебательном, аperiodическом) указатель подходит к нулевому положению. Наблюдения повторяют, уменьшая последовательно сопротивление R_2 до тех пор, пока движение рамки не станет аperiodическим. Разумеется, при каждом значении R_2 световой указатель будет в одном и том же режиме подходить как к нулевому положению (при вышеуказанной последовательности действия с ключом), так и к своему отклоненному положению (при обратном присоединении рамки гальванометра к источнику напряжения). Но практически удобнее вести наблюдения за режимом возвращения рамки к нулевому положению, так как отклоненное положение изменяется при

подборе нужного значения сопротивления R_2 и цепь гальванометра остается при этом присоединенной ко всей схеме, что нежелательно при наблюдениях режима движения рамки. Значение сопротивления R_2 , при котором движение рамки гальванометра становится аperiodическим, будет равно внешнему критическому сопротивлению гальванометра.

Упражнение 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РАМКИ ГАЛЬВАНОМЕТРА ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВНЕШНЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Схема остается без изменения, порядок работы тот же, что и в упражнении 3. В этом упражнении наблюдают за колебаниями светового указателя по шкале и записывают величину последовательных его отклонений вправо и влево (или в одну сторону). Произведя подобные измерения для различных сопротивлений R_2 , рассчитать декремент затухания и его зависимость от сопротивления внешней цепи гальванометра и построить график зависимости декремента затухания от внешнего сопротивления гальванометра R_2 .

Величину декремента определяют при значениях R_2 , не слишком близких к $R_{кр}$. Рекомендуемые для этого значения R_2 указаны непосредственно на установке.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен гальванометр магнитоэлектрической системы?
2. Доказать, что установившееся отклонение рамки гальванометра пропорционально силе протекающего по ней тока.
3. Какие факторы определяют работу гальванометра в периодическом, критическом и аperiodическом режимах? Каким образом можно переводить гальванометр из одного режима работы в другой? Какой режим работы гальванометра считается оптимальным?
4. Что называют внешним критическим сопротивлением гальванометра?
5. Нарисовать электрическую схему установки для определения параметров гальванометра. Объяснить порядок действий при измерениях.
6. Какой прием рекомендуется для быстрого успокоения рамки гальванометра?
7. Какие минимальные ток и напряжение можно измерять гальванометром?
8. Как режим гальванометра влияет на его чувствительность?
9. Объяснить природу электромагнитного торможения рамки гальванометра.
10. Почему гальванометр, предназначенный для измерения малых токов, не годится для измерения малых напряжений?

11. Какими параметрами описывается затухание колебаний?
12. Для чего гальванометры снабжаются магнитным шунтом?
13. Какова точность измерения параметров гальванометра?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 6

СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

В настоящей работе изучается зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от напряженности поля и от температуры.

Параметры сегнетоэлектриков. Титанат бария (BaTiO_3) относится к группе сегнетоэлектриков. Изучение диэлектрических свойств сегнетоэлектриков представляет большой интерес. Титанат бария — важнейший сегнетоэлектрик, обладающий высокой механической прочностью, большой механической устойчивостью, нашедший благодаря этому широкие научно-технические применения.

Сегнетоэлектрики относятся к классу ионных кристаллов, а электрические свойства кристаллов тесно связаны с их симметрией. Симметрия характеризует особенности расположения электрических зарядов в кристаллах. Можно выделить три типа этого расположения для диэлектриков.

В первом из них расположение положительных и отрицательных зарядов является центросимметричным, центры тяжести зарядов каждого знака совпадают друг с другом. В пределах одной элементарной ячейки такое совпадение означает, что эти центры тяжести совпадают с центром ячейки. Такие кристаллы называют неполярными.

В диэлектриках второго типа центры тяжести зарядов противоположных знаков в пределах элементарной ячейки не совпадают, и получающиеся при таком распределении электрические дипольные моменты во всех соседних ячейках параллельны. Совокупность всех так построенных элементарных ячеек, образующих кристалл, делает его макроскопически поляризованным в отсутствие внешнего поля (спонтанная поляризация). Такие кристаллы называют полярными.

В диэлектриках третьего типа центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, но распределение зарядов каждого знака не является центросимметричным. Отсутствие центросимметричности в распределении зарядов каждого знака разрешает наличие полярных направлений, однако геометрическая сумма всех дипольных моментов оказывается равной нулю. Такие кристаллы называют полярно-нейтральными.

Примером полярных диэлектриков служат сегнетоэлектрики —

вещества, которые ниже некоторой температуры (или в некотором интервале температур) в отсутствие внешнего поля имеют области спонтанной самопроизвольной поляризации — домены.

Такие температурные интервалы называются полярными интервалами, на границе их сегнетоэлектрики испытывают фазовые превращения, переходя в новые кристаллические модификации, в которых спонтанная поляризация не наблюдается.

Кристаллическая модификация, в которой сегнетоэлектрик спонтанно поляризован, называется полярной фазой, а модификация, в которой поляризации нет, — неполярной фазой. Температура, при которой сегнетоэлектрики переходят из полярной фазы в неполярную, называется точкой Кюри.

В сегнетоэлектриках в пределах каждого домена дипольные моменты всех элементарных ячеек ориентированы одинаково; в соседних доменах направления спонтанной поляризации составляют случайные углы друг с другом, так что геометрическая сумма электрических моментов всего кристалла равна нулю.

Деление на домены оказывается для кристалла энергетически выгодным, так как при этом полная энергия достигает минимума, и спонтанно поляризованный сегнетоэлектрик в полярной области температур обладает большой устойчивостью.

Следствием существования областей спонтанной поляризации в сегнетоэлектриках является наличие у них свойств, аналогичных свойствам ферромагнетиков: большие значения диэлектрической проницаемости, характерная кривая зависимости диэлектрической проницаемости от температуры с резким пиком в точке Кюри и гистерезис зависимости заряда конденсатора с сегнетоэлектриком от напряженности поля в области сильных полей при температурах ниже точки Кюри (рис. 1).

Изменение свойств при переходе через эту точку является следствием изменения кристаллической структуры сегнетоэлектрика. В титанате бария выше точки Кюри существует кубическая решетка, ниже — тетрагональная. Изучаемое фазовое превращение титаната бария является фазовым превращением второго рода или близким к нему переходом первого рода.

При внесении в электрическое поле сегнетоэлектрик поляризуется. Электрическая индукция сегнетоэлектрика складывается из трех составляющих:

$$D = \epsilon_0 E + P + P_0,$$

где E — среднее макроскопическое поле в сегнетоэлектрике, P — средний индуцированный электрический момент единицы объема, обусловленный поляризацией ионного смещения и смещения электронных оболочек и пропорциональный в слабых полях напряженности электрического поля, P_0 — электрический момент спонтанной поляризации, ϵ_0 — электрическая постоянная.

Векторы E и P имеют одинаковое направление, а вектор P_0 в общем случае имеет другое направление. В случае, если векторы P и P_0 пропорциональны вектору напряженности электрического

поля E , полная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика, обусловленная и поляризацией, вызываемой внешним полем, и спонтанной поляризацией, равна отношению

$$\epsilon = \frac{D}{\epsilon_0 E}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) получаем

$$\epsilon = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E} + \frac{P_{0E}}{\epsilon_0 E}, \quad (2)$$

здесь P_{0E} есть проекция P_0 на направление поля E .

В случае, когда P_{0E} и P не пропорциональны напряженности

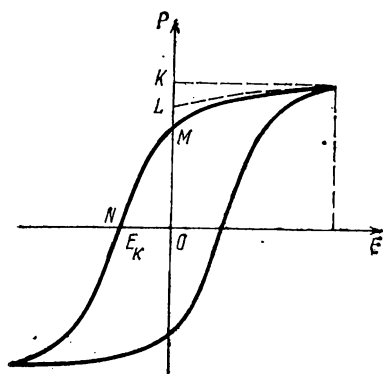


Рис. 1. Петля гистерезиса сегнетоэлектрика

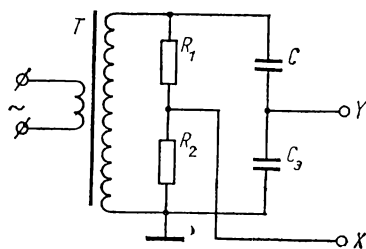


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

поля, можно определить лишь так называемую дифференциальную проницаемость:

$$\epsilon = 1 + \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial P}{\partial E} + \frac{1}{\epsilon_0} \frac{\partial P_{0E}}{\partial E}. \quad (3)$$

С увеличением внешнего поля полный электрический момент единицы объема $P_{\text{полн}}$ может увеличиваться по двум причинам: во-первых, в результате роста электрического момента индуцированной поляризации P ; во-вторых, вследствие возрастания числа доменов, направление электрического момента спонтанной поляризации которых совпадает с направлением внешнего поля или образует с ним острые углы.

Процесс поляризации сегнетоэлектрика носит необратимый характер. Сегнетоэлектрики обладают гистерезисом. Сущность гистерезиса заключается в том, что поляризация сегнетоэлектрика определяется не только значением напряженности поля, но и зависит от предшествовавших состояний поляризации.

При изменении поля от $+E$ до $-E$ и от $-E$ до $+E$ индукция и

поляризация в сегнетоэлектрике описывают замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса (см. рис. 1).

В общем случае и спонтанная поляризация и индуцированная поляризация являются нелинейными функциями напряженности поля. Однако в области не очень сильных полей индуцированная поляризация пропорциональна напряженности поля. В этой области можно разделить полную поляризацию на две составляющие следующим образом: экстраполируют ветвь насыщения петли гистерезиса (см. рис. 1) к значению поля, равному нулю. Отрезок KL соответствует индуцированной поляризации P , отрезок LO — спонтанной поляризации P_0 . Действительно, при насыщении можно считать, что ориентация вектора спонтанной поляризации P_0 в доменах закончена, и дальнейший линейный рост поляризации с увеличением напряженности поля осуществляется за счет возрастания индуцированной поляризации. Поскольку она линейно зависит от напряженности поля, то экстраполяция ветви насыщения до оси P дает отрезок KL , соответствующий индуцированной поляризации. Отрезок OM соответствует остаточной поляризации, а ON — коэрцитивной напряженности E_K .

Гистерезис можно наблюдать, подводя к образцу сегнетоэлектрика с посеребренными поверхностями (сегнетоконденсатору) переменное напряжение. Часть электрической энергии, которая при переменном напряжении в диэлектрике переходит в тепло, называют диэлектрическими потерями. Диэлектрические потери в сегнетоконденсаторе можно характеризовать тангенсом угла диэлектрических потерь, который выражается так:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{2\pi} \frac{W_T}{W}. \quad (4)$$

Здесь W_T — энергия, перешедшая в тепло в единице объема диэлектрика за время одного периода, W — максимальная плотность энергии, запасенной в конденсаторе.

Угол диэлектрических потерь δ дополняет угол сдвига фаз между током и напряжением до 90° .

В данной работе изучается явление гистерезиса в зависимости величины заряда на обкладках сегнетоконденсатора от приложенного к нему напряжения и исследуется зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры.

Описание экспериментальной установки

Образец представляет собой небольшой диск из титаната бария с посеребренными поверхностями — сегнетоконденсатор.

Исследование гистерезиса зависимости заряда на обкладках конденсатора от приложенного напряжения производится с помощью схемы, изображенной на рис. 2.

Напряжение от генератора подается на вход повышающего трансформатора, а с него на делитель напряжения, состоящий из сопротивлений $R_1 = 7 \text{ МОм}$ и $R_2 = 660 \text{ кОм}$. Параллельно дели-

телю включены две последовательно соединенные емкости: сегнетоконденсатор C с исследуемым образцом и эталонный конденсатор $C_3=0,15$ мкФ, причем $C \ll C_3$. Из схемы видно, что горизонтальные отклонения электронного луча на экране осциллографа пропорциональны напряжению, приложенному к образцу. Вертикальные отклонения пропорциональны напряжению на эталонном конденсаторе, пропорциональному заряду Q , одинаковому для эталонного конденсатора и сегнетоконденсатора:

$$U_{C_3} = \frac{UC}{C_3} = \frac{Q}{C_3}. \quad (5)$$

При прохождении переменным напряжением полного цикла изменения электронный лучок опишет замкнутую кривую $Q=f(U)$ зависимости заряда на конденсаторе C от приложенного к нему напряжения. Эта кривая представляет собой петлю гистерезиса. А поскольку напряжение на эталонном конденсаторе пропорционально также поляризации P и индукции D , то наблюдаемая на экране кривая изображает также зависимость поляризации и индукции от напряженности поля.

Электрическая схема для изучения гистерезиса смонтирована на специальной панели.

Напряжение от генератора подается на клеммы «вход», соединенные с первичной обмоткой повышающего трансформатора.

К клеммам «Х» и «У» панели подключаются горизонтальный и вертикальный входы осциллографа (см. рис. 2).

Для температурных исследований образец помещается в печь, где он может быть нагрет до 180°C . Температура измеряется термопарой медь — константан, подключенной к вольтметру со шкалой 10 мВ. Градуировочная кривая термопары дана в приложении к описанию. Емкость сегнетоконденсатора измеряется мостом ($C=100-200$ пф).

Упражнение 1. ГИСТЕРЕЗИС ПОЛЯРИЗАЦИИ ТИТАНАТА БАРИЯ

Собрать схему в соответствии с рис. 2, включить приборы в сеть и прогреть их. Установить частоту генератора $f=300$ Гц, так как эта частота соответствует наилучшим параметрам данной схемы.

Подбирая режим работы генератора и осциллографа, добиться появления на экране осциллографа петли гистерезиса.

Изменяя напряжение на образце в пределах 200–600 В, наблюдать за изменением сигнала, характеризующего величину полной поляризации P , остаточной поляризации, коэрцитивного напряжения.

Для всех наблюдаемых петель гистерезиса определить величину полной поляризации P и соответствующую ей напряженность электрического поля в образце.

Величина поляризации находится по формуле

$$P = \sigma = \frac{Q}{S} = \frac{U_3 C_3}{S} = \frac{Bn C_3}{S},$$

где σ — поверхностная плотность поляризационных зарядов, S — площадь пластин сегнетоконденсатора, U_3 — напряжение на входе Y осциллографа, B — чувствительность входа Y осциллографа, n — число делений, на которое отклонился луч по вертикали.

Напряженность электрического поля в образце определяется по формуле

$$E = \frac{U_c}{d} = \frac{Am}{d},$$

где d — толщина образца, A — постоянная установки, данная в приложении к описанию, m — число делений, на которое отклонился луч по горизонтали.

Определить величину максимального напряжения, подаваемого на образец, при котором петля гистерезиса еще не наблюдается, т. е. когда $P \sim E$, и соответствующую ему напряженность поля E .

Петлю гистерезиса, полученную при наибольшем напряжении на образце, изобразить графически в координатах P, E .

Построить график зависимости $P_{\text{полн}} = P(E)$.

У п р а ж н е н и е 2. ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТИТАНАТА БАРИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Измерение зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры сводится к измерению зависимости от температуры емкости сегнетоконденсатора.

Измерить емкость сегнетоконденсатора при комнатной температуре.

Включить печь, установить максимальную скорость нагрева. Снять зависимость емкости сегнетоконденсатора C от температуры в пределах от комнатной до 180°C . Обратить внимание на необходимость более частых измерений при быстром изменении емкости с температурой в области фазового перехода сегнетозлектрика ($t_{\text{фп}} \approx 120^\circ\text{C}$).

Величину диэлектрической проницаемости титаната бария при каждой температуре вычислить по формуле

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0},$$

где $C_0 = \varepsilon_0 S/d$ — емкость конденсатора без сегнетозлектрика.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу. Зависимость $\varepsilon(t^\circ\text{C})$ изобразить графически.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества относят к сегнетоэлектрикам? Какими свойствами обладают сегнетоэлектрики? Что такое домены?
2. Какими параметрами характеризуется поведение диэлектриков в электрическом поле?
3. В чем заключается поляризация диэлектриков? Какие типы поляризации имеют место в диэлектриках?
4. Как изменяется диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков при их нагревании?
5. В чем сущность гистерезиса в сегнетоэлектриках?
6. Как описываются потери энергии в диэлектриках?
7. Почему температурные зависимости диэлектрической проницаемости титаната бария, снятые при нагреве и охлаждении, могут различаться?
8. Нарисовать схему установки для исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков?
9. Каким образом изменяется и как измеряется температура образца?
10. Как используется осциллограф для наблюдения гистерезиса в титанате бария?
11. Каким образом по площади петли гистерезиса рассчитывается $\lg \delta$?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников Г. С. Электричество. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

При выполнении работ лаборатории электронных явлений студенты

изучают физические явления: эмиссию электронов из катода, движение электронов в электрическом и магнитном полях, движение носителей заряда в полупроводниках;

изучают физические законы: закон Ленгмюра—Богуславского и законы движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях;

знакомятся с устройством, принципом действия и применении-ми электровакуумных и полупроводниковых приборов (диодом, пентодом, транзистором, тиристором);

овладевают методами снятия характеристик этих приборов и расчета их параметров;

приобретают навыки работы с приборами: генератором напряжения звуковых частот, вольтметрами, миллиамперметрами, осциллографом, источниками питания, а также навыки работы с ЭВМ при обработке результатов эксперимента.

Лабораторная работа 7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

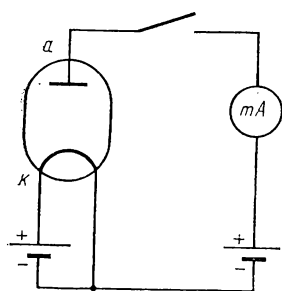


Рис. 1. Схема включения диода

Целью настоящей работы является определение работы выхода электрона из оксидного катода методом компенсации охлаждения нити. Этот метод основан на том, что при электронной эмиссии каждый электрон, покидающий катод, уносит с собой энергию, часть которой составляет работа выхода электрона Φ . Если катод электронной лампы (рис. 1) нагреть до температуры, достаточной для термоэлектронной эмиссии, то в случае разомкнутой анодной цепи устанавливается равенство числа электронов, покидающих катод, и числа электронов, возвращающихся на катод из области пространственного заряда. При замыкании анодной

цепи возникает движение электронов от катода к аноду. Вследствие этого происходит понижение температуры катода, связанное с указанным выше переносом энергии каждым электроном. Это

явление аналогично переносу энергии молекулами жидкости при испарении, в результате которого жидкость охлаждается.

При расчете переносимой энергии следует также учесть, что электроны покидают катод при температуре T , а возвращаются к катоду по проводнику, имеющему температуру T_0 . За счет этого каждый электрон переносит в среднем энергию $2k(T - T_0)$, где k — постоянная Больцмана. Это можно показать расчетом средней энергии электронов, способных покинуть катод. Коэффициент 2 здесь получается благодаря тому, что катод могут покинуть лишь быстрые электроны.

При установлении в лампе анодного тока I потеря энергии катодом за одну секунду в результате переноса энергии электронами составляет

$$\Delta W = \frac{I}{e} [\Phi + 2k(T - T_0)], \quad (1)$$

где e — заряд электрона.

Происходящее при замыкании анодной цепи лампы понижение температуры катода можно скомпенсировать увеличением тока накала. В случае катода прямого накала с сопротивлением нити R при повышении тока накала I_n на величину ΔI_n увеличение мощности накала нити-катода равно

$$(I_n + \Delta I_n)^2 R - I_n^2 R = 2RI_n \Delta I_n + R(\Delta I_n)^2 \approx 2RI_n \Delta I_n. \quad (2)$$

Здесь отброшен член, содержащий приращение тока в квадрате, так как этот член значительно меньше первого.

Если подобрать приращение тока накала ΔI_n так, чтобы восстановить прежнее значение температуры нити-катода, будет выполняться соотношение

$$\frac{I}{e} [\Phi + 2k(T - T_0)] = 2RI_n \Delta I_n + R(\Delta I_n)^2. \quad (3)$$

Потери энергии нитью-катодом в результате установления анодного тока в лампе значительно меньше потерь на излучение и потерь из-за теплопроводности держателей катода. Но эти основные потери энергии остаются постоянными, так как при компенсации восстанавливается первоначальное значение температуры нити.

При этом получаем

$$\Phi = \frac{2eRI_n \Delta I_n}{I} - 2k(T - T_0). \quad (4)$$

Таким образом, для определения работы выхода электрона достаточно измерить приращение тока накала ΔI_n , необходимое для компенсации охлаждения нити при установлении в лампе анодного тока I . Измерение тока накала I_n и сопротивления нити R не представляет трудностей. Температуру нити достаточно знать лишь приблизительно, так как второй член в формуле (4) в 10—20 раз меньше первого. Поэтому даже значительная ошибка

в определении температуры T вызовет небольшую ошибку при расчете работы выхода. В то же время фиксирование восстановления первоначальной температуры при компенсации охлаждения нити должно быть точным. Удобно производить фиксирование равенства температур по величине электрического сопротивления нити. Наибольшую трудность представляет точное измерение приращения тока накала нити ΔI_n , необходимого для компенсации ее охлаждения при установлении анодного тока. Поэтому в лабораторной работе применяется специальная методика измерений, описанная ниже.

Описание экспериментальной установки. Схема установки для проведения измерений представлена на рис. 2. Для измерения

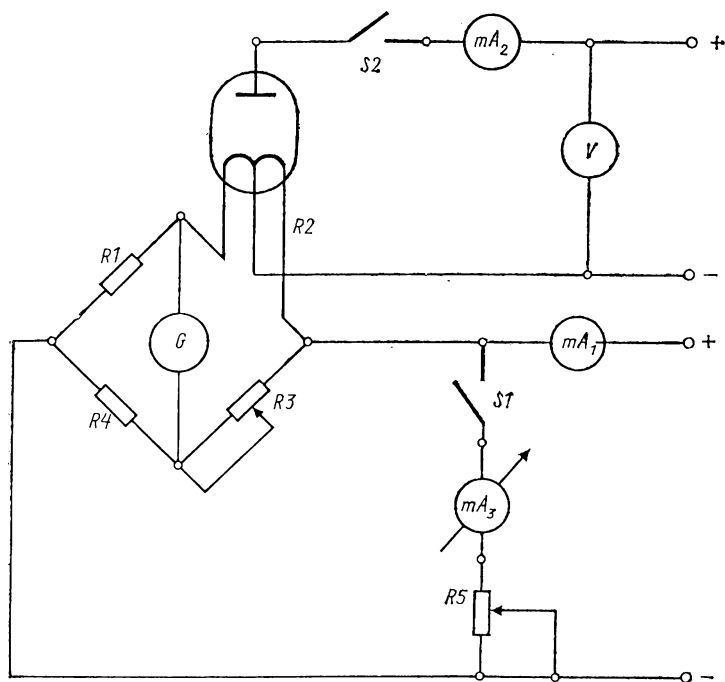


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

электрического сопротивления нити и фиксирования восстановления первоначальной температуры используется мост Уитстона на постоянном токе, в одно из плеч которого включена нить накала лампы R_2 . Чтобы на уравнивании моста не сказывалось дополнительное падение напряжения на нити, вызванное протеканием по ней анодного тока, используется лампа, имеющая отвод от середины нити; к этому отводу присоединяется анодная цепь. Сопротивление плеч моста R_3 и R_4 в 100 раз больше сопротивле-

ний R_2 и R_1 соответственно. Для точного измерения малых приращений тока накала служит цепь с реостатом R_5 и миллиамперметром, которая может включаться параллельно мосту. Так как $R_5 \gg R_1 + R_2$, то при замыкании ключа S_1 полное сопротивление нагрузки выпрямителя практически не изменяется, и потребляемый схемой ток остается прежним. Происходит лишь перераспределение тока между мостом и цепью сопротивления R_5 . Поскольку $R_3 + R_4 = 100(R_1 + R_2)$, то в плечах моста R_3 и R_4 протекает лишь 1% полного тока. Поэтому можно считать, что уменьшение тока накала нити равно величине тока в цепи сопротивления R_5 . Таким образом, малые изменения тока накала нити можно точно определять измерительным прибором с соответствующим пределом измерений.

В лабораторной работе используется радиолампа типа 2П1П с оксидным катодом прямого накала, включенная диодом (управляющая и экранная сетки соединены с анодом). У полупроводникового оксидного катода, состоящего из смеси окислов бария, кальция и стронция, работы выхода, в отличие от катодов из чистых металлов, может изменяться в зависимости от соотношений компонент, технологии изготовления, срока службы и т. д. Широкое применение оксидных катодов связано с малой работой выхода, что позволяет получать большие токи эмиссии при низких температурах.

Анодная цепь и цепь накала питаются от разных выходов стабилизированного источника ($I_a < 3$ мА, $I_n < 100$ мА). Величины анодного напряжения и тока накала изменяются с помощью регулировок источника, а измеряются приборами: вольтметром V (шкала 15 В) и миллиамперметром mA_1 (шкала 100 мА). Сила анодного тока измеряется миллиамперметром mA_2 (шкала 3 мА).

Отвод нити накала делит ее обычно на несимметричные части, т. е. при протекании анодного тока на нити создается дополнительное падение напряжения, не связанное с изменением ее электрического сопротивления. Это дополнительное падение напряжения на нити приводит к ошибке в установлении равновесия моста. При изменении направления тока накала знак этой ошибки изменяется. Поэтому работу выхода электрона следует определять как среднее значение результатов, полученных при разных направлениях тока накала. Изменение направления тока накала достигается простым переключением проводов, соединяющих концы с соответствующими клеммами моста Уитстона.

Мост Уитстона собирается на базе моста постоянного тока типа МВЛ.

Монтаж экспериментальной установки. Собрать схему в соответствии с рис. 2. В качестве резисторов R_1 , R_3 и R_4 используются резисторы, смонтированные в измерительном мосте. Установить переключатель отношения плеч моста $R_1 : R_4$ в положение 1 : 100, а сопротивление резистора R_3 установить равным примерно 3000 Ом. Подключить к схеме источник питания.

Включение установки. Разомкнуть ключ S_1 в цепи резистора R_5 и замкнуть ключ S_2 в анодной цепи лампы.

Проверить положение регуляторов выхода источников питания, обеспечивающих минимальность выходного напряжения.

Включить источник питания и прогреть его в течение 10 мин.

Установить такой ток накала, чтобы при анодном напряжении 10—12 В анодный ток лампы составил 1,5 мА.

Выполнение измерений. Изменением сопротивления R_3 производится уравнивание моста. Затем ключ в анодной цепи лампы размыкается. Ток в лампе прекращается. Температура нити и ее электрическое сопротивление повышаются, так как прекращается перенос энергии от катода электронами (теперь эмитируемые электроны возвращаются на катод). Тогда замыкается ключ в цепи сопротивления R_5 , а величина его подбирается такой, чтобы мост вновь оказался уравновешенным. Таким образом, при измерениях осуществляется не компенсация охлаждения нити при установлении в лампе анодного тока, а компенсация нагрева ее при прекращении анодного тока: существо дела остается прежним. Такое изменение применено для того, чтобы вначале установить подходящую величину анодного тока лампы. Изменение тока накала нити при компенсации отсчитывается непосредственно по миллиамперметру mA_3 в цепи сопротивления R_5 .

Указанные измерения для тока $I_a = 1,5$ мА выполнить три раза. Затем, выключив питание накала лампы, переключить провода, соединяющие концы нити накала с соответствующими клеммами моста, и повторить измерения.

Обработка результатов измерений. Вычислить работу выхода электрона из оксидного катода по формуле

$$\Phi = \frac{2RI_n\Delta T_n}{I} - 2k(T - T_0),$$

используя усредненные значения ΔT_n , а разность температур $T - T_0$ положить равной 600 К.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют виды электронной эмиссии?
2. Как изменяется электрический потенциал в области границы металл—вакуум?
3. Как ток термоэлектронной эмиссии зависит от температуры катода?
4. Какие существуют методы измерения работы выхода электрона из металла?
5. В чем состоит метод компенсации охлаждения нити катода при определении работы выхода электрона?
6. Нарисовать электрическую схему установки. Объяснить порядок действия при измерениях.
7. В чем заключается активирование катода?

8. Оценить точность полученного экспериментального значения работы выхода.

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 156.
3. Шимони К. Физическая электроника. М.: Мир, 1977.

Лабораторная работа 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

В задаче экспериментально определяется удельный заряд электрона e/m двумя методами. Первый основан на использовании закона Богуславского—Ленгмюра или закона «трех вторых». Во втором, так называемом «методе магнетрона», рассматривается движение электронов в пересекающихся однородном магнитном и радиальном электрическом полях.

Анализ условий эксперимента

Рассмотрим диод с электродами в виде коаксиальных цилиндров, длина которых l , а радиусы r_k (катод) и r_a (анод). При термоэлектронной эмиссии из катода в пространстве вокруг него образуется облако отрицательного заряда (пространственный заряд). Если обеспечить условия, при которых часть электронов, образующих это облако, возвращается на катод, а часть увлекается электрическим полем на анод, то анодный ток будет подчиняться закону «трех вторых»:

$$I = \frac{8\sqrt{2}\pi\epsilon_0}{9} \frac{l}{r_a} \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2} U^{3/2}, \quad (1)$$

где U — разность потенциалов между анодом и катодом, а $r_a \gg r_k$. Упомянутые условия состоят в том, что электроны должны иметь нулевую начальную скорость, а электрическое поле вблизи катода должно отсутствовать ($\partial U/\partial r=0$) — этим обеспечивается возможность почти беспрепятственного обмена электронами между катодом и облаком (рис. 1). Таким образом, можно сказать, что закон «трех вторых» описывает «вытягивание» электронов из облака, в котором вытягиваемые электроны составляют лишь малую часть. При достижении анодным напряжением достаточно большой величины все электроны облака будут устремляться к аноду — при этом ток анода перестанет зависеть от анодного напряжения (это ток насыщения).

Выполнение условия ($\partial U/\partial r=0$ вблизи катода) достигается подбором тока накала лампы, определяющего эмиссию катода.

Задача состоит в экспериментальной проверке закона «трех вторых» и определении величины e/m .

Движение электрона в радиальном электрическом и однородном магнитном полях

Диод, описанный выше, поместим в соленоид так, чтобы вектор магнитной индукции поля, создаваемого соленоидом, был направлен вдоль оси диода. В таком случае на электроны, вылетающие из катода, помимо радиального электрического поля дей-

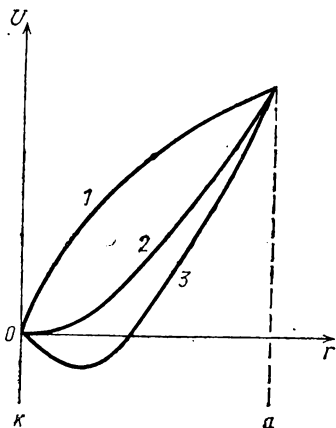


Рис. 1. Характер изменения потенциала в пространстве между катодом и анодом

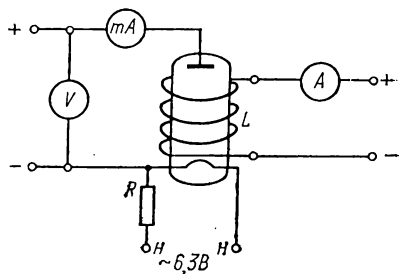


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

ствует однородное магнитное поле. Можно показать, что при достижении индукцией магнитного поля значения

$$B_{кр} = \frac{2}{r_a} \sqrt{\frac{2U_a}{e/m}} \quad (2)$$

электроны перестанут долетать до анода вследствие искривления их траектории магнитным полем, и анодный ток диода резко упадет. Таким образом, измерение величины B дает возможность определить удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{r_a^2 B_{кр}^2} \quad (3)$$

Следует иметь в виду, что распределение электронов по скоростям приводит к «размазыванию» спада анодного тока диода, что затрудняет измерение критического значения индукции магнитного поля.

Индукция магнитного поля, создаваемого соленоидом, вычисляется по формуле

$$B = \mu_0 n I_c, \quad (4)$$

где n — число витков на единицу длины соленоида, I_c — ток через соленоид.

Описание экспериментальной установки. В лабораторной работе используется вакуумный диод 3Ц18П ($U_a \approx 100$ В, $I_a \approx 8$ мА, $I_n = 210$ мА, $r_k = 0,45$ мм, $r_a = 5,5$ мм, $l = 4,38$ мм).

Диод установлен в вертикальном положении на цилиндрической подставке, на которую надевается соленоид так, что диод расположен на оси соленоида в его середине, где магнитное поле наиболее однородно.

Подставка с диодом укреплена на монтажной панели с основной электрической схемой (рис. 2). Для подводки питания к схеме имеются специальные гнезда. Напряжение накала диода берут с одной из пар клемм $\sim 6,3$ В блока питания. Резистор R , смонтированный на панели, предназначен для гашения избытка напряжения, так как для накала диода 3Ц18П нужно всего 3,15 В. На анод лампы напряжение подается с выхода источника питания.

Питание соленоида L осуществляется от специального источника постоянного тока. Регулируется ток через соленоид ручками, выведенными на лицевую сторону источника постоянного тока. Ток соленоида измеряется амперметром.

Подготовка установки к работе. Сборка схемы производится в следующем порядке: сначала собрать цепь накала лампы, анодную цепь, цепь питания соленоида. До включения источников убедиться, что все регуляторы выходного напряжения установлены на минимум. Включить в сеть источники питания. После прогрева приборов в течение 10 мин приступить к измерениям.

Упражнение 1. ПРОВЕРКА ЗАКОНА «ТРЕХ ВТОРЫХ» И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Снять зависимость тока диода I от анодного напряжения U_a , изменяя напряжение до 90 В.

Обработка результатов эксперимента. Зависимость $I(U_a)$ представить графически, нанеся на плоскость (I , U_a) экспериментальные точки I , U_a . Линию по этим экспериментальным точкам проведем не «на глазок», а такую, которая удовлетворяет им наилучшим образом в смысле метода наименьших квадратов. Для этого закон «трех вторых» запишем в виде

$$I = \beta X, \quad (5)$$

где

$$\beta = \frac{8\sqrt{2}\pi\epsilon_0 l}{9r_a} \left(\frac{e}{m}\right)^{1/2}, \quad X = U^{3/2}. \quad (6)$$

Метод наименьших квадратов позволяет по определенным формулам вычислить коэффициент β и его квадратичную ошибку. Зна-

чение коэффициента β в свою очередь позволяет на основе соотношений (6) вычислить величину e/m и ее ошибку.

Расчет выполняется на ЭВМ. При работе на дисплее в машину вводятся следующие данные: число измерений N при снятии зависимости $I(U)$, радиус анода r_a , длина катода l и массивы значений тока I и напряжения U . После окончания вычислений ЭВМ выдает значения силы тока, вычисленные по формуле (5), в которую в качестве коэффициента β подставлено его значение, найденное методом наименьших квадратов. Таким образом, точки $[A, U]$ лежат на искомой линии, которую и следует провести на графике.

ЭВМ выдает также данные для графического построения зависимости $I(U^{3/2}) = I(X)$.

Построить эту зависимость, нанеся на плоскость (I, X) точки $[I, X]$, а прямую линию через них провести под углом, тангенс которого есть β . Эта линия — лучшая в смысле МНК.

Упражнение 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Включить ток через соленоид I_c . Снять 2—3 кривые зависимости $I = f(I_c)$ при разных анодных напряжениях U_a и построить графики $I(B)$. Отметив на каждой кривой индукцию B_0 соленоида, при которой анодный ток начинает уменьшаться, подставить это значение индукции B_0 в формулу (3).

Значения B_0 на графике выбирать в самом начале спада кривой тока. Проанализировать возможные погрешности определения e/m за счет «размазывания» спада.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулировать закон «трех вторых». При каких условиях он выполняется?
2. Почему ток диода должен быть далек от насыщения?
3. Как влияет объемный заряд на распределение потенциала в пространстве между анодом и катодом?
4. Каков характер электрического и магнитного полей в диоде, помещенном внутри соленоида?
5. Какие траектории описывает электрон при разных индукциях магнитного поля?
6. Чему равно отношение e/m в системе СИ?
7. Нарисовать электрическую схему установки. Объяснить порядок действий при измерениях. Перечислите основные правила техники безопасности при работе на установке.
8. Какова точность приборов, используемых на установке?
9. Чем определяется «размазывание» спада анодного тока диода при увеличении индукции магнитного поля?
10. Какие факторы приводят к неточности определения e/m на данной установке в упражнениях 1 и 2?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 157.

Лабораторная работа 9

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА

Изучается устройство вакуумного пентода, снимаются его анодно-сеточные и анодные характеристики, определяются его основные параметры. В заключение студенты знакомятся с простейшим усилителем на пентоде.

Устройство лампы

Электрический ток в лампе образуется электронами. Их источником служит катод — электрод, нагреваемый до высокой температуры ($600\text{—}1200^\circ\text{C}$). В простейшем случае катод делают в виде металлической проволочки, накаливаемой вспомогательным током. Такие катоды называют катодами прямого или непосредственного накала. Большое распространение получили также катоды косвенного накала, иначе называемые подогревными. Катод такого типа имеет металлический цилиндр, поверхность которого покрыта активным слоем, испускающим электроны при меньшей по сравнению с чистым металлом температуре. Подогреватель в виде проволочки находится внутри цилиндра.

Электроны, покинувшие анод, устремляются к электроду лампы, называемому анодом, — на него обычно подают положительный потенциал относительно катода.

Для управления электронным потоком в лампе служат электроды, называемые сетками. Обычно они представляют собой тонкие проволочки, навиваемые на специальный держатель так, чтобы сетка охватывала катод.

Вакуум в электронных лампах, необходимый для свободного движения электронов, должен быть не хуже 10^{-6} мм рт. ст.

Основные типы ламп

Диод — двухэлектродная лампа. Анодное напряжение создает в пространстве между анодом и катодом электрическое поле, которое заставляет электроны, вылетевшие из катода, лететь к аноду. Эти электроны в пространстве катод—анод создают отрицательный объемный (пространственный) заряд. Наибольшую плотность заряд, называемый часто «электронным облаком», имеет вблизи катода. Отрицательный объемный заряд затрудняет движение электронов от катода к аноду. Результирующее электрическое поле в пространстве катод—анод таково, что между анодным током I_a и напряжением на аноде U_a (все напряжения в лампе измеряются относительно катода) существует зависимость, выра-

жаемая законом «трех вторых», установленным Ленгмюром:

$$I_a = KU_a^{3/2}.$$

Коэффициент K зависит от формы и размеров электродов.

Электроны в диоде могут двигаться только от накаливаемого катода к аноду, но не обратно, и только тогда, когда анод имеет положительный потенциал относительно катода. Если же на аноде отрицательный потенциал относительно катода, то диод «заперт».

Таким образом, диод обладает односторонней проводимостью и, подобно полупроводниковому диоду, может использоваться для выпрямления переменного тока.

Триод. В триоде имеется третий электрод — сетка, помещенная вблизи катода. Если изменять потенциал сетки, то будет изменяться количество электронов, улетающих от катода к аноду. Вследствие того что в сетке имеются значительные просветы, она пропускает электроны, летящие от катода к аноду, но для электрического поля, создаваемого анодным напряжением, сетка является электростатическим экраном (при условии, что сетка соединена с катодом). Сетка ослабляет действие поля анода на электроны, вылетающие с катода. Говорят, что сетка «перехватывает» большую часть силовых линий электрического поля, создаваемого анодом. Вследствие этого сетка действует на анодный ток значительно сильнее, чем анод.

Характеристики триода. Наиболее важными являются анодно-сеточные характеристики — зависимость анодного тока I_a от нап-

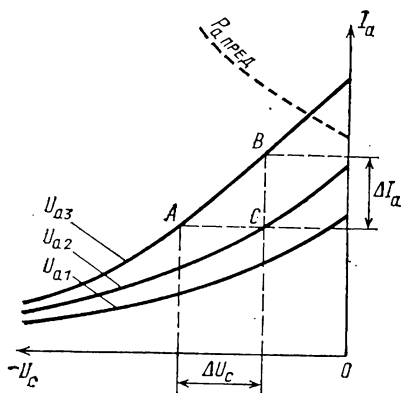


Рис. 1. Анодно-сеточные характеристики триода

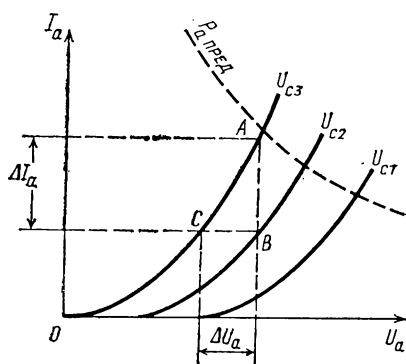


Рис. 2. Анодные характеристики триода

ряжения на сетке U_c при постоянном анодном напряжении U_a , и анодные характеристики — зависимость анодного тока I_a от напряжения на аноде U_a при постоянном сеточном напряжении U_c . На рис. 1 представлено семейство анодно-сеточных характеристик триода ($U_{a1} < U_{a2} < U_{a3}$).

На рис. 2 представлено семейство анодных характеристик триода ($U_{c1} < U_{c2} < U_{c3}$).

Параметры триода. К характеристикам триода относятся: напряжение накала, ток накала, а также рекомендуемые нормальные постоянные анодное и сеточное напряжения и соответствующий им постоянный анодный ток.

Важным параметром триода является предельная мощность, выделяемая на аноде $P_{a \text{ пред.}}$. Мощность P_a , выделяемая на аноде, равна кинетической энергии n электронов, подлетевших к аноду с энергией eU_a в течение времени t :

$$P_a = \frac{neU_a}{t}.$$

Но

$$ne = I_a t,$$

поэтому

$$P_a = I_a U_a.$$

Зная величину $P_{a \text{ пред.}}$ для данного триода, из этого соотношения легко определить допустимые комбинации I_a и U_a . Границы допустимых значений пар I_a и U_a часто обозначают на семействах анодных и анодно-сеточных характеристик пунктирными линиями (см. рис. 1 и 2).

Главными параметрами триода, определяющими его свойства, являются: крутизна анодно-сеточной характеристики S (или просто крутизна), внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления лампы μ .

Крутизна характеризует управляющее действие сетки, т. е. влияние сеточного напряжения на анодный ток. Если при постоянном анодном напряжении изменить сеточное напряжение на величину ΔU_c и при этом анодный ток изменится на величину ΔI_a , то крутизна S определится по формуле

$$S_a = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \text{ при } U_a = \text{const.}$$

Таким образом, крутизна представляет собой отношение изменения анодного тока к вызвавшему его изменению сеточного напряжения при постоянном анодном напряжении. Выражают крутизну в миллиамперах на вольт (мА/В) или в амперах на вольт (А/В). Можно сказать, что величина крутизны показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток при изменении сеточного напряжения на один вольт, если анодное напряжение постоянно.

Крутизна S определяется наклоном анодно-сеточной характеристики. Наиболее просто крутизна определяется методом двух точек (см. рис. 1):

$$S_{AB} = \frac{I_B - I_A}{U_{cB} - U_{cA}} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}.$$

Определенная таким образом крутизна S_{AB} является средней для участка AB характеристики.

Крутизну анодно-сеточной характеристики можно найти из анодных характеристик (см. рис. 2). Если имеются две близкие анодные характеристики, снятые при сеточных напряжениях U_{c3} и U_{c2} , то следует взять на этих характеристиках точки A и B , соответствующие одному и тому же анодному напряжению. Изменение тока ΔI_a при переходе от точки A к точке B надо разделить на соответствующее изменение сеточного напряжения $\Delta U_c = U_{c3} - U_{c2}$:

$$S_{AB} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{I_A - I_B}{U_{c3} - U_{c2}}.$$

Внутреннее сопротивление R_i характеризует влияние изменения анодного напряжения на анодный ток — это сопротивление между анодом и катодом для переменного тока. Если при изменении анодного напряжения на ΔU_a анодный ток изменится на ΔI_a , то внутреннее сопротивление равно

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ при } U_c = \text{const.}$$

Таким образом, внутреннее сопротивление представляет собой отношение изменения анодного напряжения к вызванному им изменению анодного тока при постоянном сеточном напряжении.

Для определения R_i из анодно-сеточных характеристик необходимо взять при постоянном сеточном напряжении приращение ΔI_a между точками C и B на характеристиках для напряжений U_{a2} и U_{a3} (см. рис. 1):

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a3} - U_{a2}}{I_B - I_C}.$$

На анодных характеристиках (см. рис. 2) внутреннее сопротивление связано с их наклоном. Как видно из рисунка, по методу двух точек

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_A - U_C}{I_A - I_C}.$$

Коэффициент усиления лампы μ показывает, во сколько раз изменение напряжения сетки действует на анодный ток сильнее, чем такое же изменение анодного напряжения. Определяют коэффициент усиления μ по формуле

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c},$$

где ΔU_a и ΔU_c берутся такими, которые вызывают одинаковое изменение анодного тока ΔI_a .

Для определения μ из анодно-сеточных характеристик (см. рис. 1) на них следует взять точки A и C для одного и того же анодного тока. Тогда

$$\mu = \frac{U_{a3} - U_{a2}}{\Delta U_c}.$$

Нахождение μ из анодных характеристик аналогично рассмотренному определению μ из анодно-сеточных характеристик. Точки C и B берутся при одном и том же токе на двух характеристиках для U_{c3} и U_{c2} (см. рис. 2):

$$\mu = \frac{U_B - U_C}{U_{c3} - U_{c2}}.$$

Параметры лампы S , R_i и μ связаны друг с другом уравнением

$$\frac{SR_i}{\mu} = 1.$$

Недостатки триодов. Вакуумные триоды до сих пор находят применение в различных радиосхемах. Однако они имеют ряд существенных недостатков. У них небольшой коэффициент усиления μ (обычно несколько десятков единиц), небольшое внутреннее сопротивление и сравнительно большая емкость между анодом и сеткой. Последние два недостатка заметно проявляются при работе на высоких частотах.

Тетрод — лампа с двумя сетками. Вторая сетка расположена между управляющей сеткой и анодом. Если вторая сетка соединена с катодом (хотя бы через резистор), то она экранирует катод и управляющую сетку от действия анода. Поэтому вторую сетку называют экранирующей, или экранной. Сквозь экранирующую сетку проникает лишь небольшая доля силовых линий электрического поля анода. В результате возрастают коэффициент усиления лампы μ и внутреннее сопротивление R_i , а емкость анод — управляющая сетка уменьшается.

Недостатком тетрода является *динактронный эффект анода*. Электроны, ударяя в анод, выбивают из него вторичные электроны. В рабочем режиме тетрода возможны такие ситуации, когда потенциал экранной сетки окажется выше потенциала анода. Тогда вторичные электроны не вернуться на анод, как это имеет место в диодах и триодах, а притянутся к экранной сетке. В результате анодный ток уменьшится. Это приводит к искажению анодных характеристик тетрода и далее — к искажению сигнала, если тетрод используется для усиления.

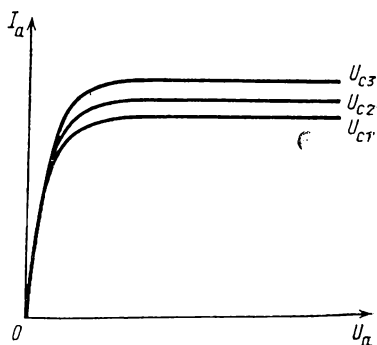


Рис. 3. Анодные характеристики пентода

Пентод — лампа с тремя сетками. Третья сетка, расположенная между анодом и экранирующей сеткой, предназначена для

устранения динаatronного эффекта. Действительно, если потенциал экранирующей сетки обычно составляет 20—50% от потенциала анода, то третью антидинаatronную сетку обычно непосредственно соединяют с катодом. В результате вторичные электроны, выбитые из анода, тормозятся этой сеткой и возвращаются на анод. Наряду с устранением динаatronного эффекта третья сетка улучшает все положительные свойства тетродов. Анодные характеристики пентода имеют вид, изображенный на рис. 3 ($U_{c1} < U_{c2} < U_{c3}$).

Усилительный каскад. Одним из простейших применений лампы является ее использование для усиления электрических сигналов. На рис. 4, а показана схема усилительного каскада. К сетке

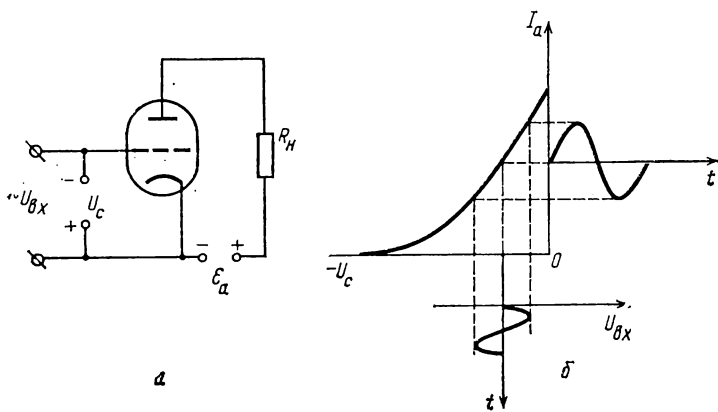


Рис. 4. Схема усилительного каскада (а); схематическое пояснение влияния изменения сеточного напряжения на анодный ток (б)

лампы подводится переменное напряжение $U_{вх}$, подлежащее усилению. Это напряжение вызывает появление в анодной цепи переменного тока I_a (рис. 4, б) в соответствии с анодно-сеточной характеристикой лампы. Этот ток, протекая по резистору нагрузки R_H , создает на нем падение напряжения. Это и есть выходное напряжение усилителя $U_{вых}$. Его величину можно рассчитать (приближенно) по формуле

$$U_{вых} = I_a R_H = U_{вх} S R_H.$$

Измеряют выходное напряжение обычно между анодом и катодом лампы. Измеряемое таким образом напряжение практически совпадает с падением переменного напряжения на резисторе R_H , так как источник анодного питания E_a обладает пренебрежимо малым сопротивлением переменному току.

Коэффициент усиления лампового усилителя можно вычислить по формуле

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = SR_{\text{н}}$$

Описание экспериментальной установки

В настоящей задаче снимаются некоторые характеристики пентода 6К4П и наблюдается эффект усиления переменного напряжения.

Для снятия характеристик лампы собирается следующая схема (рис. 5). Лампа размещена на специальной панели, имеющей

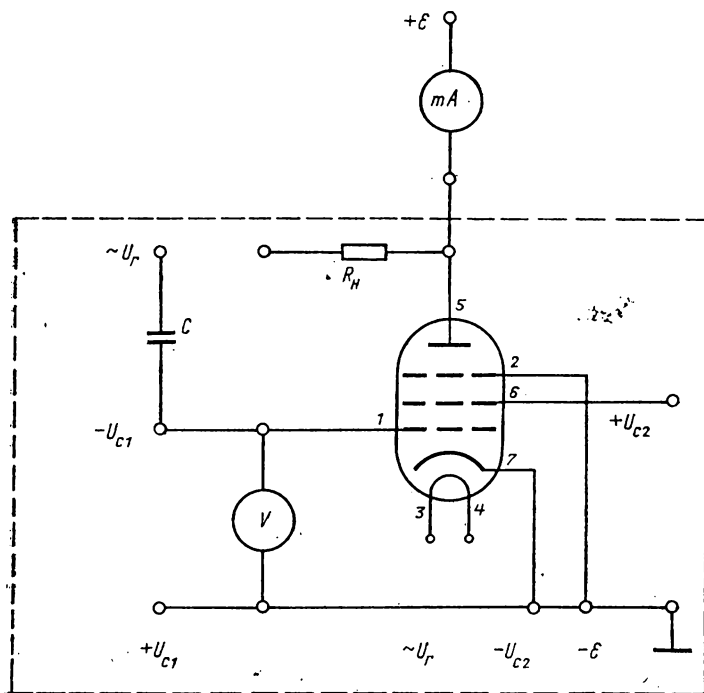


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

гнезда для подключения источников питания и приборов. Питание схемы осуществляется от источников, имеющих выходы: переменное напряжение 6,3 В при токе 0,3 А для накала лампы (гнезда 3—4 панели); постоянное регулируемое напряжение $0 \div 250$ В при токе до 15 мА для питания анодной цепи лампы (гнезда $+E -E$ панели); постоянное регулируемое напряжение $0 - 15$ В при токе менее 1 мА для питания цепи первой сетки лампы (гнезда « $-U_c$ » и « \perp » панели); постоянное напряжение 100 В при токе не менее 5 мА (гнезда « $+U_{c2}$ » и « \perp » панели) для питания цепи второй сетки.

Напряжения и токи измеряются приборами, расположенными на лицевых панелях источников или непосредственно на столе:

На панели расположен резистор R_n , выполняющий роль сопротивления нагрузки при наблюдении эффекта усиления переменного сигнала с помощью пентода. Этот сигнал подается с выхода генератора (ГЗ-1) на управляющую сетку лампы через конденсатор, размещенный на панели. Для сопоставления этого напряжения с усиленным используется осциллограф (С1-72), подключаемый соответственно или к входу усилителя (между первой сеткой и катодом), или к его выходу (между анодом и катодом).

Упражнение 1. СНЯТИЕ АНОДНО-СЕТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Собрать схему в соответствии с рис. 5. Включить источники питания. Установить напряжение на первой сетке примерно -3 В, напряжение на аноде $U_a = 50$ В, напряжение на второй сетке $U_{c2} = 100$ В (третья сетка должна быть соединена с катодом) и дать прогреться установке в течение 10 мин.

Анодно-сеточные характеристики пентода, снятые даже при сильно различающихся анодных напряжениях, идут очень близко друг к другу, так что использование их для расчета параметров лампы затруднительно. Чтобы уловить разницу в анодных токах, соответствующих одному и тому же напряжению на управляющей сетке, но разным анодным напряжениям, будем снимать измерения сразу для двух анодно-сеточных характеристик при U_a' и U_a'' .

Установить $U_a' = 50$ В, $U_{c1} = -15$ В и зарегистрировать соответствующее значение анодного тока. Затем увеличить анодное напряжение до $U_a'' = 250$ В — при этом напряжении будем снимать вторую анодно-сеточную характеристику. Зарегистрировать силу анодного тока при U_a'' . Результаты измерений оформить в виде таблицы. Не меняя анодное напряжение $U_a'' = 250$ В, установив $U_{c1} = -14$ В и зарегистрировать соответствующий ток I_a . Затем перейти к характеристике при $U_a' = 50$ В, установив на аноде это напряжение (U_{c1} остается равным -14 В). И так далее, снимая попарно точки для двух характеристик, повышать напряжение на первой сетке U_{c1} .

При подходе к участку характеристики, где анодный ток большой, следует помнить, что предельная мощность, рассеиваемая на аноде для лампы 6К4П, составляет 3 Вт. При ее превышении анод перегревается, ток «плывет». Поэтому в этой части характеристики измерения надо производить по возможности быстрее.

Окончив измерения, установить $U_{c1} = -15$ В, $U_a = 50$ В.

Обработка результатов эксперимента

Сглаживание экспериментально полученных характеристик

По завершении снятия характеристик необходимо представить их графически. Для этого на плоскости (I_a , U_{c1}) нанести экспери-

ментальные точки $[I_a, U_{c1}]$. Линии же по этим точкам, имеющим обычно некоторый разброс, проведем после математической обработки полученных результатов. Для каждой характеристики методом наименьших квадратов найдем уравнение такой линии, которая наилучшим образом удовлетворяет экспериментальным точкам. Так как характеристика не описывается какой-либо простой функцией, представляя собой довольно сложную зависимость, будем искать линию, описываемую полиномом пятой степени. При этом, располагая 10—15 экспериментальными точками, мы получим, с одной стороны, довольно плавную линию — без излишних изгибов, с другой стороны, эта линия пройдет довольно близко к экспериментальным точкам.

Для расчета необходимо ввести в ЭВМ массивы значений напряжения на первой сетке и соответствующих значений анодного тока для характеристик при анодных напряжениях U_a' и U_a'' , значения U_a' и U_a'' . После расчета ЭВМ выдает для всех значений U_{c1} значения анодного тока, по которым следует построить линии на графике $I_a(U_{c1})$. Это будут линии, наилучшим образом в смысле МНК проходящие по экспериментальным точкам.

Расчет параметров лампы

Теперь, когда мы располагаем двумя близкими анодно-сеточными характеристиками, расстояние между которыми изменяется монотонно, можно вычислить параметры лампы S , R_i и μ для каждого значения напряжения на первой сетке U_{c1} и, таким образом, получить представление о том, как эти параметры ведут себя при изменении U_{c1} .

Программа, заложенная в ЭВМ, предусматривает этот расчет, по окончании которого ЭВМ выдает таблицу значений S , R_i и μ , а также параметра $Z = SR_i/\mu$, по близости которого к единице можно судить о качестве измерений в данной точке.

Построить графики $S(U_{c1})$, $R_i(U_{c1})$ и $\mu(U_{c1})$.

Упражнение 2. СНЯТИЕ АНОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Напряжение на экранирующей сетке оставить прежним ($U_{c2} = 100$ В). Напряжение на управляющей сетке установить $U_{c1} = 0$. Изменяя анодное напряжение от нуля до 250 В, снять зависимость $I_a(U_a)$. Результаты измерений занести в таблицу.

Затем снять аналогичные зависимости при $U_{c1} = -1; -2; -3; -4$ В и занести результаты измерений в таблицу.

Анодные характеристики представить графически.

Упражнение 3. НАБЛЮДЕНИЕ УСИЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЛАМПОВЫМ УСИЛИТЕЛЬНЫМ КАСКАДОМ

Включить генератор и осциллограф. Источник анодного питания лампы подключить к аноду через резистор R_n , расположенный

на панели. Установить $U_{c1} = -2\text{В}$, $U_a = 150\text{ В}$, $U_{c2} = 100\text{ В}$. С генератора на вход усилительного каскада подать напряжение $U_{\text{ген}} = 50\text{ мВ}$ частоты $f = 1\text{ кГц}$. К входу усилительного каскада (можно непосредственно к первой сетке лампы) подключить осциллограф. С помощью регулировок осциллографа установить на его экране изображение нескольких периодов усиливаемого переменного напряжения.

Определить величину наблюдаемого сигнала $U_{\text{вх}}$.

Переключить осциллограф с входа усилительного каскада на его выход, т. е. на анод лампы.

Записать величину наблюдаемого сигнала $U_{\text{вых}}$.

Вычислить коэффициент усиления каскада:

$$K_{\text{эсп}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Для указанного режима лампы определить ее параметры S , R_i и μ по анодным и анодно-сеточным характеристикам.

Вычислить значение комбинации этих параметров лампы:

$$Z = \frac{SR_i}{\mu}.$$

Вычислить коэффициент усиления каскада по формуле

$$K_{\text{теор}} = SR_{\text{н}}$$

и сравнить его с $K_{\text{эсп}}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково устройство электронной лампы?
2. Для чего применяют активированные катоды?
3. Что выражают основные параметры лампы: коэффициент усиления μ , внутреннее сопротивление R_i , крутизна S ?
4. Какой вид имеют анодно-сеточные характеристики триода, тетрода, пентода?
5. Как определяются S , R_i , μ по анодно-сеточным и анодным характеристикам?
6. Какова роль сеток в пентоде?
7. Как определить максимально допустимые анодный ток и анодное напряжение лампы?
8. Как выбирается режим пентода при использовании его в схеме усилителя?
9. Каким образом усилить сигнал с помощью пентода?
10. Показать на схеме установки цепи тока накала, анодного тока.
11. Объяснить влияние сеточного смещения на коэффициент усиления усилителя на пентоде.
12. Какие меры предосторожности в отношении электробезопасности следует соблюдать при выполнении настоящей задачи?

Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 160, 161.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. М.: Наука, 1977, § 102, 103.
3. Жеребцов И. П. Основы электроники. М.: Энергия, 1977.

Лабораторная работа 10

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

В данной лабораторной работе снимается вольт-амперная характеристика диода, изучается применение диодов в различных схемах выпрямления переменного тока.

Описание экспериментальной установки. Объектом исследования являются полупроводниковые германиевые диоды типа Д226Б. Диоды, резисторы и конденсаторы, необходимые для выполнения эксперимента, смонтированы на специальной панели. Резисторы имеют сопротивление по 330 Ом, а емкости — 1, 5 и 30 мкФ. На панели имеется ряд дополнительных гнезд, облегчающих монтаж нужных схем.

Источник постоянного напряжения *И* обеспечивает плавное изменение выходного напряжения до 25 В при токе до 500 мА.

Источником переменного напряжения служит генератор, имеющий симметричный и несимметричный выходы, обеспечивающий 2 В на частотах 20 ÷ 1000 Гц. Для измерения постоянного напряжения используется вольтметр с пределом 1,5 В, для измерения постоянного тока — миллиамперметр с пределом 75 ÷ 150 мА. Осциллограф имеет входы «Y» и «X».

Упражнение 1. СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА

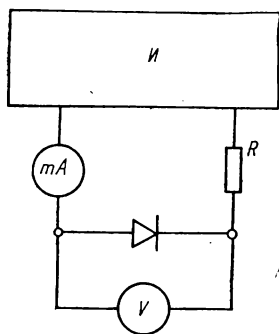


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

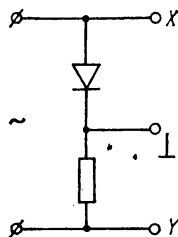


Рис. 2. Схема для наблюдения вольт-амперной характеристики диода на экране осциллографа

Собрать схему, изображенную на рис. 1.

Перед включением приборов в сеть убедиться в том, что ручка потенциометра, регулирующего выходное напряжение источника постоянного тока, находится в крайнем положении против часовой стрелки, что соответствует минимальному выходному напряжению. Включить источник постоянного тока в сеть и дать ему прогреться в течение 5 мин.

Увеличивая ступенями напряжение, подаваемое на схему от источника постоянного тока, снять зависимость между током I , текущим через диод, и напряжением U , действующим на нем. Результаты измерений занести в таблицу и представить графически.

Упражнение 2. НАБЛЮДЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА НА ЭКРАНЕ ОСЦИЛЛОГРАФА

Собрать схему, изображенную на рис. 3.

Переменное напряжение U_{\sim} частотой в несколько сотен герц

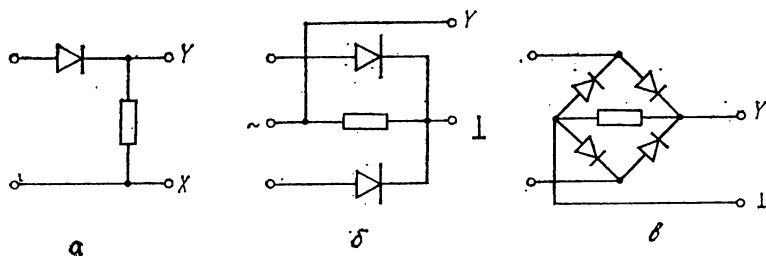


Рис. 3. Различные схемы выпрямителей переменного тока: а) однополупериодный выпрямитель; б) двухполупериодный выпрямитель со средней точкой; в) двухполупериодный мостиковый выпрямитель

подать на схему с генератора. Осциллограф подсоединить к схеме и установить его в режим внешней развертки.

Включив приборы в сеть, дать им прогреться несколько минут.

Увеличивая переменное напряжение, подаваемое на схему с генератора, наблюдать на экране осциллографа изображение вольт-амперной характеристики, зарисовать ее.

Упражнение 3. ИЗУЧЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

Однополупериодный выпрямитель

Собрать схему, изображенную на рис. 3, а.

Подать на схему переменное напряжение U_{\sim} с генератора. Осциллограф установить в режим внутренней развертки.

Установить на экране осциллографа изображение двух-трех периодов сигнала. Зарисовать наблюдаемую осциллограмму напряжения, действующего на резисторе R .

Далее в этом упражнении напряжение, подаваемое с генератора, и чувствительность осциллографа не изменять.

Двухполупериодный выпрямитель

Предлагается рассмотреть схему двухполупериодного выпрямителя, переменное напряжение на который подается с обмотки трансформатора, имеющей отвод от средней точки. Такой выход имеет используемый генератор.

Собрать схему, изображенную на рис. 3, б.

Зарисовать осциллограмму напряжения, действующего на резисторе R , сопоставив ее с осциллограммой для однополупериодного выпрямителя.

Двухполупериодный мостиковый выпрямитель

Предлагается рассмотреть схему двухполупериодного выпрямителя, переменное напряжение на который подается с обмотки трансформатора, не имеющей вывода от средней точки, т. е. необходимо использовать симметричный выход генератора.

Собрать схему в соответствии с рис. 3, в. Зарисовать осциллограмму напряжения, действующего на резисторе R , сопоставив ее с осциллограммами в двух предыдущих случаях.

Упражнение 4. СГЛАЖИВАНИЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Если на выходе выпрямителя параллельно резистору нагрузки включить конденсатор, то этот конденсатор будет заряжаться, когда диод открыт, и разряжаться через резистор R , когда диод закрыт. Таким образом, напряжение на резисторе R окажется менее пульсирующим, сглаженным.

Собрать одну из схем, изображенных на рис. 3, подключив параллельно резистору нагрузки один из имеющихся на панели конденсаторов. Чтобы отклонение луча на экране осциллографа было пропорционально также и постоянной составляющей исследуемого напряжения, использовать так называемый открытый вход осциллографа.

Зарисовать осциллограммы напряжения, действующего на резисторе R для каждого из трех конденсаторов, подключаемых к резистору. Частоту переменного напряжения при этом взять равной примерно 200 Гц.

Для случая, когда к резистору R подключен конденсатор наименьшей емкости, увеличивать частоту переменного напряжения, действующего на резисторе. Зарисовать осциллограммы для нескольких частот. Обратит внимание на изменение среднего уровня выпрямленного напряжения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова природа электропроводности полупроводников?
2. Каким образом создается примесная электронная или дырочная электропроводность?
3. Что происходит в $p-n$ -переходе при действии внешнего напряжения?
4. Объяснить ход вольт-амперной характеристики диода.
5. Как вольт-амперная характеристика диода изменяется с температурой?
6. Какова точность приборов, используемых при измерениях?
7. В чем заключаются преимущества и недостатки изучаемых выпрямительных схем?
8. В чем заключаются особенности соединения полупроводниковых диодов последовательно и параллельно?
9. Каковы основные преимущества и недостатки полупроводниковых диодов по сравнению с вакуумными?

Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 151—154, 159, 198, 203—205.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. М.: Наука, 1977, § 100, 102, 108.
3. Жеребцов И. П. Основы электроники. Л.: Энергия, 1974, с. 23—36, 46—85.

Лабораторная работа 11

ТИРИСТОР

Целью настоящей работы является ознакомление с полупроводниковым прибором — тиристором. Этот прибор относится к классу переключающих устройств. Он обладает способностью открываться при подаче на него управляющего сигнала, пропуская электрический ток, и закрываться, прекращая пропускать ток.

УСТРОЙСТВО ТИРИСТОРА

Основу тиристора составляет кремниевая пластина, имеющая четырехслойную структуру, в которой чередуются слои с дырочной (p) и электронной (n) проводимостями (рис. 1). Эти четыре слоя образуют три $p-n$ -перехода P_1 , P_2 и P_3 . Крайнюю область p , к которой подключается положительный полюс источника, называют анодом; крайнюю область n , к которой подключен отрицательный полюс источника, — катодом.

Название «тиристор» относится ко всем переключающим устройствам с тремя и более $p-n$ -переходами. Приборы, имеющие два вывода (анод и катод), называются диодными тиристорами или динисторами.

Физические процессы в динисторе

Как видно из рис. 1, p — n -переходы Π_1 и Π_3 включаются в прямом направлении, а переход Π_2 — в обратном.

Пусть напряжение, приложенное к тиристор, мало. Тогда очевидно, что ток, протекающий через тиристор, будет определяться переходом Π_2 : переходы Π_1 и Π_3 открыты, их сопротивление мало, а сопротивление перехода Π_2 — большое. Поэтому начальный участок OA_1 вольт-амперной характеристики тиристора (рис. 2) подобен вольт-амперной характеристике p — n -перехода в обратном направлении.

Отметим, что ток через переход Π_2 создан перемещением через него неосновных носителей в прилегающих областях: электроны являются неосновными носителями в средней p -области, а дырки — в средней n -области.

По мере увеличения напряжения, прикладываемого к тиристор, растут прямые токи через переходы Π_1 и Π_2 — в соответствии с характеристикой p — n -перехода в прямом направлении. В результате в среднюю p -область через переход Π_1 инжектируется все большее количество электронов, а в среднюю n -область — все большее количество дырок через переход Π_3 . Таким образом, концентрация неосновных носителей в областях, прилегающих к переходу Π_2 , возрастает. Следствием этого является уменьшение сопротивления перехода Π_2 . В результате — это очень важный момент — происходит перераспределение падений напряжения между переходами Π_1 , Π_2 , Π_3 .

Если при малом напряжении, приложенном к тиристор, почти все оно падало на переходе Π_2 , то по мере увеличения этого напряжения сопротивление перехода Π_2 , как уже было сказано, уменьшается, а так как ток через все три перехода один и тот же по величине, то в соответствии с законом Ома на переходе Π_2 падает все меньшая доля напряжения, действующего на тиристор. Это означает, что напряжение, действующее на переходах Π_1 и Π_3 , возрастает еще больше.

Теперь обратим внимание на то, что вольт-амперная характеристика p — n -перехода в прямом направлении нелинейна: по мере увеличения внешнего напряжения, прикладываемого к тиристор, токи через переходы Π_1 и Π_2 растут все сильнее. В средние p - и n -области инжектируется все больше и больше неосновных носителей, сопротивление перехода Π_2 падает все быстрее, что в свою очередь приводит к тому, что на переходах Π_1 и Π_2 оказывается все большее и большее напряжение (точка A_2 на рис. 2). А это вызывает дальнейшее возрастание тока через переходы Π_1 и Π_3 . Наконец, при некотором внешнем напряжении на тиристоре $U_3 = U_{\text{вкл}}$ этот процесс приобретает лавинообразный характер.

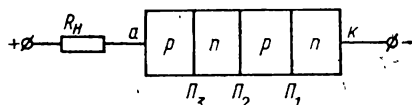


Рис. 1. Система p — n -переходов в тиристоре

Ток резко, скачком, возрастает (участок A_3 — A_4 на характеристике). Его величина ограничивается сопротивлением нагрузки R_n , включенным последовательно с тиристором. При этом сопротивление перехода Π_2 и тиристора в целом уменьшается настолько, что на самом тиристоре падает всего около одного вольта напряжения, а все остальное падает на резисторе R_n . Неосновных носителей в областях, прилегающих к переходу Π_2 , теперь так много, что этот переход можно считать включенным в прямом

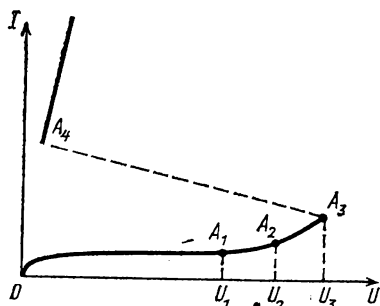


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика тиристора

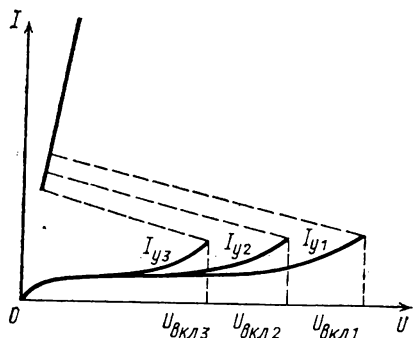


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики тиристора при различных управляющих токах

направлении. Когда тиристор открыт, все три перехода включены в прямом направлении.

Таким образом, если при напряжении U , приложенном к тиристору, меньшем напряжения включения $U_{вкл}$, тиристор был заперт, т. е. практически не пропускал ток, то при $U > U_{вкл}$ тиристор отпирается (включается) и ток через него ограничивается лишь величиной сопротивления нагрузки R_n .

Тринистор

Если от одной из средних областей сделан вывод, то получается управляемый переключаящий прибор, называемый триодным тиристором или тринистором. Подавая через этот вывод прямое напряжение на переход, работающий в прямом направлении, можно регулировать величину $U_{вкл}$. Чем больше ток через такой управляющий переход $I_{упр}$, тем ниже будет $U_{вкл}$.

Это свойство тринистора наглядно показывают его вольт-амперные характеристики, изображенные на рис. 3 для различных значений управляющего тока $I_{упр}$. Чем больше управляющий ток, тем сильнее инжекция неосновных носителей к среднему переходу и тем меньшее напряжение на тиристоре требуется для того, чтобы произошло отпирание прибора. Наиболее высокое $U_{вкл}$ получается при отсутствии управляющего тока, когда тринистор превращается в динистор. И наоборот, при значительной величине $I_{упр}$

характеристика тринистора приближается к характеристике прямого тока обычного диода. Зависимость между $I_{упр}$ и $U_{вкл}$, называемая пусковой характеристикой тиристора, изображена на рис. 4.

Применение тиристоров

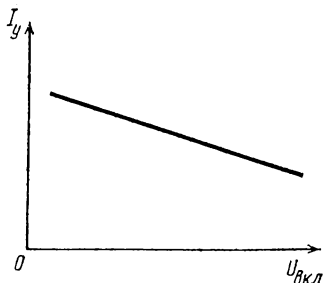


Рис. 4. Пусковая характеристика тиристора

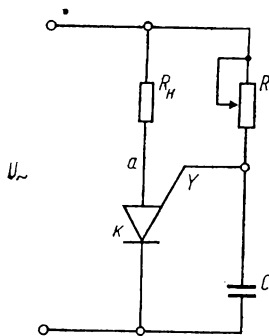


Рис. 5. Схема для иллюстрации фазового управления током с помощью тиристора

Тиристоры широко применяются в радио- и электротехнике как переключающие устройства. Они используются при конструировании генераторов импульсов различной формы, в схемах выпрямителей, для регулирования мощности переменного тока.

Рассмотрим фазовое управление током тиристора. Пусть переменное напряжение U приложено к последовательно соединенным тиристор и резистору нагрузки R_n (рис. 5), а к управляющему электроду напряжение $U_{упр}$ подается с фазосдвигающей RC -цепочки. Изменяя величину сопротивления резистора R , можно менять фазовый сдвиг между напряжением на аноде тиристора U_a и на управляющем электроде $U_{упр}$ (рис. 6). Напряжение $U_{упр}$ вызывает соответствующий ток управляющего электрода $I_{упр}$.

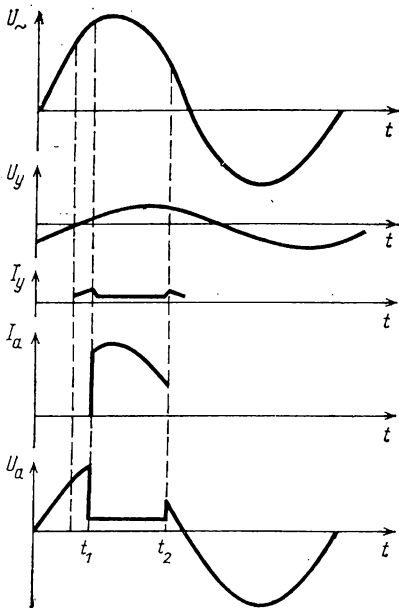


Рис. 6. Эпюры напряжений и токов в схеме фазового управления

Очевидно, что тиристор откроется в тот момент времени t_1 , когда соотношение между U_a и $U_{упр}$ будет соответствовать какой-либо точке на пусковой характеристике тиристора (см. рис. 4). В момент включения через тиристор и R_n потечет ток I_a , а величина тока управляющего электрода станет очень маленькой. Падение напряжения на открытом тиристоре тоже станет очень маленьким.

В некоторый момент времени t_2 тиристор закроется. Изменяя фазовый сдвиг между напряжениями U_a и $U_{упр}$, можно сдвигать момент отпирания t_1 тиристора и, таким образом, изменять продолжительность открытого состояния тиристора $t_2 - t_1$. Тем самым можно регулировать средний за период ток через резистор R_n .

Описание экспериментальной установки

Ознакомление с тиристором, снятие его характеристик производится на установке, основным элементом которой является специальная монтажная панель. На этой панели расположен тири-

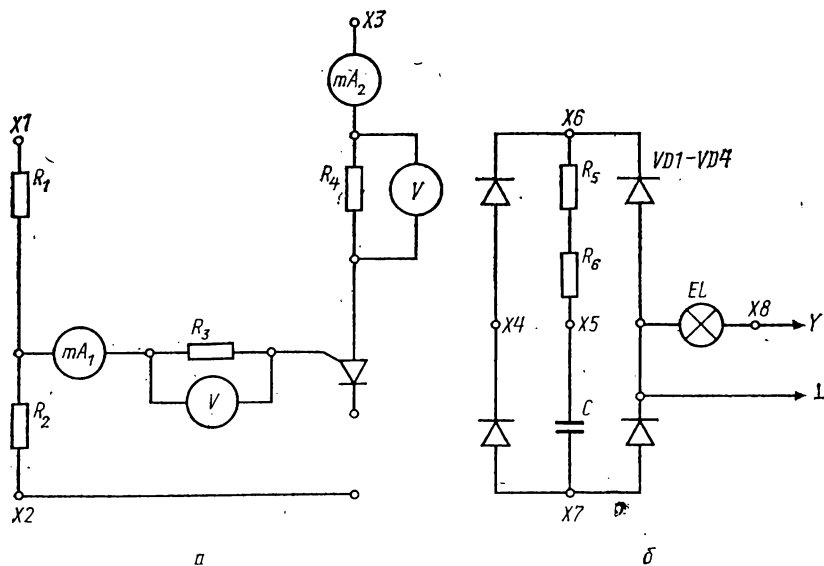


Рис. 7. Схема экспериментальной установки

тор, некоторые вспомогательные элементы и гнезда для подключения приборов. Схема панели изображена на рис. 7. На схеме указаны также приборы, расположенные вне панели.

Для создания управляющего тока на гнезда $X1, X2$ подается напряжение, регулируемое в пределах $0 \div 9$ В, с источника питания (ток < 100 мА). Резисторы R_1, R_2 образуют делитель напряжения, необходимый для более плавной регулировки тока управ-

ляющего электрода (y) (в дополнение к регулировке в источнике питания). Миллиамперметр mA_1 с пределом измерения 15 мА предназначен для измерения тока управляющего электрода тиристора.

При снятии характеристик тиристора ток управляющего электрода изменяется в весьма небольших пределах. Уловить эти изменения по стрелочному прибору mA_1 практически невозможно. Поэтому в цепь этого тока включен дополнительный резистор R_3 , падение напряжения на котором регистрируется цифровым электронным вольтметром V .

На анод тиристора (гнездо $X3$) подается либо переменное напряжение 0÷60 В от генератора, либо постоянное напряжение 0÷100 В от источника питания.

Миллиамперметр mA_2 служит для измерения тока через тиристор.

Резистор R_4 ограничивает ток через тиристор. Он может также использоваться для более точных измерений этого тока посредством измерения падения напряжения на нем цифровым вольтметром.

В правой части специальной панели расположена схема, предназначенная для демонстрации управления величиной тока с помощью тиристора. В этом случае переменное напряжение от генератора подключается к гнездам $X1$ и $X2$. Тиристор, будучи отключенным от элементов предыдущей схемы, подсоединяется следующим образом: анод — к гнезду $X6$, управляющий электрод — к гнезду $X4$, катод — к гнезду $X7$. Нагрузкой является лампочка накаливания EL , напряжение с которой подается на вход Y осциллографа. Сопротивления R_5 и R_6 вместе с конденсатором C образуют фазовращающую цепочку. Изменяя величину R_5 , можно менять фазу напряжения, действующего на управляющем электроде тиристора, относительно напряжения на его аноде. При определенном соотношении между фазами этих напряжений управляющий ток и анодное напряжение тиристора оказываются такими, что тиристор открывается и остается открытым, пока с течением времени (в пределах полупериода) анодное напряжение не станет таким, что тиристор закроется. Меняя соотношение между фазами напряжений, действующих на управляющем электроде и на аноде тиристора, можно менять продолжительность открытого состояния тиристора, т. е. величину среднего тока, текущего через тиристор.

Мостиковая схема из диодов позволяет открывать тиристор и в положительный и в отрицательный полупериоды переменного напряжения, подаваемого на схему от генератора. При указанном включении нагрузки через нее течет ток, среднее значение которого можно изменять.

Упражнение 1. НАБЛЮДЕНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРА НА ЭКРАНЕ ОСЦИЛЛОГРАФА

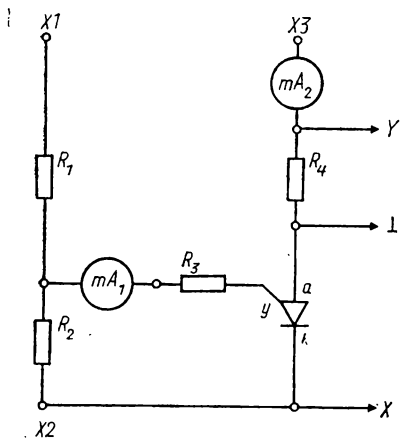


Рис. 8. Схема для наблюдения вольт-амперной характеристики тиристора на экране осциллографа

Собрать схему в соответствии с рис. 8. От генератора к гнездам $X3$ и $X2$ подать напряжение величиной $40 \div 50$ В. В цепь управляющего электрода подать постоянное напряжение $3 \div 9$ В. Величину управляющего тока с помощью регулировки на передней панели источника и переменного резистора R_1 установить такой, чтобы тиристор открылся, — при этом на экране появится изображение его вольт-амперной характеристики. Меняя ток управляющего электрода, наблюдать изменение потенциала открывания тиристора, т. е. смещение крайней правой точки на характеристике. Зарисовать одну из характеристик.

Упражнение 2. СНЯТИЕ ПУСКОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРА

Эту характеристику, т. е. зависимость между потенциалом включения тиристора по аноду и током через управляющий электрод, будем снимать, подавая на анод переменное напряжение. Подключить к резистору R_3 цифровой вольтметр V (см. рис. 7), установить переменное напряжение на аноде тиристора U_a 50—60 В (по прибору генератора). Если тиристор открыт — закрыть его, уменьшив управляющий ток. Затем, плавно его увеличивая, включить тиристор. О закрытии и открытии тиристора можно судить по осциллограмме или показаниям миллиамперметра mA_2 . Момент включения тиристора зафиксировать, занеся в таблицу значения U_a и ΔU_{R_3} — падение напряжения на резисторе R_3 в момент включения тиристора. Затем установить следующее значение U_a , увеличивая управляющий ток, открыть тиристор, занести в таблицу новую пару значений U_a и ΔU_{R_3} и т. д. Для каждой точки, в которой производились измерения, вычислить величину управляющего тока $I_y = \Delta U_{R_3} / R_3$ и занести в таблицу.

Изобразить графически зависимость между $U_{\text{вкл}}$ и I_y .

Упражнение 3. СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРА

Эту характеристику снять на «постоянном токе», для чего вместо переменного напряжения подать на гнездо ХЗ постоянное напряжение с выхода «20—300 В» источника (см. рис. 8). Цифровой вольтметр V переключить непосредственно на тиристор, между его выводами «анод» и «катод». Осциллограф отключить от схемы.

Установить одно из значений управляющего тока, при котором тиристор открывался в предыдущем упражнении. Изменяя ступенями напряжение, подаваемое на анод тиристора от источника, снять зависимость между U_a — напряжением на аноде тиристора, измеряемым цифровым вольтметром V , и током I_a , текущим через тиристор. Этот ток измеряется миллиамперметром mA_2 . Результаты измерений занести в таблицу.

Аналогичные измерения сделать для какого-либо другого значения $I_{упр}$. Зависимость между U_a и I_a для обоих значений $I_{упр}$ изобразить графически.

Упражнение 4. ФАЗОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТОКОМ С ПОМОЩЬЮ ТИРИСТОРА

Собрать схему в соответствии с рис. 7, б. Осциллограф поставить в режим внутренней развертки.

Подать на гнезда Х4 и Х8 от генератора напряжение величиной примерно 20 В. Вращая ручку переменного резистора R_5 , наблюдать изменение осциллограммы тока, проходящего через лампу L . Сопоставить осциллограммы тока через лампочку для двух различных положений ручки переменного резистора R_5 .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид имеет вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода?
2. Каково устройство тиристора?
3. Какие бывают тиристоры?
4. Какой вид имеет вольт-амперная характеристика динистора?
5. Почему при некотором напряжении на динисторе происходит его включение?
6. Объяснить действие управляющего электрода тринистора.
7. Объяснить принцип фазового управления величиной переменного тока через нагрузку с помощью тиристора.

Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 152, 153.
2. Жеребцов И. П. Основы электроники. М.: Энергия, 1974, § 2—9.

Лабораторная работа 12

ТРАНЗИСТОР

В данной лабораторной работе снимаются характеристики транзистора, вычисляются его параметры, наблюдается усиление переменного сигнала усилителем на транзисторе.

Физические процессы в транзисторе и его устройство

Рассмотрим *биполярный* транзистор, т. е. полупроводниковый прибор с двумя p — n -переходами, для работы которого существенно участие в создании тока носителей заряда *обоих* знаков.

Устройство транзистора показано на рис. 1. Он представляет собой пластинку германия или другого полупроводника, в кото-

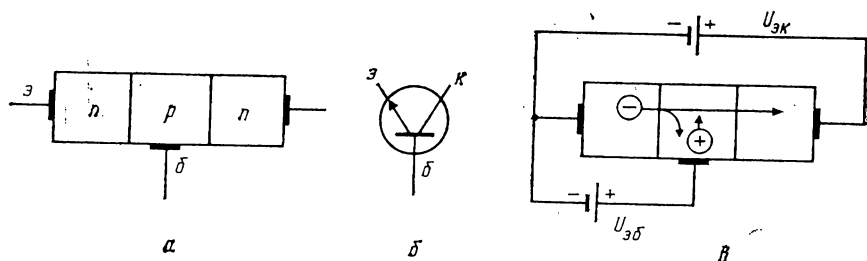


Рис. 1. Устройство (а), обозначение (б), схема включения (в) транзистора n — p — n -типа

рой созданы три области с различной электропроводностью. Транзистор типа n — p — n имеет среднюю область с дырочной электропроводностью, а две крайние области — с электронной электропроводностью. Средняя область называется базой, одна крайняя область — эмиттером, другая — коллектором. Расстояние между p — n -переходами должно быть очень малым, не более единиц микрон, т. е. область базы должна быть очень тонкой.

Рассмотрим, что будет происходить в транзисторе при подключении к нему внешних напряжений. Обычно к эмиттерному переходу подключают напряжение, являющееся прямым для основных носителей заряда областей, прилегающих к этому переходу, а к коллекторному переходу — обратное напряжение. При таком включении транзистора ток между эмиттером и базой I_z будет в основном состоять из электронов, движущихся из эмиттера в базу. Дырки из базы в эмиттер проникают также легко — для них эмиттерный переход также включен в прямом направлении. Но концентрацию дырок в базе делают значительно меньше концентрации свободных электронов в области эмиттера. Поэтому током дырок из базы в область эмиттера можно пренебречь.

Часть электронов, проходя через базовую область, рекомбинирует там с дырками, однако большая часть их диффундирует

сквозь узкую базовую область и попадает в поле коллекторного перехода, который для них открыт. Таким образом, ток коллектора практически равен току эмиттера, отличаясь от него на небольшую долю вследствие рекомбинации части электронов в базовой области.

Так как часть дырок в базе рекомбинирует с электронами, пришедшими из эмиттера, то для их восполнения в базе образуются новые дырки (вследствие ухода лишних электронов из базы во внешнюю цепь). Таким образом, ток базы можно считать состоящим из дырок, как бы приходящих из внешней цепи.

Назначением эмиттера является инжекция (впуск, впрыскивание, но не эмиссия в обычном понимании этого термина) носителей заряда в базу. База — это область, в которую инжектируются эмиттером неосновные для нее носители заряда. Коллектор — область, назначением которой является экстракция (прием, поглощение) носителей заряда из базы.

Между рассмотренными токами в соответствии с законом Кирхгофа выполняется соотношение

$$I_{\varepsilon} = I_{\kappa} + I_{\delta}. \quad (1)$$

Аналогичное соотношение выполняется и для приращений токов:

$$\Delta I_{\varepsilon} = \Delta I_{\kappa} + \Delta I_{\delta}. \quad (2)$$

Работу транзистора иллюстрирует потенциальная диаграмма (рис. 2). Потенциал эмиттера принят за нулевой. В эмиттерном переходе, хотя он и включен в прямом направлении для электронов (основных носителей заряда в эмиттерной области), все-таки есть небольшой потенциальный барьер. Высотой этого барьера можно управлять, меняя напряжение между базой и эмиттером. Поле в области коллектора для электронов является ускоряющим.

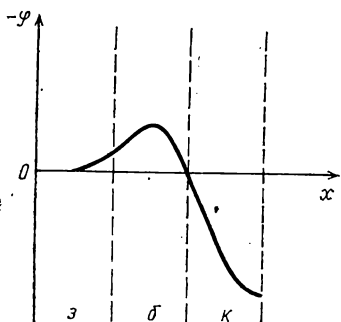


Рис. 2. Изменение потенциала между эмиттером и коллектором

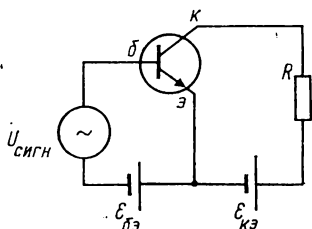


Рис. 3. Схема включения транзистора с общим эмиттером

Характеристика транзистора. Зависимость между токами и напряжениями, действующими в транзисторе, имеет сложный характер. Ее удобно описывать графически в виде характеристик.

Рассмотрим одну из основных схем включения транзистора — схему с общим эмиттером (рис. 3). Входное напряжение $U_{\text{сигн}}$, которое необходимо усилить, подается на участок база—эмиттер. На базу подается также напряжение смещения $U_{бэ}$. При этом в цепи базы протекает некоторый ток, т. е. входное сопротивление транзистора получается сравнительно небольшим. Цепь коллектора (выходная цепь) питается от источника $\mathcal{E}_{кэ}$. Для получения усиленного выходного напряжения в эту цепь включена нагрузка.

Статические характеристики снимаются на постоянном токе.

В качестве входных характеристик для описанной схемы можно рассматривать зависимость

$$I_б(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = \text{const}, \quad (3)$$

а выходных — зависимость

$$I_к(U_{кэ}) \text{ при } I_б = \text{const}. \quad (4)$$

Семейства указанных характеристик изображены на рис. 4 ($U_{кэ1} < U_{кэ2}$, $I_{б1} < I_{б2} < I_{б3}$).

Входные и выходные характеристики транзистора имеют тесную связь с вольт-амперной характеристикой полупроводникового диода. Действительно, входные характеристики относятся к эмит-

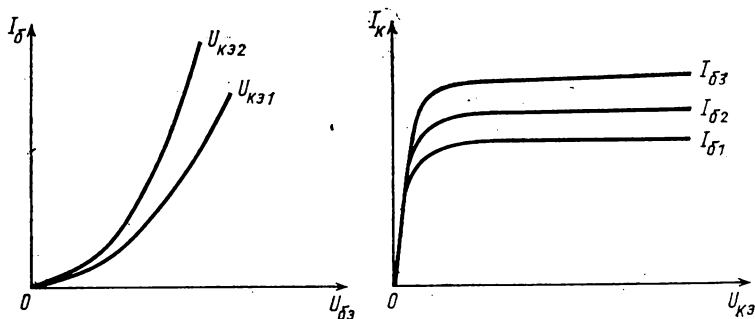


Рис. 4. Входные и выходные характеристики транзистора

терному переходу, который работает при прямом напряжении. Поэтому они подобны характеристике прямого тока диода. Выходные характеристики подобны характеристике обратного тока диода, так как отображают свойства коллекторного перехода, работающего при обратном напряжении (для основных носителей заряда).

По входным характеристикам можно определить входное сопротивление транзистора:

$$R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} \text{ при } U_{кэ} = \text{const}, \quad (5)$$

а по выходным — выходное сопротивление:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta I_к} \text{ при } I_б = \text{const}. \quad (6)$$

Вычисленные таким образом величины $R_{вх}$ и $R_{вых}$ являются сопротивлениями транзистора по переменному току, т. е. такое сопротивление оказывает транзистор переменному току небольшой амплитуды сравнительно с постоянным током, текущим соответственно во входной и выходной цепях. Величины $R_{вх}$ и $R_{вых}$ используются при анализе работы транзистора в схемах усиления переменного тока или напряжения.

Одним из важнейших параметров транзистора является коэффициент усиления тока базы β , который определяется как отношение приращения тока коллектора к приращению тока базы при постоянной разности потенциалов между эмиттером и коллектором:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_6} \text{ при } U_{эк} = \text{const.} \quad (7)$$

Так как основная часть тока эмиттера замыкается через цепь коллектора, коэффициент β всегда значительно больше единицы. У современных транзисторов $\beta = 10 \div 300$.

Усиление напряжения с помощью транзистора. При любой схеме включения транзистора в качестве усилителя электрический ток имеется как в выходной цепи, так и во входной. Это позволяет говорить об усилителе на транзисторе как об усилителе тока. Но входной ток транзистора связан с выходным напряжением (для схемы с общим эмиттером ток базы связан с напряжением, действующим между базой и эмиттером, через входное сопротивление $R_{вх}$). Поэтому можно воспользоваться этой связью и говорить об усилении напряжения. А с точки зрения физики явления следует иметь в виду, что выходной ток, т. е. ток, протекающий через нагрузку и определяющий усиление, зависит от высоты потенциального барьера в области эмиттерного перехода, т. е. от напряжения, действующего между базой и эмиттером. Таким образом, схему с транзистором можно рассматривать и как усилитель тока, и как усилитель напряжения, и, естественно, как усилитель мощности.

Коэффициент усиления по напряжению схемы с транзистором приближенно можно вычислить следующим образом:

$$K = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_K R_H}{\Delta I_6 R_{вх}} = \beta \frac{R_H}{R_{вх}}. \quad (8)$$

Эта простая формула справедлива лишь в небольшой области режимов работы транзистора. Более строгий расчет выполняется весьма сложным образом.

Как и в любом другом усилителе, коэффициент усиления транзисторного усилителя зависит от частоты сигнала и его амплитуды.

Описание экспериментальной установки. Изучение транзистора выполняется на установке, основным элементом которой является специальная монтажная панель (рис. 5). На ней размещены

транзистор VT типа МП37Б и некоторые другие элементы. Питание схемы осуществляется от источника постоянного напряжения 15 В. Ток, потребляемый схемой от источника, не более 5 мА. На панели есть специальные гнезда для подключения приборов, измеряющих ток и напряжение базы, ток и напряжение коллектора,

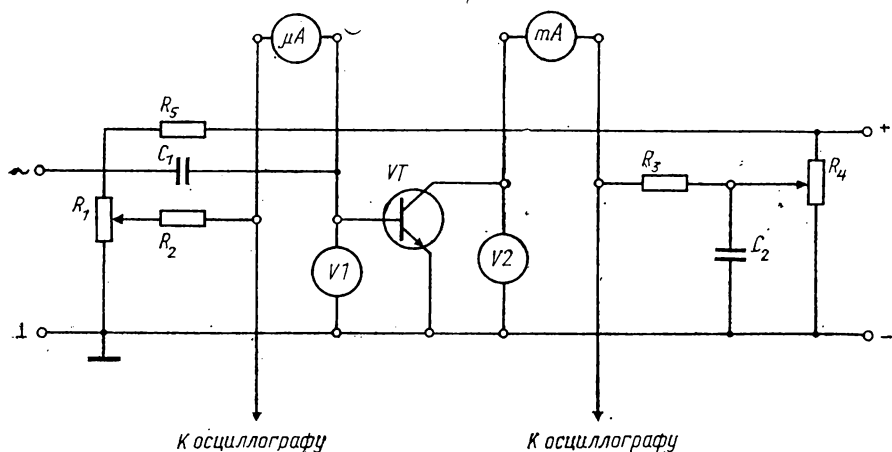


Рис. 5 Схема экспериментальной установки

гнезда для подачи на вход транзисторного усилителя сигнала от генератора переменного напряжения, гнезда для подключения осциллографа, чтобы наблюдать форму и величину этого сигнала на входе и выходе усилителя.

Величина постоянного напряжения на базе транзистора регулируется потенциометром R_1 , а на коллекторе — потенциометром R_4 . Резистор R_2 играет вспомогательную роль, ограничивая величину базового тока транзистора и способствуя плавности регулировки базового напряжения. Резистор R_3 при изучении усиления выполняет роль нагрузки. Резистор R_5 уменьшает величину напряжения, подаваемого на потенциометр R_1 . Конденсатор C_1 позволяет подвести к базе транзистора переменный сигнал, не нарушая режима работы транзистора по постоянному току. Конденсатор C_2 закорачивает на минус схемы один из концов нагрузочного резистора R_2 (по переменному току). Величины элементов схемы: $R_1=R_4=6,8$ кОм, $R_2=56$ кОм, $R_3=1,1$ кОм, $R_5=12$ кОм, $C_1=C_2=1$ мкФ.

Ток базы измеряется микроамперметром с пределом измерения 100 мкА, ток коллектора — миллиамперметром с пределом измерения 3 мА.

Напряжения на базе и на коллекторе измеряются ламповыми вольтметрами.

В качестве источника усиливаемого переменного сигнала используется генератор, с которого снимается напряжение с амплитудой не более 50 мВ на частоте 1000 Гц.

Визуально сигнал наблюдается на экране осциллографа.

Величина усиливаемого сигнала оценивается по вольтметру генератора, а величина усиленного сигнала — с помощью калиброванного входного делителя осциллографа.

Упражнение 1. СНЯТИЕ СЕМЕЙСТВА ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

Собрать схему в соответствии с рис. 5.

Ручки потенциометров R_1 и R_4 сначала должны быть установлены в крайнее положение против часовой стрелки, резистор R_3 закоротить перемычкой. Установить пределы измерения приборов, исходя из того, что ожидаемые значения $U_{кэ}=10$ В, $U_{бэ}=0,2$ В, $I_к=2$ мА, $I_б=30$ мкА.

Подключить к схеме источник питания.

Установить ток базы $I_б=5$ мкА. Затем вращать ручку потенциометра R_4 до появления коллекторного тока.

Если при этом ток базы изменится, то восстановить его первоначальное значение. Получившиеся при этом значения $U_{кэ}$ и $I_к$ занести в таблицу.

Снять зависимость $I_к(U_{кэ})$ при $I_б=5$ мкА, увеличивая $U_{кэ}$ с помощью потенциометра R_4 и поддерживая $I_б$ постоянным с помощью R_1 . Результаты измерений занести в таблицу.

После этого аналогичным образом снять зависимость $I_к(U_{кэ})$ при $I_б=10, 20, 30$ мкА. Результаты измерений занести в таблицы.

Закончив измерения, уменьшить напряжения и токи в схеме до минимума.

Построить графики зависимости $I_к(U_{кэ})$ при $I_б$ в качестве параметра.

Для использования транзистора в качестве усилителя переменного сигнала (упражнение 3) транзистор необходимо поставить в режим работы по постоянному току, обеспечивающий линейную связь между $U_{кэ}$ и $I_к$ (при этом искажения усиливаемого сигнала будут наименьшими). В связи с этим на графике, где изображено семейство выходных характеристик транзистора, определить точку, примерно соответствующую центру линейных участков характеристик. Пусть это будет точка с координатами $U_{кэ}=U_{кэ}^*$, $I_б=I_б^*$.

Записать значения $U_{кэ}^*$ и $I_б^*$. Считая, что в окрестности этой точки параметры транзистора практически неизменны, определить величину коэффициента усиления транзистора по току β (см. (7)) и величину выходного сопротивления транзистора $R_{вых}$ (см. (6)).

Упражнение 2. СНЯТИЕ ВХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНЗИСТОРА

С помощью потенциометра R_4 установить $U_{кэ} = U_{кэ}^*$. Снять зависимость $I_6(U_{бэ})$, занося результаты измерений I_6 и $U_{бэ}$ в таблицу. При этом напряжение $U_{бэ}$ увеличивать с помощью потенциометра R_1 , поддерживая $U_{кэ} = U_{кэ}^*$ с помощью потенциометра R_4 .

Закончив измерения, уменьшить напряжения и токи в схеме до минимума.

Построить графики зависимости $I_6(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = U_{кэ}^*$.

Для значения $I_6 = I_6^*$ по наклону зависимости $I_6(U_{бэ})$ определить величину входного сопротивления транзистора $R_{вх}$ (см. (5)).

Упражнение 3. НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА УСИЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО СИГНАЛА С ПОМОЩЬЮ ТРАНЗИСТОРА

Зная величины β и $R_{вх}$, найденные в предыдущих упражнениях для определенного режима работы транзистора ($U_{кэ} = U_{кэ}^*$, $I_6 = I_6^*$), а также зная сопротивление резистора нагрузки R_n (см. на панели), можно вычислить величину коэффициента усиления транзисторного усилителя, в котором транзистор стоит в указанном режиме, а в качестве нагрузки стоит резистор $R = R_n$. Вычислить коэффициент усиления K (см. (8)).

Теперь определим, каков же на самом деле коэффициент усиления нашего усилителя.

Снять короткозамыкающую перемычку с резистора R_3 .

С помощью потенциометров R_1 и R_4 установить режим работы транзистора, соответствующий выбранному по результатам предыдущих упражнений ($U_{кэ} = U_{кэ}^*$, $I_6 = I_6^*$). Вольтметр B_1 исключить из схемы. Включить генератор, и с его выхода подать небольшое (около 10 мВ) напряжение частоты примерно 1 кГц на вход транзистора через конденсатор C_1 .

Подключить к схеме в соответствии с рис. 5 осциллограф и на его экране получить изображение сигнала на входе транзисторного усилителя, а затем на выходе. Убедиться в том, что выходной сигнал сохранил свою гармоническую форму. Если же нет, то уменьшить величину входного сигнала.

Определить коэффициент усиления усилителя как отношение величин сигнала на его выходе и входе:

$$K_{\text{эсп}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Закончив измерения, уменьшить напряжение и токи в схеме до минимума, выключить приборы и питание схемы.

Сравнить коэффициент усиления, определенный экспериментально, с коэффициентом усиления, найденным теоретически с использованием параметров β и $R_{вх}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой транзисторы $n-p-n$ -типа?
2. Какую роль играют эмиттер, база и коллектор в транзисторе?
3. Почему базу транзистора делают тонкой?
4. Какие носители заряда являются основными и неосновными в эмиттерной, базовой и коллекторной областях транзистора?
5. Для каких носителей заряда коллекторный переход включается в обратном направлении?
6. Объяснить сходство между входными и выходными характеристиками транзистора, с одной стороны, и вольт-амперной характеристикой диода — с другой?
7. Как можно найти величины входного и выходного сопротивлений транзистора?
8. Как можно определить коэффициент усиления транзистора по току?
9. Какого порядка обычно бывают входное и выходное сопротивления транзистора?

Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 206.
2. Жеребцов И. П. Основы электротехники. Л.: Энергия, 1974, с. 86—94.

Лабораторная работа 13

УСИЛИТЕЛЬ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЕ

Рассматривается работа усилителя, построенного на интегральной микросхеме. Снимаются амплитудная, амплитудно-частотная и фазовая характеристики усилителя.

Усилитель на транзисторе. При проведении физических экспериментов часто возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов. Широкое применение получили усилители на транзисторах.

Рассмотрим, как работает усилитель на одном транзисторе, который имеет два $n-p$ -перехода: эмиттерный — между эмиттером и базой, коллекторный — между базой и коллектором. Такие транзисторы называют биполярными, так как их работа основана на использовании носителей заряда обоих знаков.

Режим работы транзистора называют активным, если на эмиттерном переходе напряжение прямое, т. е. имеет полярность, соответствующую прямому току через этот переход, а на коллекторном переходе — обратному. Активный режим является основным и используется в большинстве усилителей.

В усилительные схемы транзистор включается как четырехполюсник, имеющий два входных и два выходных зажима. Так как транзистор имеет три вывода, один из них оказывается одновременно и входным и выходным, т. е. является общим.

Наиболее часто в усилителях применяется включение транзистора с общим эмиттером, показанное на рис. 1 для случая транзистора $n-p-n$ -типа.

Переменное напряжение $U_{вх}$, которое необходимо усилить, подается от источника колебаний на участок база — эмиттер (входная цепь). В цепи базы находится также источник постоянного тока \mathcal{E}_1 . Цепь коллектора (выходная цепь) питается от источника \mathcal{E}_2 . Для выделения усиленного выходного напряжения $U_{вых}$ в эту цепь включен резистор нагрузки R_H .

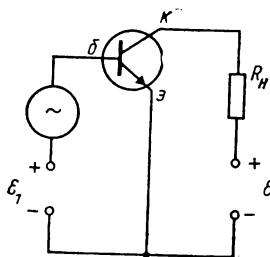


Рис. 1. Включение транзистора с общим эмиттером

Усиление электрических колебаний с помощью транзистора основано на том явлении, что напряжение участка база — эмиттер $U_{бэ}$ (или ток на участке база — эмиттер) существенно влияет на ток коллектора: чем больше напряжение между базой и эмиттером, тем больше ток коллектора, т. е. входное напряжение $U_{бэ}$ управляет током коллектора.

Важным параметром, характеризующим работу полупроводниковых усилителей, является его коэффициент усиления по напряжению:

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}. \quad (1)$$

Коэффициент усиления по напряжению оказывается неодинаковым для сигналов разных частот — это присуще всем усилителям.

Кроме того, отношение амплитуды напряжения на выходе усилителя к амплитуде напряжения на входе даже при фиксированной частоте не является постоянной величиной. При небольших амплитудах на входе усилителя напряжение на выходе пропорционально напряжению на входе. С увеличением амплитуды на входе пропорциональность нарушается, зависимость этих величин становится нелинейной, что приводит к искажению усилителем формы сигналов, поступающих на его вход.

Сказанное выше заставляет описывать работу усилителей при помощи следующих характеристик: амплитудно-частотной характеристики — зависимостей коэффициента усиления по напряжению от частоты $K_U = f(\omega)$ и амплитудной характеристики — зависимости амплитуды напряжения на выходе от амплитуды на входе при фиксированной частоте.

Представляет интерес также фазовая характеристика — зависимость угла сдвига фазы напряжения на выходе по отношению к фазе напряжения на входе от частоты $\varphi = f(\omega)$.

Амплитудная характеристика усилителя. Поведение амплитудной характеристики, т. е. зависимости $U_{вых} = f(U_{вх})$ при $\omega = \text{const}$,

можно объяснить режимом работы транзистора, т. е. выбором рабочих точек на его входных и выходных характеристиках.

Семейство выходных характеристик транзистора представляет собой зависимость

$$I_K = f(U_{KЭ}) \text{ при } I_0 = \text{const.} \quad (2)$$

Для выходной цепи транзистора справедливо уравнение

$$\mathcal{E}_2 = U_{KЭ} + I_K R_H. \quad (3)$$

Таким образом, имеются два уравнения с двумя неизвестными I_K и $U_{KЭ}$, причем одно из уравнений дано графически. Для решения такой системы уравнений надо построить график второго уравнения и найти координаты точки пересечения двух графиков. Уравнение (3) — это уравнение первой степени относительно I_K и $U_{KЭ}$. Его графиком является прямая линия, называемая линией нагрузки. Построение линии нагрузки производится по точкам ее пересечения с осями координат (рис. 2).

При $I_K = 0$ получаем $\mathcal{E}_2 = U_{KЭ}$ (точка M), при $U_{KЭ} = 0$ $I_K = \mathcal{E}_2 / R_H$ (точка N).

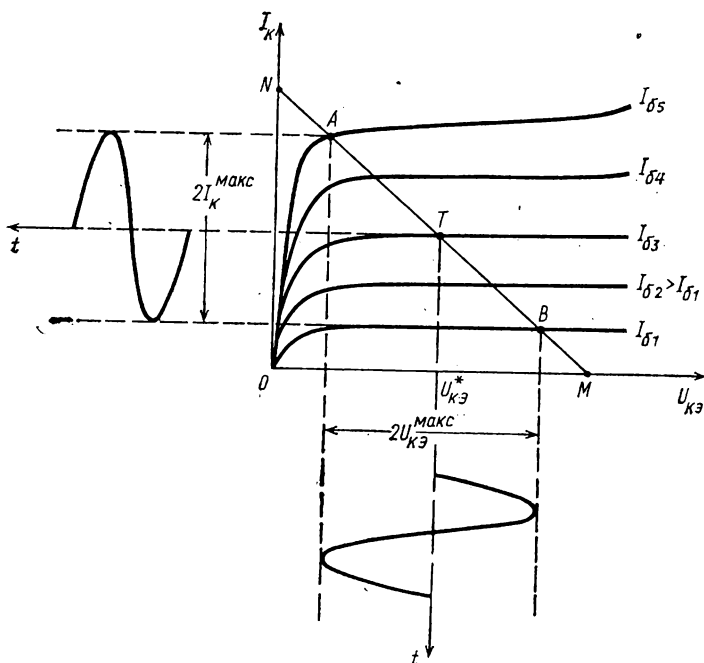


Рис. 2. Построение линии нагрузки

На линии нагрузки выбирается рабочий участок (AB), который определяет пределы возможных изменений I_K и $U_{KЭ}$, т. е. удвоенную амплитуду выходного тока $2I_{\text{макс}}$ и выходного напря-

жения $2U_{\text{макс кз}}$, а также пределы изменения I_6 (от значения I_{61} до I_{65}).

Середина рабочего участка (рабочая точка T) задает в свою очередь положение рабочей точки T_1 на входной характеристике (рис. 3):

$$I_6 = f(U_{6э}) \text{ при } U_{кз}^* = \text{const.}$$

Из рис. 2 и 3 видно, что рабочие точки должны задаваться в областях, где нелинейности входных и выходных характеристик транзистора проявляются слабее. При этом усиление синусoidalь-

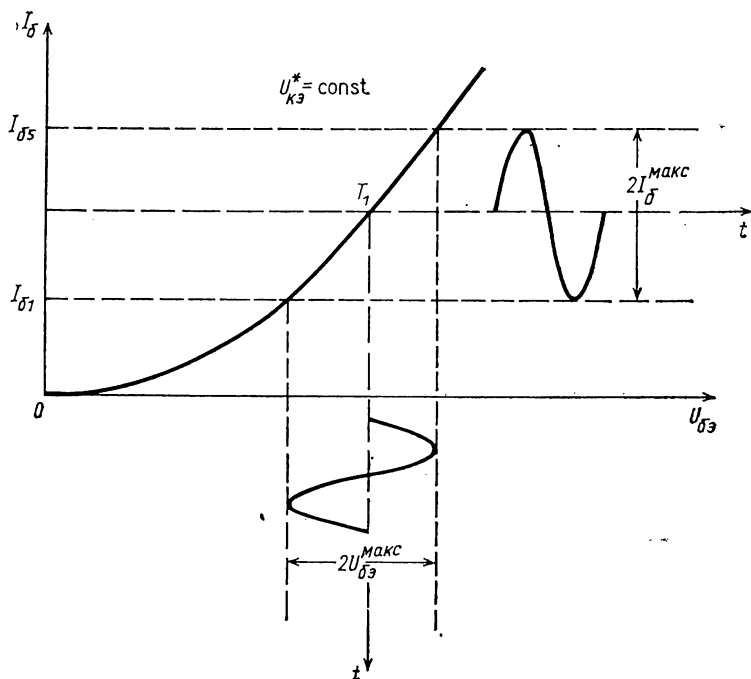


Рис. 3. Положение рабочей точки на входной характеристике транзистора

ных (или другой формы) колебаний входного напряжения $U_{6э}$ будет происходить с меньшими нелинейными искажениями. Однако даже при правильном выборе рабочей точки эти нелинейности начинают проявляться при достаточно больших амплитудах входного сигнала. Амплитудная характеристика усилителя дает возможность судить об этих искажениях.

Амплитудно-частотная характеристика усилителя. Характерным в этой зависимости является уменьшение (завал или спад) коэффициента усиления в области низких и высоких частот и

сравнительно постоянное его значение в области средних частот. Эта область средних частот зависит от реактивных элементов, входящих как в схему самого усилителя, так и в цепи, соединяющие усилитель с источником исследуемого сигнала и с устройством, регистрирующим усиленный сигнал.

Рассмотрим схему на рис. 4. В большинстве случаев цепь, соединяющую усилитель с внешними устройствами, можно предста-

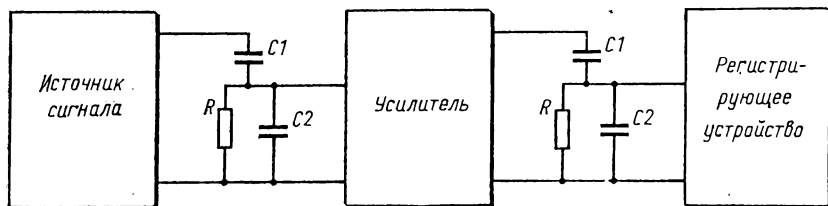


Рис. 4. Связь усилителя с внешними устройствами

вить в виде комбинации конденсаторов C_1 и C_2 и резистора R , изображенной на этом рисунке. Здесь C_1 — конденсатор, развязывающий по постоянному току усилитель и внешние устройства, R и C_2 — соответственно входное сопротивление и входная емкость усилителя или внешнего устройства. Такая комбинация C_1 , R , C_2 может рассматриваться как делитель переменного напряжения. Спад величины K_U в области низких частот объясняется возрастанием сопротивления переменному току верхнего плеча делителя — конденсатора C_1 ($|Z| = 1/\omega C$). При этом сопротивление нижнего плеча определяется резистором R , так как на этих частотах $R \gg 1/\omega C_2$. Таким образом, для данного усилителя по мере понижения частоты от некоторого среднего значения происходит перераспределение падения напряжения на делителе, в результате на нижнем плече падение напряжения уменьшается, а именно оно подается на следующее устройство.

Область средних частот начинается с частот, для которых $1/\omega C_1 \ll R$, т. е. частот, для которых конденсатор C_1 представляет собой малое сопротивление по сравнению с R .

С ростом частоты конденсатор C_2 начинает все больше и больше шунтировать резистор R . Вследствие этого падение напряжения на делителе перераспределяется, и на высоких частотах также получается «завал» характеристики.

Фазовая характеристика усилителя. Любой периодический сигнал сколь угодно сложной формы можно представить в виде суммы гармонических составляющих, имеющих определенные амплитуды и фазы (теорема Фурье). Поэтому, если нужно усилить сигнал сложной формы, нужно сохранить между его гармоническими составляющими не только первоначальные амплитудные, но и фазовые соотношения.

Фазовая характеристика усилителя представляет собой зави-

симость изменения фазы усиленного гармонического напряжения относительно фазы входного напряжения от частоты:

$$\varphi = f(\omega),$$

где φ — разность фаз $U_{\text{вых}}$ и $U_{\text{вх}}$.

Фазовая характеристика определяется теми же реактивными элементами, что и частотная.

Интегральная технология. В последние годы широкое распространение получила новая технология создания радиосхем, при которой отдельные элементы соединяются в единое целое не после, а в ходе их изготовления. Эта технология получила название *интегральной*. Узлы радиоэлектронной аппаратуры, изготовленные таким образом, были названы интегральными микросхемами. Приставка «микро» подчеркивает характерную особенность интегральной технологии — высокий уровень миниатюризации, достигаемый в ее изделиях. Действительно, интегральная технология позволяет получать плотности упаковки до 1000 элементов (диодов, транзисторов, резисторов и т. п.) в кубическом сантиметре.

Наибольшее распространение получили интегральные микросхемы, у которых все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводника. Для изготовления таких полупроводниковых микросхем используются кремниевые монокристаллические пластины толщиной 0,3—0,4 мм. Элементы микросхемы — биполярные и полевые транзисторы, диоды, резисторы и конденсаторы — формируют в полупроводниковой пластине методами селективной диффузии атомов, эпитаксии и др. Соединения элементов друг с другом выполняют путем напыления узких проводящих дорожек алюминия на окисленную (т. е. электрически изолированную) поверхность кремния, имеющую окна в пленке окисла в тех местах, где должен осуществляться контакт дорожек с кремнием (в области эмиттера, базы, коллектора транзисторов и др.). Резисторы и конденсаторы иногда изготавливают методом напыления на кремниевую пластину атомов другого вещества.

После выполнения всех операций по формированию элементов и соединений кремниевую пластину помещают в герметичный защитный корпус, имеющий выводы от определенных точек схемы.

Описание микросхемы. В настоящей лабораторной работе изучается усилитель, собранный на интегральной микросхеме типа К1С221А. Упрощенная принципиальная схема этого модуля изображена на рис. 5. Он используется как двухкаскадный усилитель. Оба каскада усилителя на транзисторах $VT1$ и $VT2$ типа $n-p-n$ выполнены по схеме с общим эмиттером. Источник питания с напряжением $\pm 6,3$ В подключается к выводам микросхемы 7 и 1. Резистор R_1 является нагрузкой первого транзистора, резистор R_5 — нагрузкой второго транзистора. Резисторы R_2 и R_6 определяют режим работы транзисторов по постоянному току; т. е. они таковы, что рабочая точка на характеристиках транзисторов лежит в середине линейных участков характеристик.

Входной сигнал подается на вывод 4, а выходной сигнал снимается с вывода 9.

Усилители вообще, а многокаскадные особенно склонны к возбуждению, т. е. переходу из режима усиления в режим генерирования колебаний. Чтобы этого не допустить, в усилителях вводят отрицательную обратную связь. В схеме рассматриваемого усилителя она осуществляется с помощью резисторов R_3 и R_4 , включенных между эмиттером второго транзистора и базой первого. Действительно, пусть потенциал базы первого транзистора под действием сигнала возрос. Тогда возрастает и ток коллектора, вследствие чего потенциал коллектора упадет. Так как коллектор

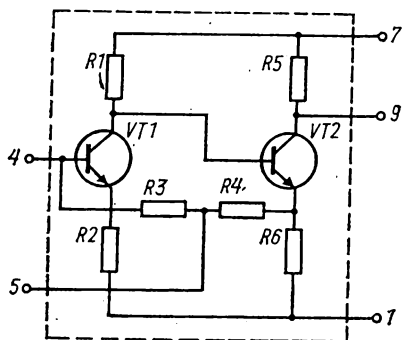


Рис. 5. Устройство микросхемы

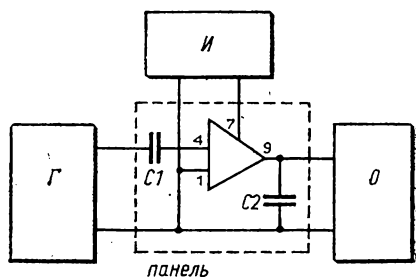


Рис. 6. Соединение микросхемы с приборами

первого транзистора непосредственно соединен с базой второго транзистора, то упадет и потенциал этой базы. Это приведет к уменьшению тока коллектора второго транзистора и, следовательно, к уменьшению падения напряжения на резисторе R_6 . Через резисторы R_3 и R_4 это приведет к уменьшению потенциала базы первого транзистора. Таким образом, чем больше усиление всего тракта, тем больший сигнал отрицательной обратной связи поступает с выхода усилителя на вход. Сопротивление резисторов R_3 и R_4 делается таким, чтобы сигнал обратной связи был достаточен для предотвращения возбуждения усилителя.

Между выводами 5 и 1 включается конденсатор большой емкости, с помощью которого величина обратной связи подобрана оптимальной — без него она слишком сильная.

Микросхема К1УС221А имеет ряд элементов и выводов, не указанных на рис. 5, которые позволяют корректировать частотную характеристику усилителя, регулировать коэффициент усиления и т. д.

Описание экспериментальной установки. Для снятия различных характеристик усилителя используется установка, блок-схема которой представлена на рис. 6. На вход микросхемы (вывод 4)

сигнал, подлежащий усилению, от генератора переменного напряжения подается через конденсатор C_1 . Конденсатор C_2 , подключенный к выходу микросхемы, искусственно увеличивает спад частотной характеристики усилителя в области верхних частот. Микросхема, конденсаторы C_1 и C_2 смонтированы на специальной панели, имеющей гнезда для подключения источника питания I , генератора G и осциллографа O , используемого для наблюдения усиленного сигнала.

Монтаж и включение установки. Собрать схему в соответствии с рис. 6. Для питания схемы подключить к ней один из выходов источника, предварительно убедившись, что ручка регулировки выхода стоит в крайнем положении против часовой стрелки, что соответствует минимальному выходному напряжению источника.

Вход усилителя подключить к гнездам генератора «выход». На усилитель *не следует* подавать напряжение свыше 10 мВ. Напряжение с выхода усилителя подать на вход Y осциллографа. Осциллограф должен работать в режиме внутренней развертки с синхронизацией развертки исследуемым сигналом.

Включить приборы в сеть и дать им прогреться 10 мин.

Установить напряжение питания усилителя $\pm 6,3$ В. Установить выходное напряжение генератора величиной несколько милливольт при частоте несколько кГц. Получить на экране осциллографа изображение усиленного гармонического сигнала.

У п р а ж н е н и е 1. СНЯТИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Меняя частоту генератора, установить ее в области, где выходной сигнал усилителя, наблюдаемый на экране осциллографа, максимален. Установить величину изображения сигнала $Y_{\text{макс}}$ удобной для отсчета, равной, например, 40 мм. Измерить величину U этого сигнала с помощью осциллографа.

Меняя частоту генератора, снять зависимость усиленного сигнала от частоты $U(f)$ в пределах от 20 Гц до 20 кГц. При этом следить за постоянством входного сигнала. Обратит внимание на спады частотной характеристики усилителя в области низких и в области высоких частот. Результаты измерений занести в таблицу.

Величину выходного напряжения усилителя $U_{\text{вых}}$ найти из соотношения

$$U_{\text{вых}} = Y \frac{U_{\text{макс}}}{Y_{\text{макс}}},$$

где Y — размер изображения сигнала U на экране осциллографа.

Коэффициент усиления исследуемого усилителя найти по формуле

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Вычисленные значения $U_{\text{вых}}$ и K также занести в таблицу. Построить график зависимости $K(\lg f)$.

Упражнение 2. СНЯТИЕ АМПЛИТУДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Установить частоту в области, где коэффициент усиления был максимален.

Увеличивая входное напряжение усилителя, обнаружить искажение формы выходного сигнала. Установить величину изображения еще не искаженного сигнала $Y_{\text{макс}}$, удобной для отсчета, равной, например, 40 мм. С помощью осциллографа определить напряжение этого сигнала $U_{\text{макс}}$.

Увеличивая входное напряжение усилителя $U_{\text{вх}}$ от нулевого, снять зависимость $Y(U_{\text{вх}})$. Результаты измерений занести в таблицу.

Для каждой точки вычислить величину выходного напряжения:

$$U_{\text{вых}} = Y \frac{U_{\text{макс}}}{Y_{\text{макс}}}.$$

Результаты вычислений также занести в таблицу.

Построить график зависимости $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$.

Зарисовать осциллограмму искаженного сигнала.

Упражнение 3. СНЯТИЕ ФАЗОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЯ

Поставить осциллограф в режим развертки от внешнего источника. В качестве внешнего напряжения использовать напряжение со второго выхода генератора ГЗ-18, обозначенного «выход 5Ω».

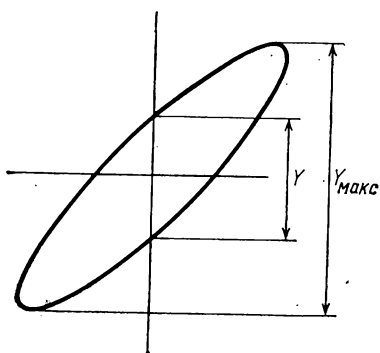


Рис. 7. Параметры эллипса, подлежащие измерению

Установить частоту, на которой выполнялось предыдущее упражнение, и величину входного напряжения усилителя, при котором выходной сигнал еще не искажался. Добиться наблюдения на экране осциллографа эллипса, близкого по форме к прямой линии, пересекающей центр экрана и занимающей диагональ квадрата со стороной, например, 40 мм.

Меняя частоту генератора от 20 Гц до 20 кГц, снять зависимость $Y(f)$ и $Y_{\text{макс}}(f)$, где Y и $Y_{\text{макс}}$ — характерные размеры эллипса, наблюдаемого на экране осциллографа (рис. 7). Обратить внимание,

что в районе средних частот фазовый сдвиг меняет знак. Результаты измерений занести в таблицу.

Вычислить угол фазового сдвига между выходным $U_{\text{вых}}$ и входным $U_{\text{вх}}$ напряжением усилителя:

$$\varphi = \arcsin \frac{Y}{Y_{\text{макс}}}.$$

Построить график зависимости $\varphi(\lg f)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как происходит усиление сигнала с помощью транзистора в схеме с общим эмиттером?
2. Какие факторы приводят к нелинейности амплитудной характеристики усилителя?
3. Какой вид имеют входные и выходные характеристики транзистора?
4. Какие дополнительные изменения нужно сделать в усилительной схеме с транзистором $n-p-n$ -типа, если заменить его на транзистор $p-n-p$ -типа?
5. Как выбирается рабочая точка на характеристиках транзистора?
6. Какие факторы влияют на частотную характеристику усилителя?
7. Какой вид должна иметь фазовая характеристика идеального усилителя?
8. В чем заключается интегральная технология создания радиосхем и в чем ее достоинства?
9. Что представляет собой микросхема К1УС221А?
10. Нарисовать схему установки и объяснить назначение отдельных ее элементов.
11. Какие правила техники безопасности следует соблюдать при выполнении настоящей задачи?

Литература

1. Брандт А. А., Ржевкин К. С. Техника монтажа и налаживания радиосхем. Изд-во Моск. ун-та, 1966.

ЛАБОРАТОРИЯ МАГНЕТИЗМА

В лаборатории магнетизма студенты *изучают физические явления*: возникновение магнитного поля в пространстве, окружающем проводники с током, намагничивание и перемагничивание ферромагнетиков, возникновение и изменение доменной структуры ферромагнетиков, ларморову прецессию, проявление магнитной анизотропии, изменение магнитных свойств ферромагнетика с температурой, эффект Холла, эффект Джоуля — Ленца;

изучают физические законы: закон Био — Савара, закон электромагнитной индукции, закон полного тока, теорему Лармора, закон Джоуля — Ленца;

овладевают методами расчета магнитных полей, основанными на законе Био — Савара и на законе полного тока;

овладевают методами измерения величины индукции магнитного поля, индукции насыщения вещества, остаточной индукции, магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, точки Кюри, размеров доменов ферромагнетиков, величины постоянной Холла, g -фактора и др.;

приобретают навыки работы с приборами: амперметрами постоянного и переменного тока, источниками питания, автотрансформатором, баллистическим гальванометром, потенциометром постоянного тока, микровеберметром, осциллографом и др.

Лабораторная работа 14

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ЕГО ИНДУКЦИИ

В настоящей лабораторной работе изучается магнитное поле, создаваемое соленоидом, катушками Гельмгольца, электромагнитом. При измерении величины индукции магнитного поля используется баллистический гальванометр, а также приборы, работа которых основана на эффекте Холла и ядерном магнитном резонансе.

Оборудование экспериментальной установки: соленоид длиной 40 см с числом витков 2000 провода ПЭЛ-0,21; катушки Гельмгольца специальной конструкции, позволяющей передвигать одну из катушек, а также передвигать держатель измерительного датчика по оси катушек и в вертикальном направлении; электро-

магнит с зазором 12 мм при диаметре 100 мм; баллистический гальванометр или микровеберметр, измерители магнитной индукции, работающие на эффекте Холла (Ш1-8) и на ЯМР (Ш1-1), частотомер (Ч1-40), источники питания соленоида, катушек Гельмгольца и электромагнита.

1. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

При исследовании свойств вещества часто бывают нужны магнитные поля, чтобы воздействовать ими на образцы. Магнитные поля нужны также при исследовании поведения заряженных частиц. При этом в большинстве случаев требуется, чтобы в некоторой области пространства магнитное поле было однородным. Это облегчает исследование явления и упрощает расчеты.

Простейшим устройством, создающим магнитное поле, является проводник с током. В пространстве вокруг него существует поле, индукция которого неоднородна.

Если проводник согнуть в кольцо радиуса R , поле будет тоже неоднородно. Однако если рядом с первым витком соосно расположить второй, то, подобрав расстояние между витками, можно получить довольно протяженную область пространства, где магнитная индукция будет практически одинакова.

Катушками Гельмгольца называют систему двух одинаковых катушек, расположенных друг от друга на расстоянии, равном их радиусу. В пространстве между катушками однородность поля может быть не хуже 0,5%. Катушки Гельмгольца широко применяются в лабораторной практике для создания небольших (до 0,01—0,03 Т) однородных полей.

Индукция магнитного поля в центре тонких катушек Гельмгольца может быть вычислена по формуле

$$B = \mu_0 \left(\frac{2}{\sqrt{5}} \right)^3 \frac{IN}{R}, \quad (1)$$

где N — общее число витков двух катушек, I — ток, текущий через катушки, R — средний радиус катушек.

Если намотать провод на цилиндрический каркас, то получится устройство, называемое *соленоидом*. Ток на оси длинного соленоида (сравнительно с его диаметром) вычисляется по формуле

$$B = 0,5\mu_0 nI (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (2)$$

где n — число витков на единицу длины соленоида, I — ток, протекающий по соленоиду, α_1 и α_2 — углы, под которыми видны концы соленоида из точки на его оси, к которой относится величина B . В случае достаточно длинного соленоида, когда углы α_1 и α_2 близки к нулю, индукцию поля в середине соленоида можно вычислить по формуле

$$B = \mu_0 nI. \quad (3)$$

Магнитное поле, будучи однородным в середине соленоида, к его

концам спадает. Простые соленоиды позволяют получать поля до 0,2 Т. Соленоиды с охлаждением обмотки позволяют получать поля до 10 Т. Через такой соленоид пропускается ток в десятки килоампер, а расход воды для охлаждения составляет сотни кубометров в секунду.

Сверхпроводящие соленоиды обеспечивают получение полей с индукцией в несколько десятков тесла.

Для намагничивания ферромагнитных образцов при исследовании их магнитных свойств широко применяются устройства, называемые тороидами. В технике магнитных исследований так называют устройства, представляющие собой обмотку на тороидальном каркасе. Величина индукции магнитного поля внутри тороида вычисляется, как и для соленоида, по формуле (3).

Для создания *постоянных магнитов* используются магнитные материалы с большой остаточной индукцией $B_{ост}$ и большой коэрцитивной силой H_c . Если из такого материала изготовить кольцо (ядро) с зазором, разместить на ядре обмотку, пропустить по ней ток, достаточный для создания поля $H_{нас}$, выключить этот ток, то ядро перейдет в магнитное состояние при $H=0$ с остаточной индукцией $B_{ост}$, которая может составлять 1,0—1,5 Т. Обмотку после этого удаляют. В ядре будет существовать магнитный поток:

$$\Phi = BS, \quad (4)$$

где S — площадь поперечного сечения ядра. В силу вихревого характера магнитного поля его силовые линии должны быть непрерывны, поэтому они пронизывают и воздушный зазор. Если рассеяние магнитного потока незначительно, то

$$BS = B_z S_z, \quad (5)$$

где B_z — индукция магнитного поля в зазоре, а S_z — площадь поперечного сечения зазора. Если

$$S = S_z, \quad (6)$$

то

$$B = B_z, \quad (7)$$

и, таким образом, в зазоре существует большое магнитное поле, в которое можно помещать объекты исследования.

Достоинствами постоянных магнитов являются стабильность создаваемого ими поля и отсутствие источников питания при эксплуатации. Недостатком — трудность изменения величины поля (путем изменения величины зазора или применением магнитного шунта).

При создании полей напряженностью примерно до 2 Т издавна, в течение многих десятков лет, используют электромагниты.

Если взять ферромагнетик, например железо, замкнутой формы, намотать на него обмотку и пропустить через нее ток, то индукция внутри такого железного сердечника будет значительно больше, чем внутри обмотки без сердечника, а именно

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (8)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость железа в поле H , созданном обмоткой.

Если в сердечнике сделать узкий зазор, то индукция в нем будет незначительно отличаться от индукции в сердечнике без зазора. В этот зазор можно помещать исследуемый объект и, таким образом, воздействовать на него сильным магнитным полем.

Рассмотрим электромагнит, длина сердечника которого l , ширина зазора l_3 , обмотка имеет N витков. Пусть по обмотке течет ток I . Применим закон полного тока:

$$NI = Hl + H_3 l_3. \quad (9)$$

Здесь H — напряженность поля внутри сердечника, H_3 — напряженность поля в зазоре. Нас интересует индукция магнитного поля в зазоре B_3 , которая связана с величиной H_3 соотношением

$$B_3 = \mu_0 H_3. \quad (10)$$

Индукция в сердечнике

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (11)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Соотношение (9) перепишем в виде

$$NI = \frac{Bl}{\mu \mu_0} + \frac{B_3 l_3}{\mu_0}. \quad (12)$$

Если рассеянием магнитного потока можно пренебречь, то

$$\Phi = BS = B_3 S_3, \quad (13)$$

где S и S_3 — площади поперечного сечения сердечника и зазора соответственно. В случае

$$S = S_3 \quad (14)$$

имеем

$$B = B_3. \quad (15)$$

Тогда

$$NI = \frac{B_3}{\mu_0} \left(\frac{l}{\mu} + l_3 \right), \quad (16)$$

откуда для интересующей нас величины B_3 получается

$$B_3 = \frac{\mu_0 NI}{l/\mu + l_3}. \quad (17)$$

Если зазор настолько мал, а длина сердечника столь велика, что выполняется соотношение

$$l/\mu \gg l_3, \quad (18)$$

несмотря на то что значение μ может достигать нескольких тысяч, то, пренебрегая в знаменателе правой части соотношения

(17) вторым членом, имеем

$$B_3 = \frac{\mu\mu_0 NI}{l} = \mu\mu_0 nI, \quad (19)$$

где $n = N/l$ — число витков обмотки на единицу длины.

В таком электромагните индукция в зазоре в μ раз больше индукции пустой обмотки.

Если же

$$l/\mu \ll l_3, \quad (20)$$

то из выражения (20) следует

$$B_3 = \frac{\mu_0 NI}{l_3}, \quad (21)$$

т. е. индукция в зазоре тем больше, чем он уже. Именно такие электромагниты наиболее часто используются при исследовании магнитных свойств веществ.

Из выражений (19) и (21) может показаться, что можно получить сколь угодно большую индукцию в зазоре, увеличивая произведение NI . Это не так, потому что магнитное состояние сердечника с зазором определяется не внешним полем

$$H = nI, \quad (22)$$

а внутренним, которое меньше внешнего вследствие размагничивающего действия концов сердечника. Следует также иметь в виду сложный характер зависимости $\mu(H)$.

Все перечисленные методы предназначены для создания стационарного магнитного поля, продолжительность существования которого превышает, по крайней мере, несколько минут. К настоящему времени хорошо развиты методы создания магнитных полей, существующих малые доли секунды, — импульсных магнитных полей. Например, пропуская через соленоид импульс очень большого тока (разряд конденсатора), можно получить поле с индукцией до 100 Т. Для ряда экспериментов продолжительность существования такого поля 1 мс вполне достаточна.

Путем импульсного сжатия (с использованием взрыва) области существования магнитного поля удалось его увеличить до 1200 Т.

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

2.1. Баллистический метод

Баллистический гальванометр

Баллистический гальванометр применяется для измерения количества электричества, протекающего по цепи за промежуток времени, малый по сравнению с периодом собственных колебаний рамки, и представляет собой особую разновидность гальванометра магнитоэлектрической системы, который описан в лабораторной работе 5. Кратковременные токи имеют место в схемах при

разряде конденсатора, быстром изменении магнитного потока и т. д. Баллистический гальванометр отличается от обычного гальванометра магнитоэлектрической системы искусственным увеличением момента инерции его подвижной системы.

Движение рамки баллистического гальванометра в общем случае описывается уравнением того же типа, как и для обыкновенного гальванометра. Однако так как при измерениях баллистическим гальванометром время протекания тока $\tau \ll T$ — периода собственных колебаний рамки гальванометра (или, вернее, времени первого отброса), то можно считать, что рамка начинает свое движение только после протекания тока, и, таким образом, движение рамки в период времени $t > \tau$ описывается уравнением вида

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = 0. \quad (23)$$

Указанные особенности баллистического гальванометра обуславливают особый режим его работы и определяют его основные свойства: пропорциональность величины первого отброса рамки количеству электричества, протекшего через нее.

Не прибегая к решению дифференциального уравнения (23), найдем условия работы гальванометра упрощенным путем.

Выведем соотношение между q — количеством электричества, проходящим через обмотку рамки баллистического гальванометра (например, при разряде конденсатора через него), и α_0 — первым максимальным отклонением рамки от положения равновесия при условии отсутствия торможения ($P=0$).

Так как за время τ прохождения тока рамка не успевает выйти из положения равновесия, то уравнение движения за время $t > \tau$ может быть упрощено и записано в виде (см. (3) на с. 34)

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = BnQI, \quad (24)$$

откуда

$$BnQ \int_0^{\tau} I dt = BnQq = J \frac{d\alpha}{dt}. \quad (25)$$

Здесь q — полное количество электричества, протекшее через гальванометр. При этом рамка приобретает кинетическую энергию, равную

$$\frac{1}{2} J \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2.$$

Эта энергия затрачивается на закручивание подвеса на угол α .

Момент сил кручения при угле поворота α есть $D\alpha$; при дальнейшем закручивании на угол $d\alpha$ работа сил кручения будет $D\alpha d\alpha$. Вся работа, затраченная на отклонение рамки, будет

$$\int_0^{\alpha_0} D\alpha d\alpha = \frac{D\alpha_0^2}{2}. \quad (26)$$

Таким образом,

$$\frac{D\alpha_0^2}{2} = \frac{1}{2} J \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2, \text{ или } J \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 = D\alpha_0^2. \quad (27)$$

Возводя в квадрат уравнение (25) и деля его на уравнение (27), получаем

$$J = \frac{B^2 n^2 Q^2 q^2}{D\alpha_0^2}. \quad (28)$$

Период свободных колебаний разомкнутой рамки гальванометра

$$T_0 = 2\pi \sqrt{J/D}, \text{ или } J = T_0^2 D / 4\pi^2; \quad (29)$$

подставляя J в уравнение (28), получаем

$$\frac{T_0^2 D}{4\pi^2} = \frac{B^2 n^2 Q^2 q^2}{D\alpha_0^2}. \quad (30)$$

Отсюда

$$q = \frac{T_0}{\pi} \frac{D}{BnQ} \frac{\alpha_0}{2} = \frac{T_0}{2\pi} C\alpha_0, \text{ или } q = A\alpha_0, \quad (31)$$

где $A = CT_0/2\pi$, а C есть динамическая постоянная гальванометра. Величина A называется баллистической постоянной гальванометра.

Приведенный вывод основан на предположении, что рамка при своих колебаниях не испытывает никаких тормозящих воздействий. Практически это не совсем так, поэтому связь между q и α_0 на самом деле несколько сложнее.

Использование баллистического гальванометра для измерения индукции магнитного поля

При измерении индукции магнитного поля к рамке гальванометра подсоединяют измерительную катушку, помещаемую в область пространства, где необходимо измерить величину индукции. Пусть эта катушка содержит N витков при площади их поперечного сечения S . Пусть в момент времени t_1 индукция была B_1 , а в момент времени t_2 индукция стала B_2 . Изменение магнитного потока $\Delta\Phi$ через измерительную катушку при этом

$$\Delta\Phi = (B_2 - B_1)S = \Delta BS. \quad (32)$$

Изменение потокоцепления измерительной катушки

$$\Delta\psi = \Delta\Phi N = \Delta BSN. \quad (33)$$

В течение времени $\Delta t = t_2 - t_1$ в измерительной катушке будет наводиться ЭДС индукции:

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\psi}{\Delta t}. \quad (34)$$

В цепи измерительной катушки и рамки гальванометра потечет ток, сила которого I определяется уравнением

$$\mathcal{E} = RI + L \frac{dI}{dt}, \quad (35)$$

где L — суммарная индуктивность катушки и рамки, R — активное сопротивление этой цепи. С учетом (34) уравнение (35) принимает вид

$$- \frac{\Delta\psi}{\Delta t} = RI + L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (36)$$

Проинтегрируем его по времени в пределах от t_1 до t_2 :

$$\Delta\psi = R \int_{t_1}^{t_2} Idt + LI \Big|_{t_1}^{t_2}. \quad (37)$$

Но $I=0$ при $t=t_1$ и при $t=t_2$, поэтому

$$\Delta\psi = Rq, \quad (38)$$

откуда

$$q = \frac{\Delta\psi}{R} = \frac{\Delta BSN}{R}. \quad (39)$$

Таким образом, при изменении индукции на величину ΔB через рамку гальванометра протечет заряд q .

В соответствии с (31) рамка при этом повернется на угол α_0 :

$$\alpha_0 = \frac{SN}{AR} \Delta B. \quad (40)$$

Изменение индукции ΔB можно получить, изменив ток в системе, создающей магнитное поле (в соленоиде, тороиде, электромагните и т. п.). Обычно при измерении индукции баллистическим методом ток меняют от I до $-I$ (т. е. коммутируют) или от I до 0.

Когда изменение индукции магнитного поля нежелательно, прибегают к повороту измерительной катушки на угол π , при этом изменение магнитного потока через катушку такое же, как и при коммутировании тока от I до $-I$. Если катушку просто выдернуть из области магнитного поля, магнитный поток через нее изменится так же, как и при изменении тока от I до 0.

Баллистический метод позволяет измерять магнитные поля, индукция которых составляет примерно 10^{-4} Т и более при точности $1 \div 3\%$.

2.2. Измерение индукции магнитного поля с помощью датчиков Холла

Для измерения индукции магнитного поля применяют полупроводниковые датчики Холла. Эффект Холла состоит в следующем. Если кусок полупроводника в виде прямоугольной пластины поместить в магнитное поле с индукцией B и пропустить через него ток плотности j , то между противоположными сторонами пластины возникнет разность потенциалов U . Эта поперечная (относительно j и B) разность потенциалов пропорциональна плотности токов j , магнитной индукции B и расстоянию между соответствующими гранями пластины d :

$$U = R d j B, \quad (41)$$

где R — постоянная, зависящая от свойств полупроводника. Ее называют постоянной Холла для данного полупроводника.

Таким образом, если такую пластину поместить в область пространства, где существует магнитное поле неизвестной величины, то при постоянном токе плотности j через пластину, зная его размеры и постоянную Холла R , можно, измерив холловскую разность потенциалов, на основании соотношения (41) определить величину индукции магнитного поля B .

Применение датчиков Холла не требует для измерения индукции магнитного поля изменения его величины. Это является преимуществом холловского метода по сравнению с баллистическим. С помощью датчиков Холла измеряются поля с индукцией примерно 10^{-6} Т и выше при точности $1 \div 2\%$. Достоинством датчиков Холла являются их малые размеры, а также малая инерционность, т. е. независимость от частоты, что позволяет с их помощью измерять переменные поля, частота которых достигает 10^{10} Гц.

2.3. Измерение магнитной индукции методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР)

Все упомянутые выше методы измерения индукции магнитного поля позволяют проводить измерения с точностью не лучше 1%. Существует ряд физических явлений, которые позволяют достичь гораздо более высокой точности. Одно из таких явлений — ядерный магнитный резонанс (ЯМР). Ядро каждого атома обладает магнитным моментом $M_{\text{я}}$. Природа магнитного момента любой частицы такова, что при помещении частицы в магнитное поле с индукцией B момент прецессирует относительно этого поля с частотой, называемой частотой Лармора:

$$\Omega = \Lambda B. \quad (42)$$

Возбужденное каким-либо образом прецессионное движение магнитного момента долго продолжаться не может. Наличие тор-

мозающих сил различной природы приводит к тому, что энергия прецессирующего магнитного момента тратится на совершение работы против этих сил. В результате угол прецессии быстро уменьшается, а энергия прецессионного движения переходит в тепло. Эти потери энергии можно компенсировать, если на систему прецессирующих магнитных моментов наложить переменное поле $b = b_0 \cos \omega t$ круговой поляризации (вектор b вращается с частотой ω), перпендикулярное постоянному полю B . При этом потери энергии прецессионного движения момента M_π будут восполняться за счет энергии поля b (в случае, если вращение вектора b совпадает по фазе с прецессией вектора M_π). При изменении частоты ω этого поля b будет меняться эффективность подкачки энергии от него к прецессирующему моменту M_π , и угол прецессии будет меняться при этом резонансным образом. При совпадении частоты ω с ларморовской частотой Ω угол прецессии θ будет максимальным. Максимальным будет и отбор энергии ΔW от поля b . С помощью радиоаппаратуры этот отбор энергии легко зарегистрировать и тем самым определить ларморовскую частоту Ω прецессии магнитных моментов ядер. Частота — наиболее точно измеряемая характеристика физических явлений. Точность определения частоты Ω зависит от остроты резонансной кривой $\Delta W(\omega)$. Чем уже эта кривая, тем более точно можно определить частоту Ω . По природе самого явления сигнал ЯМР весьма узок. Но измеряемые поля, к сожалению, часто недостаточно однородны. Это приводит к тому, что разные части ампулы с веществом, от ядер которого необходимо наблюдать резонанс, оказываются в несколько различном магнитном поле. Так как сигнал наблюдается от всей ампулы, он оказывается размазанным, вследствие чего положение вершины этого сигнала определяется менее точно. Вместе с уширением сигнала имеет место уменьшение его амплитуды, т. е. неоднородность поля может оказаться столь велика, что сигнал не удастся обнаружить. Таким образом, метод ЯМР годится для измерения только достаточно однородных магнитных полей.

Величина Λ , входящая в выражение (42), представляет собой так называемое магнетомеханическое отношение (гиромантическое отношение), т. е. отношение магнитного момента рассматриваемого ядра к его механическому моменту. Это отношение измерено практически для всех ядер с очень высокой степенью точности (лучше $10^{-4}\%$).

Таким образом, неизвестная величина индукции магнитного поля B определяется по формуле

$$B = \frac{\Omega}{\Lambda}. \quad (43)$$

Метод ЯМР позволяет измерять поля, индукция которых составляет $0,02 \div 2,5$ Т с точностью $0,01 \div 0,001\%$.

3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

3.1. Катушки Гельмгольца

Катушки намотаны проводом ПЭЛ-0,31 по 3000 витков каждая (средний радиус ≈ 10 см). Конструкция катушек иллюстрируется рис. 1. Катушка K_1 — неподвижная, катушка K_2 может перемещаться с помощью штурвала $Шт1$. Измерительный датчик прибора Ш1-1 укреплен на стойке $Ст$ и также может перемещаться вдоль оси катушек при вращении штурвала $Шт2$. Датчик может перемещаться по вертикали при вращении кольца K . Для измерения величин перемещений имеются специальные шкалы.

Питание катушек осуществляется от источника УИП-2.

Сила тока через катушки измеряется прибором на лицевой панели источника при соответствующих положениях тумблеров, относящихся к этому прибору.

3.2. Соленоид

Изучаемый соленоид длиной 38,5 см содержит 2900 витков. Питание соленоида осуществляется от специального источника. О силе тока через соленоид можно судить по показаниям прибора на лицевой панели источника.

3.3. Электромагнит

Изучаемый электромагнит расположен на деревянной подставке. Его сердечник выполнен из железа «армко». Ширина зазора 12 мм. При площади поперечного сечения сердечника 6 см^2 пло-

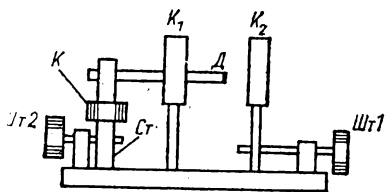


Рис. 1. Устройство катушек Гельмгольца

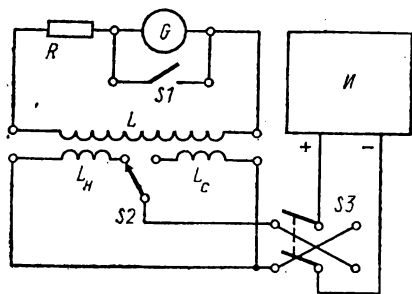


Рис. 2. Схема баллистической установки

щадь поперечного сечения зазора (площадь полюсных наконечников) 50 см^2 . Это сделано для повышения однородности поля в зазоре ценой снижения магнитной индукции в зазоре.

Обмотка электромагнита состоит из двух секций, каждая по 1000 витков провода ПЭЛ-0,41. Между собой секции соединяют-

ся последовательно и подключаются к источнику так же, как и соленоид.

Для измерения индукции в зазоре электромагнита туда введены датчики приборов Ш1-1 и Ш1-8.

3.4. Баллистическая установка

Схема баллистической установки изображена на рис. 2. Здесь G — гальванометр, S_1 — ключ для замыкания гальванометра на коротко при успокоении его подвижной части (рамки), R — магазин сопротивлений для подбора режима работы гальванометра и его чувствительности, L — измерительная катушка, L_c — изучаемый соленоид, L_n — так называемая нормальная (эталонная) катушка, S_2 — ключи для присоединения к схеме питания соленоида либо нормальной катушки, S_3 — ключ для коммутирования тока через соленоид или нормальную катушку, I — источник постоянного тока.

Угол поворота нити, на которой подвешена рамка гальванометра, регистрируется с помощью луча света, отраженного от зеркала, укрепленного на нити. Луч света создается специальным осветителем (рис. 3). С помощью объектива O на шкале $Ш$ фоку-

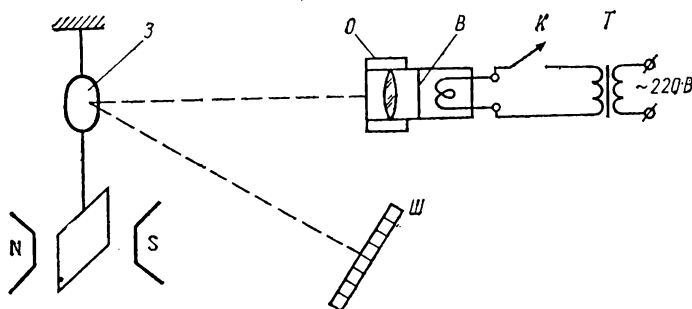


Рис. 3. Схема, иллюстрирующая действие баллистического гальванометра

сируется изображение визирной линии B . Лампочка осветителя питается от сети ~ 220 В через понижающий трансформатор T . Ее включение производится ключом K .

При повороте нити с зеркальцем на угол α изображение визирной линии сместится на величину

$$x = l \operatorname{tg} 2\alpha. \quad (44)$$

Так как расстояние l между зеркальцем и шкалой значительно больше смещения x изображения визирной линии на шкале, величину этого смещения можно считать пропорциональной углу поворота зеркальца:

$$x \approx 2l\alpha. \quad (45)$$

Баллистический гальванометр в принципе позволяет производить *абсолютные* измерения индукции магнитного поля (абсолютными называют измерения, в которых искомая величина получается в результате измерений величин другого рода). Для этого необходимо только вычислить величину коэффициента A (см. формулу (40)) по конструкционным параметрам гальванометра. Это, однако, не просто. Поэтому широкое распространение получил относительный (сравнительный) метод измерения магнитной индукции с помощью баллистического гальванометра. Он заключается в том, что, располагая эталонным (нормальным) соленоидом, попросту говоря, длинным однослойным соленоидом, поле внутри которого можно достаточно точно *вычислить*, определяют с его помощью так называемую баллистическую постоянную установки, т. е. чувствительность. Затем, зная чувствительность, можно измерять величину индукции других полей.

Для определения баллистической постоянной установки необходимо выполнить измерение индукции магнитного поля в нормальной катушке. Если через нее пропустить ток I_n и прокоммутировать его, то соответствующее изменение индукции магнитного поля в середине нормальной катушки будет

$$\Delta B_n = 2\mu_0 n I_n, \quad (46)$$

где n — число витков на единицу длины нормальной катушки.

Рамка гальванометра повернется на угол α_n (см. формулу (40))

$$\alpha_n = A \frac{SN}{R} \Delta B_n. \quad (47)$$

Соответствующее отклонение изображения визирной линии на шкале (см. формулу (45))

$$x_n = 2lA \frac{SN}{R} \Delta B_n. \quad (48)$$

Обозначим

$$\beta = \frac{2lASN}{R}, \quad (49)$$

тогда

$$\beta = \frac{x_n}{\Delta B}. \quad (50)$$

Таким образом, в правой части этой формулы стоят известные величины, что и позволяет нам вычислить значение баллистической постоянной установки β .

Если теперь ключ S_2 перекинуть в сторону изучаемого соленоида и произвести ключом S_3 коммутацию тока I_c через соленоид, то нить с зеркальцем повернется на угол

$$\alpha_c = A \frac{SN}{R} \Delta B_c, \quad (51)$$

где ΔB_c — неизвестное пока для нас изменение индукции магнитного поля соленоида. Соответствующее отклонение изображения визирной линии на шкале гальванометра x_c :

$$x_c = 2A \frac{SN}{R} \Delta B_c. \quad (52)$$

Используя выражение для баллистической постоянной (49), получаем

$$x_c = \beta \Delta B_c, \quad (53)$$

т. е. для интересующей нас величины ΔB_c имеем

$$\Delta B_c = \frac{x_c}{\beta}. \quad (54)$$

Величина индукции магнитного поля в соленоиде B_c , соответствующая току I_c , определяется формулой

$$B_c = \frac{\Delta B_c}{2} = \frac{x_c}{2\beta}. \quad (55)$$

3.5. Измеритель магнитной индукции Ш1-8

Действие этого прибора основано на измерении ЭДС Холла, возникающей на датчике, помещаемом в область пространства, где существует магнитное поле. Прибор имеет два сменных датчика, один из которых предназначен для измерения поля в зазоре электромагнита (вектор индукции измеряемого поля \mathbf{B} должен быть перпендикулярен плоскости датчика), а другой — для измерения поля в соленоиде или катушках Гельмгольца (вектор \mathbf{B} должен быть параллелен оси этого датчика). На задней стороне прибора есть специальный разъем, к которому подсоединяется тот или другой датчик.

Основной частью прибора является компенсационная схема. Эта схема, представляющая собой потенциометр, предназначена для измерения ЭДС Холла, поступающей от датчика. Компенсация осуществляется подбором одного из резисторов схемы, конструктивно выполненного в виде многодекадного магазина сопротивлений, ручки декад которого выведены на лицевую панель прибора «отсчет индукции, Т». Когда измеряемое напряжение окажется скомпенсированным, стрелка индикатора, расположенного на лицевой панели прибора, устанавливается на нуль. При этом в окошках, расположенных рядом с каждой декадой, оказываются цифры, выражающие величину индукции измеряемого магнитного поля.

На лицевой панели прибора расположен тумблер «полярность», с помощью которого можно изменить знак ЭДС Холла, поступающей от датчика в измерительную схему. Измерительная схема сконструирована так, что позволяет компенсировать измеряемое напряжение одной определенной полярности. Полярность ЭДС

Холла зависит от ориентации датчика относительно вектора магнитной индукции B измеряемого поля. Поэтому, когда, вращая ручки магазина сопротивлений, не удастся скомпенсировать ЭДС Холла, следует поменять ее знак с помощью указанного тумблера. Это удобнее, чем изменение ориентации датчика на 180° .

Ручка «коррекция» должна стоять в крайнем положении против часовой стрелки. Ею следует пользоваться лишь при измерении магнитной индукции, превышающей $0,1\text{ Т}$.

3.6. Измеритель магнитной индукции Ш1-1

Действие этого прибора заключается в регистрации ЯМР. В область пространства, где существует магнитное поле с индукцией B , помещается датчик, представляющий собой конструктивно оформленную катушку индуктивности L , внутри которой расположена ампула с веществом A (рис. 4, а). Магнитные моменты

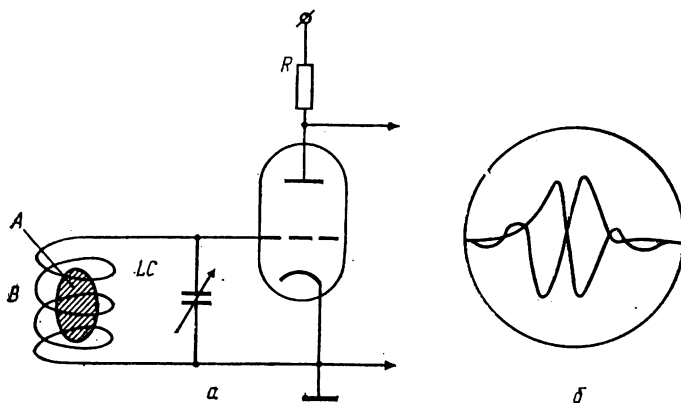


Рис. 4. Принципиальная схема регистрации ЯМР (а) и форма наблюдаемого сигнала (б)

ядер этого вещества и будут отбирать энергию высокочастотного поля, созданного катушкой. Вместе с конденсатором C эта катушка индуктивности образует резонансный контур, подключенный к сетке лампы. Все это образует так называемый автодинный генератор. Он генерирует колебания, частота которых определяется настройкой контура, осуществляемой изменением емкости конденсатора. Анодный ток лампы меняется в зависимости от уровня генерируемых колебаний. Когда частота колебаний будет удовлетворять ЯМР для магнитных моментов ядер вещества в ампуле, будет иметь место отбор энергии колебаний прецессирующими магнитными моментами. Это проявится в снижении уровня колебаний, что приведет к уменьшению анодного тока лампы. При этом изменится падение напряжения на резисторе нагрузки лам-

пы R , что будет зарегистрировано следующими каскадами прибора.

Для удобства наблюдения сигнала ЯМР измеряемое магнитное поле модулируется в небольших пределах с помощью катушки, расположенной в датчике (на рис. 4, *а* не показана). Амплитуда модуляции в несколько раз превышает протяженность сигнала ЯМР по полю. Через эту катушку пропускается небольшой ток частоты 400 Гц от специального генератора, расположенного внутри прибора. В результате условия ЯМР выполняются дважды за период модуляции (при прохождении результирующим полем области резонанса «слева направо» и «справа налево» по полю). Сигнал ЯМР наблюдается на экране осциллографической трубки, выведенной на лицевую панель прибора. Развертка луча этой трубки по горизонтали осуществляется напряжением от того же генератора модуляции. В результате на экране трубки будет наблюдаться сигнал, подобный изображенному на рис. 4, *б*. Для этого может оказаться необходимым специальной ручкой «фаза» подрегулировать разность фаз между модулирующим полем и разверткой трубки — эта разность фаз должна быть равной нулю.

Работа с прибором заключается в следующем. Датчик 1 (для измерения полей с индукцией 0,025—0,056 Т) или датчик 2 (для измерения полей с индукцией 0,056—0,13 Т) соединить со специальным кабелем, выходящим из прибора, и поместить в зазор электромагнита, используя специальную втулку для закрепления датчика. Установить ручку «обратная связь» в положение I для датчика 1 или в положение II для датчика 2. После включения прибора в сеть и прогрева в течение 10 мин установить переключатель «ФД-модуляция — генерация» в положение «модуляция» и с помощью ручки «модуляция» установить уровень модуляции величиной 15—20 делений по шкале микроамперметра, расположенного на лицевой панели прибора. Переведя переключатель в положение «генерация», установить ручкой «контроль уровня, генерация» стрелку микроамперметра на 5—10 делений. Для дальнейшей работы переключатель оставить в положении «генерация».

Переключатель «АПЧ, модуляция» должен стоять в положении «выкл.»

Плавное вращение ручки «частота», обнаружить сигнал ЯМР. Установить его в центре экрана, проверив при этом нажатием кнопки «центровка луча» установлена ли линия развертки симметрично относительно центра экрана (если нет, то произвести регулировку соответствующей ручкой). Затем произвести отсчет частоты колебаний по электронному частотомеру, подсоединенному к прибору Ш1-1 специальным кабелем.

Величину измеряемой магнитной индукции B вычислить по формуле (43), где для протонов (именно их магнитные моменты участвуют в прецессии, регистрируемой с помощью датчиков 1 и 2) $1/\lambda = 0,02349 \text{ Т/МГц}$. Частота в формуле (43) должна быть вы-

ражена в мегагерцах (на табло частотомера она выражается в килогерцах), значение индукции получается в теслах.

Кабель к частотомеру от прибора Ш1-1 подключается к разьему «вход А». При этом переключатель «Род работы» должен стоять в положении « F_A ». Переключатель «время измерения» — в положении «10 mS». Время индикации отрегулировать с помощью соответствующей ручки таким образом, чтобы оно оказалось удобным для наблюдения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Упражнение 1. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Определение баллистической постоянной установки

Собрать схему в соответствии с рис. 2. Ключ S_1 с самого начала должен быть замкнут. Ключ S_2 замкнуть на нормальную катушку. Включить источник питания, дать ему прогреться 5 мин. Установить ток через нормальную катушку $I_n = 0,3 \div 0,7$ А. Включить осветитель гальванометра, установив изображение визирной линии («зайчик») в центре шкалы, используя регулировочные приспособления. Разомкнуть ключ S_1 . Установить изображение визирной нити на нуль шкалы.

Произвести коммутацию тока I_n ключом S_3 и заметить величину отклонения x_n изображения визирной нити на шкале. Записать в рабочей тетради значения I_n и x_n . «Успокоить» подвижную часть гальванометра, замыкая ключ K_1 в момент прохождения «зайчиком» нуля шкалы.

Повторить измерения, произведя коммутацию тока I_n к первоначальному его направлению. При этом отброс x_n произойдет в другую сторону относительно нуля шкалы. Ключ S_1 держать разомкнутым только для выполнения измерений.

Выполнив несколько измерений, усреднить значения отклонений x_n .

Вычислить изменение магнитной индукции ΔB_n в нормальной катушке при коммутации тока по формуле (46). По формуле (50) вычислить баллистическую постоянную установки β (значения параметров установки, входящих в эти формулы, прилагаются к установке).

Измерение индукции поля соленоида

Измерительную катушку переместить в середину изучаемого соленоида. Ключ S_2 замкнуть на соленоид. Установить ток через соленоид $I_c = 0,3 - 0,7$ А. Произвести коммутацию тока I_c ключом S_3 и заметить величину отклонения x_c изображения визирной нити на шкале. Записать в рабочей тетради величины I_c и x_c . Выполнив несколько измерений при коммутации тока I_c в ту и другую стороны, усреднить значения отклонений x_c .

Вычислить значение магнитной индукции в соленоиде по формуле (55). Вычислить градуировочную постоянную соленоида:

$$K = \frac{B_c}{I_c}. \quad (56)$$

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО КАТУШКАМИ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Измерение индукции магнитного поля одной катушки

Подсоединить к источнику питания одну из катушек (неподвижную) и установить ток через нее $I=0,2$ А.

Включить в сеть измеритель магнитной индукции Ш1-8. Расположить датчик этого прибора по оси катушки и, перемещая его вдоль оси (шаг перемещения 1 см), снять распределение магнитной индукции $B_1(x)$ вдоль оси катушки. Результаты измерений занести в таблицу.

Измерение индукции магнитного поля, создаваемого двумя катушками

Установить вторую катушку на расстоянии R от первой. Соединить обе катушки последовательно и подключить их к источнику питания. Установить ток через катушки $I=0,2$ А.

Перемещая датчик вдоль катушек, снять распределение магнитной индукции $B(x)$ вдоль оси. Результаты измерений занести в таблицу.

Увеличив расстояние между катушками, опять снять зависимость $B(x)$.

Представить графически распределение магнитной индукции, создаваемой одной катушкой $B_1(x)$ и двумя катушками $B(x)$ (на одном листе).

Упражнение 3. ГРАДУИРОВКА ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Подсоединить обмотку электромагнита к источнику питания. Включить в сеть источник питания, измеритель Ш1-8, а также измеритель Ш1-1 и частотомер ЧЗ-44. Увеличивая ток через электромагнит от нуля до $I=0,7$ А через 0,05, для каждого значения тока измерить величину магнитной индукции в зазоре электромагнита. Результаты измерений занести в таблицу.

Когда будет достигнуто значение тока $I=0,50$ А, выполнить измерение индукции для этого значения тока также с помощью прибора Ш1-1 (ЯМР). Для этого, зная значение индукции в этой точке, измеренное с помощью прибора Ш1-8, вычислить предварительно (см. формулу (42)) ожидаемое значение частоты ЯМР. Затем, изменяя частоту колебаний ВЧ прибора Ш1-1 вблизи рассчитанной частоты, обнаружить сигнал ЯМР.

Произвести отсчет частоты Ω на табло частотомера. Вычис-

литель значение индукции магнитного поля, соответствующего установленному току I , по формуле (43).

Далее продолжить снятие градуировочной кривой с помощью прибора Ш1-8.

Градуировочную кривую электромагнита $B(I)$ представить графически, нанеся на график особым образом точку, полученную методом ЯМР.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое напряженность магнитного поля, индукция магнитного поля? В каких единицах они выражаются?
2. Вывести формулу, описывающую поле прямолинейного проводника с током, поле витка с током, поле соленоида.
3. Что такое поток магнитной индукции, потокоцепление?
4. Как индукция в зазоре электромагнита зависит от величины зазора и относительной магнитной проницаемости сердечника?
5. В чем заключается баллистический метод измерения магнитной индукции?
6. Показать, что отклонение подвижной части баллистического гальванометра пропорционально заряду, протекающему через рамку гальванометра.
7. Показать, что отклонение подвижной части баллистического гальванометра пропорционально изменению магнитной индукции при коммутировании тока в устройстве, создающем магнитное поле.
8. В чем заключается эффект Холла?
9. В чем заключается ЯМР?
10. Благодаря чему метод ЯМР измерения магнитной индукции имеет высокую точность?
11. Сравнить различные методы измерения магнитной индукции, имея в виду область измеряемых полей, точность измерения, условия измерения.
12. Нарисовать схему баллистической установки и объяснить принцип действия установки.
13. Что такое баллистическая постоянная установки и как ее определяют?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, § 10, 35, 38, 40.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1977, § 79, 80—82, 84, 91, 94, 105, 120.

Лабораторная работа 15

ИМПУЛЬСНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Цель работы — ознакомление с методом создания импульсного магнитного поля при разряде конденсатора на соленоид.

Импульсные магнитные поля находят все большее применение в технике физического эксперимента и в современной технологии. Это связано с тем, что, с одной стороны, в ряде физических задач, в частности для исследований по управляемому термоядерному синтезу, в различных разделах ядерной физики, в технике сильноточных пучков заряженных частиц и многих других наличие магнитного поля достаточно в течение довольно малого промежутка времени, обычно менее 0,1 с. С другой стороны, импульсный метод создания магнитного поля часто оказывается более простым, чем создание постоянного поля такой же напряженности, а при напряженности более 10 Тл остается пока единственно возможным.

Метод создания импульсного магнитного поля. Принципиальная схема наиболее простой, а потому часто применяемой системы создания импульсного магнитного поля изображена на рис. 1.

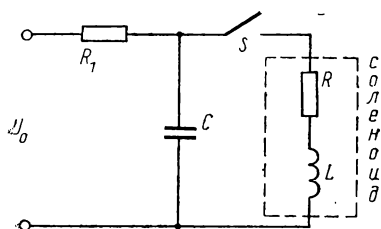


Рис. 1. Принципиальная схема создания импульсного магнитного поля

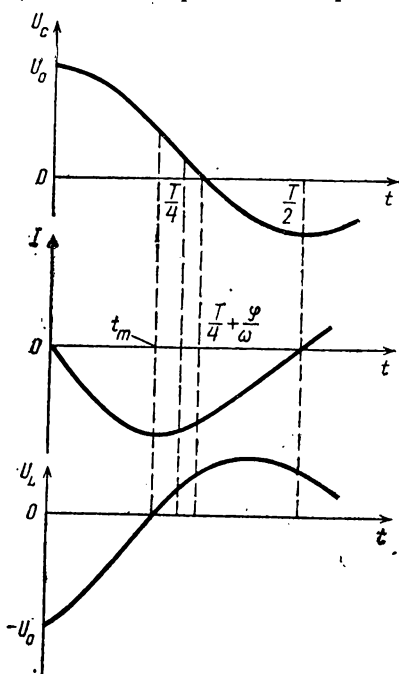


Рис. 2. Эпюры напряжений и тока в схеме создания импульсного магнитного поля

Магнитное поле создается током импульсного разряда накопительного конденсатора C через обмотку соленоида без сердечника с индуктивностью L и малым активным сопротивлением R . Конденсатор C предварительно заряжается через резистор R_1 от источника постоянного тока до напряжения U_0 . После заряда конденсатор с помощью ключа S замыкается на соленоид — при этом энергия, накопленная в конденсаторе,

$$W_c = \frac{CU_0^2}{2} \quad (1)$$

за время, приблизительно равное четверти периода колебаний T в образовавшемся LCR контуре, переходит в магнитную:

$$W_L = \frac{LI_0^2}{2}, \quad (2)$$

при этом

$$W_C \approx W_L. \quad (3)$$

Для оценки энергии W_C , которую необходимо запасти для создания магнитного поля с индукцией B_0 , будем считать поле внутри соленоида однородным, тогда

$$W_L \approx \frac{B_0^2}{2\mu_0} Sl, \quad (4)$$

где $S = \pi D^2/4$, D и l — соответственно диаметр и длина соленоида.

Для более точных расчетов необходимо учитывать неоднородность поля в соленоиде конечной длины, тогда для индукции магнитного поля в его центре имеем выражение

$$B_0 = \mu_0 n I_0 \cos \frac{D}{l}, \quad (5)$$

где n — число витков соленоида на единицу длины. Кроме того, необходим учет и потерь энергии на активном сопротивлении R . Для этого запишем уравнение собственных колебаний в образовавшемся LCR -контуре:

$$L\ddot{Q} + R\dot{Q} + \frac{Q}{C} = 0, \quad (6)$$

где Q — мгновенное значение заряда на конденсаторе. Колебания начинаются в момент времени, когда конденсатор полностью заряжен, а ток в контуре отсутствует:

$$Q(t=0) = U_0 C, \quad I(t=0) = \frac{dQ}{dt} = 0.$$

При таких начальных условиях решение уравнения (6) имеет вид

$$Q = U_0 C \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \cos(\omega t - \varphi), \quad (7)$$

откуда

$$I = -\frac{U_0}{Z} \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin \omega t, \quad (8)$$

где $\omega_0^2 = 1/LC$, $\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2$, $\omega = 2\pi/T$, $\delta = R/2L$, $Z = \sqrt{L/C}$ — волновое сопротивление контура, $\tan \varphi = \delta/\omega$. Характерные зависимости напряжения на конденсаторе $U_C = Q/C$, тока в контуре I и напряжении на индуктивности соленоида $U_L = LdI/dt$ приведены на рис. 2. Анализируя выражение (8), можно показать, что мак-

симальное значение силы тока в соленоиде $I_{\text{макс}}$ достигается в момент времени

$$t_m = \frac{T}{4} - \frac{\Phi}{\omega}. \quad (9)$$

При этом

$$I_0 = I(t_m) = \frac{U_0}{Z} e^{-\delta t_m}. \quad (10)$$

Таким образом, коэффициент преобразования энергии, накопленной в конденсаторе, в энергию магнитного поля может быть определен как

$$\eta = \frac{W_L}{W_C} = e^{-2\delta t_m}. \quad (11)$$

В случае малого затухания можно воспользоваться линейной аппроксимацией в формуле (11), и, учитывая, что при этом $\Phi/\omega \ll T/4$ и $\omega \approx \omega_0$, получаем соотношение для коэффициента преобразования энергии:

$$\eta \approx 1 - 2\delta t_m \approx 1 - 2\delta \frac{T}{4} \approx 1 - \frac{\pi}{2} \frac{R}{Z}. \quad (12)$$

Таким образом, для достаточно полного преобразования электростатической энергии накопительного конденсатора в энергию магнитного поля соленоида необходимо выполнение неравенства

$$R \ll Z. \quad (13)$$

При этом потери энергии на нагрев обмотки соленоида за время t_m незначительны. Но по мере продолжения колебаний в контуре энергия будет продолжать выделяться в виде тепла, и за время релаксации $t_p \approx 1/\delta$ практически вся энергия, запасенная в конденсаторе, перейдет в тепло. Таким образом, необходимо учитывать омический нагрев соленоида. Этот фактор накладывает ограничения на величину накопленной энергии, а следовательно, и на предельную величину магнитного поля. Если за время релаксации можно пренебречь уходом тепла, выделившегося в соленоиде, в окружающую среду, то изменение температуры обмотки соленоида ΔT определяется из уравнения теплового баланса

$$\frac{CU_0^2}{2} = cm\Delta T, \quad (14)$$

где c , m — соответственно удельная теплоемкость и масса проводящего материала соленоида.

Ограничения, связанные с нагревом соленоида, еще в большей степени сказываются в системах создания постоянного магнитного поля.

Действительно, в этом случае энергия источника постоянного

тока переходит в магнитную только при его включении за время установления тока в соленоиде. Все остальное время, пока работает источник, его мощность идет на поддержание в соленоиде тока, т. е. рассеивается на его омическом сопротивлении. Это приводит к тому, что определенное значение тока, а следовательно, и максимальное магнитное поле при разумном нагреве соленоида оказываются существенно меньше, чем в импульсных системах.

Метод измерения импульсного магнитного поля. Наиболее распространенным методом для определения напряженности меняющегося во времени магнитного поля является метод индуктивного магнитного датчика.

Датчик представляет собой катушку, помещаемую в исследуемое магнитное поле так, чтобы поперечное сечение витков было перпендикулярным направлению магнитного поля. Тогда при изменении магнитного поля в катушке будет наводиться ЭДС индукции:

$$\mathcal{E}_u = - \frac{d\Phi}{dt} = -S_d N_d \frac{dB}{dt}, \quad (15)$$

где S_d — площадь поперечного сечения катушки, N_d — число ее витков. В том случае, когда индуктивное и активное сопротивления датчика существенно меньше сопротивления внешней цепи, можно пренебречь влиянием тока, протекающего по катушке, тогда сигнал на выход датчика будет равен \mathcal{E}_u . Для удобства работы с датчиком этот сигнал необходимо преобразовать в напряжение U_d , пропорциональное B . Эту операцию выполняет интегрирующая RC -цепочка (рис. 3, R_d , C_d), напряжение на выходе которой U_d связано с входным \mathcal{E}_u следующим образом:

$$U_d = \frac{1}{R_d C_d} \int_0^t \mathcal{E}_u dt. \quad (16)$$

Это соотношение хорошо выполняется лишь при $t \ll R_d C_d$. Таким образом, постоянная времени интегрирующей цепочки $R_d C_d$ должна существенно превышать характерное время изменения магнитного поля в соленоиде $\tau = 1/\omega$, т. е. должно выполняться условие

$$\tau \ll R_d C_d.$$

Тогда, учитывая (9) и (10), получаем

$$U_d = - \frac{S_d N_d}{R_d C_d} B. \quad (17)$$

Описание экспериментальной установки. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 3. Ее монтаж выполнен на специальной панели, заключенной в защитный кожух. Соленоид L для создания магнитного поля представляет собой однослойную катушку, намотанную на каркасе диаметром $D = 3,9$ см мед-

ным проводом диаметром 1,25 мм с шагом $1/n=1,5$ мм при длине намотки 14,7 см. Накопительный конденсатор состоит из четырех секций конденсаторов, каждая из которых имеет емкость 80 мкФ. Включение каждой секции в цепь осуществляется медной перемычкой П. Коммутация конденсатора на соленоид осуществляется электронным ключом на тиристоре Т, который откры-

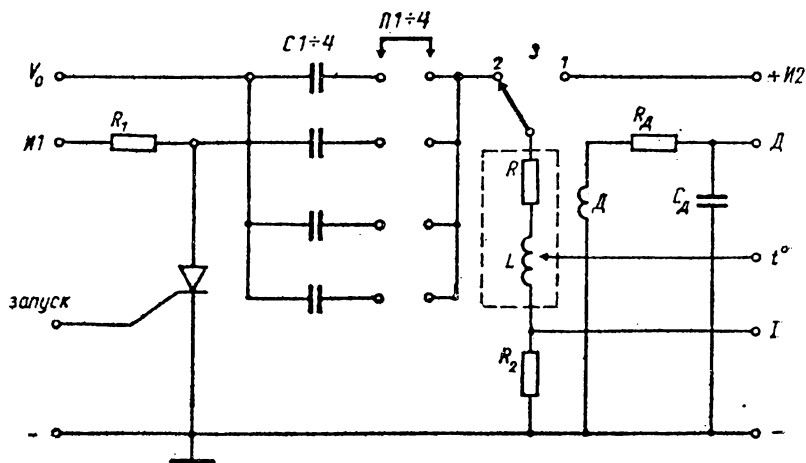


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

вается при подаче на его управляющий электрод запускающего импульса (разъем «запуск»). Когда ток в контуре падает до нуля, тиристор разрывает цепь.

Зарядка накопительного конденсатора осуществляется от источника И1 (УИП-2).

Переключение соленоида от источника И2 к накопительному конденсатору производится переключателем S.

Резистор R_1 служит для ограничения зарядного тока. В схеме предусмотрены блокировки, отключающие источник И1 от схемы при открывании верхней крышки панели и обеспечивающие разряд накопительного конденсатора независимо от состояния тиристора Т и ключа S.

Резистор $R_2=6,68$ мОм, включенный последовательно с соленоидом, служит для измерения тока в LCR-контуре.

Датчик Д предназначен для измерения напряженности магнитного поля индукционным методом (число витков $N_D=42$, площадь поперечного сечения $S_D=3,2$ см², индуктивность $L_D=5,6$ мкГн). Параметры интегрирующей цепочки: $R_D=4,8$ кОм, $C_D=1,8$ мкФ.

Для наблюдения однократных редко повторяющихся сигналов, снимаемых с резистора R_2 (гнездо I) или интегрирующей цепочки (гнездо Д), используется запоминающий осциллограф С8-9А.

Для синхронизации работы осциллографа и схемы формирования импульсного поля служит импульсный генератор Г5-54.

Постоянный ток через соленоид создается источником И2 (Б5-21). Приборы, контролирующие выходное напряжение источника и ток через соленоид, находятся на передней панели источника.

Для измерения температуры обмотки соленоида к ней подведен термодатчик t^0 , соединяемый с вольтметром (В7-27), имеющим режим измерения температуры.

Техника безопасности. Запрещается производить переключения на основной панели, предварительно не выключив источники И1 и И2.

Подготовка эксперимента

Предварительная оценка параметров системы создания импульсного магнитного поля

Рассчитать: 1) индуктивность (по формуле для длинного соленоида) и активное сопротивление соленоида, сравнить со значениями, приведенными в описании, в дальнейших расчетах использовать значения L и R , приведенные в описании; 2) постоянную времени интегрирующей цепочки $R_{д}C_{д}$ датчика магнитного поля D ; 3) чувствительность датчика D с учетом интегрирующей цепочки в соответствии с формулой (17) и выразить ее в В/Тл.

Определить (без учета затухания) при максимальной емкости накопительного конденсатора и зарядном напряжении 300 В следующие параметры: 1) максимальную энергию магнитного поля соленоида; 2) достижимый уровень индукции магнитного поля соленоида (в Тл); 3) максимальную величину тока в соленоиде; 4) период колебательного процесса T и характерное время $\tau = 1/\omega$; 5) максимальную величину сигнала с резистора R_2 и на выходе интегрирующей цепочки.

Монтаж экспериментальной установки. К схеме, изображенной на рис. 3, должны быть подсоединены источники питания И1, И2, импульсный генератор, осциллограф (на вход Y осциллографа подается сигнал либо с гнезда I , либо с гнезда D), вольтметр. Выход синхроимпульсов генератора соединить с входом системы запуска осциллографа.

Упражнение 1. СОЗДАНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ключ S поставить в положение 1, обеспечивающее прохождение через соленоид постоянного тока от источника И2.

Включить в сеть источник И2, вольтметр В7-27 в режиме измерения температуры. Снять зависимость температуры соленоида от тока через него, не допуская нагрева соленоида свыше 100°C. Интервал между отдельными измерениями из-за инерционности процесса прогрева материала соленоида должен быть не менее 3 мин.

По окончании измерений выключить источник И2 и вольтметр В7-27. Отключить их от схемы.

Рассчитать значения индукции магнитного поля B_0 , соответствующего устанавливаемым токам I_0 через соленоид, и построить графически зависимость $I^0(B_0)$.

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ LCR-КОНТУРЕ

В качестве накопительного конденсатора C использовать одну секцию конденсаторов. Для этого необходимо оставить на панели одну из четырех перемычек $П$.

Ключ S поставить в положение 2.

Включить в сеть источник И1, генератор, осциллограф. Установить необходимый режим работы этих приборов (режим указан в приложении к описанию задачи на рабочем месте). На вход Y осциллографа подать сигнал с гнезда I панели. Установить выходное напряжение источника И1 равным 100 В.

Разряжая конденсатор C через соленоид (это происходит при нажатии кнопки ручного запуска генератора), получить осциллограмму тока в контуре. Зарисовать эту осциллограмму.

Измерить по осциллограмме значение интервала времени t_m , в конце которого ток достигает максимального значения, и сравнить его с рассчитанным по формуле (9).

Упражнение 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНОГО ТОКА В СОЛЕНОИДЕ I_0 ОТ ЗАРЯДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ U_0

Используя схему предыдущего упражнения, снять зависимость тока I_0 от напряжения U_0 . Сила тока I_0 определяется с помощью осциллографа с использованием в расчете величины сопротивления резистора R_2 . Напряжение U_0 меняется в пределах $0 \div 300$ В с помощью регулировок источника И1.

Построить график теоретической зависимости $I_0(U_0)$ в соответствии с формулой (10) и нанести на него экспериментальные точки.

Упражнение 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ЗАРЯДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ U_0

На вход Y осциллографа подать сигнал с гнезда D панели. Снять зависимость индукции B от напряжения U_0 . Индукция поля B определяется с помощью осциллографа с использованием в расчете вычисленной заранее чувствительности датчика D . Напряжение U_0 меняется в пределах $0 \div 300$ В.

Построить график теоретической зависимости $B(U_0)$, используя формулы (5), (10).

Нанести на график экспериментальные точки.

Упражнение 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ B_0 ОТ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТУРА Z

Провести измерения при зарядном напряжении $U_0=300$ В последовательно с одной, двумя, тремя и четырьмя секциями накопительного конденсатора. Подключение секций осуществляется с помощью переключателя Π .

Построить теоретическую зависимость $B(1/Z)$ в соответствии с формулами (5), (10). Нанести на график экспериментально полученные точки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается принцип создания импульсного магнитного поля?
2. Записать выражения для плотности энергии магнитного поля, энергии тока в длинном соленоиде.
3. Вывести формулу, выражающую напряженность магнитного поля, создаваемого бесконечно длинным соленоидом.
4. Записать уравнение затухающих колебаний и его общее решение. Как выглядит такое уравнение для LCR -контура?
5. Как волновое сопротивление контура выражается через его параметры?
6. Каково соотношение между волновым и активным сопротивлениями контура при почти полной передаче энергии из конденсатора в соленоид?
7. Нарисовать эпюры напряжений и тока для собственных колебаний в последовательном LCR -контуре. Нарисовать соответствующую векторную диаграмму.
8. Как измеряется напряженность импульсного магнитного поля?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, § 35, 47, с. 340.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1977, § 81, 96, 97.

Лабораторная работа 16

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Цель работы — изучение намагничивания и перемагничивания ферромагнетика.

Оборудование экспериментальной установки состоит из специальной панели, на которой размещен образец и смонтирована схема, состоящая из обмоток образца, резисторов и переключателей.

Образец представляет собой торойд сечением 10 мм^2 и средним радиусом 15 мм . Индукция насыщения (материала образца) $0,15 \text{ Тл}$, коэрцитивная сила 80 А/м , максимальная относительная

магнитная проницаемость 3000. На образце намотаны три обмотки: две по 500 витков и одна 15 витков.

Для измерений на постоянном токе имеются источник питания ($I=0 \div 1000$ мА); миллиамперметр с пределом измерения 100 мА; для измерений на переменном токе — генератор ($f=200 \div 300$ Гц, $U=15$ В, $R_{\text{вых}}=50$ Ом). Осциллограф имеет чувствительность по каналу Y не хуже 2 мВ/см, по каналу X — 10 мВ/см.

Для измерения индукции в образце баллистическим методом используется микровеберметр с чувствительностью не хуже 10 мкВб.

Методы измерений

а) Осциллографический метод измерений характеристик ферромагнетика основан на наблюдении петли гистерезиса на экране осциллографа. Рассмотрим схему, изображенную на рис. 1. Пусть через обмотку L_1 образца течет переменный ток. Резистор R_2

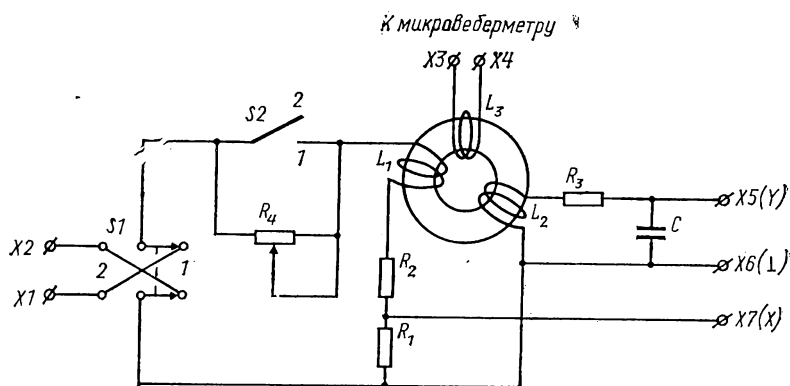


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ограничивает величину тока, с резистора R_1 на вход X осциллографа снимается напряжение, пропорциональное этому току. При изменении тока меняется магнитное состояние образца, т. е. индукция $B_{\text{обр}}$, меняется и магнитный поток, пронизывающий образец. Если площадь поперечного сечения образца $S_{\text{обр}}$, то изменение магнитного потока

$$d\Phi = S_{\text{обр}} dB. \quad (1)$$

Пусть обмотка L_2 имеет N_2 витков и намотана на образец вплотную, без зазора, т. е. площадь ее поперечного сечения такая же, как и у образца. Изменение потокоцепления обмотки L_2

$$d\psi = N_2 d\Phi = N_2 S_{\text{обр}} dB. \quad (2)$$

На зажимах обмотки L_2 развивается ЭДС индукции:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\psi}{dt}. \quad (3)$$

Напряжение на конденсаторе C

$$U_C = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int I dt = \frac{1}{C} \int \frac{\mathcal{E} - U_C}{R_3} dt, \quad (4)$$

здесь Q — мгновенный заряд на конденсаторе, I — ток в цепи заряда конденсатора.

Параметры R_3 и C подобраны таким образом, что имеет место соотношение $1/\omega C \ll R_3$, т. е. $\mathcal{E} \gg U_C$, поэтому

$$U_C = - \frac{1}{R_3 C} \int \mathcal{E} dt = - \frac{1}{R_3 C} \int d\psi = \frac{N_3 S_{\text{обп}}}{R_3 C} \int dB = \frac{N_3 S_{\text{обп}}}{R_3 C} (B_2 - B_1). \quad (5)$$

Таким образом, напряжение на конденсаторе C пропорционально изменению индукции образца. Эта связь и позволяет при пропускании через обмотку L_1 переменного тока наблюдать на экране осциллографа зависимость $B(H)$, т. е. петлю гистерезиса образца.

б) Баллистический метод основан на измерении изменения магнитного потока через образец при переходе образца из одного магнитного состояния в другое. Пусть на образце помимо намагничивающей обмотки L_1 и обмотки, предназначенной для осциллографирования, есть еще одна, назовем ее баллистической, L_3 с числом витков N_3 . Она подсоединяется к рамке специального прибора. Эта рамка, имеющая N_p витков площадью S_p , подвешена на тонкой нити в однородном магнитном поле с индукцией B_p , создаваемом специальным магнитом, расположенным внутри прибора.

Если изменить ток в намагничивающей обмотке, то изменится магнитное состояние образца — изменится его индукция от величины B_1 до величины B_2 . Соответствующее изменение магнитного потока через поперечное сечение образца площадью $S_{\text{обп}}$:

$$d\Phi = (B_2 - B_1) S_{\text{обп}} = dB \cdot S_{\text{обп}}. \quad (6)$$

Изменение потокосцепления обмотки L_3 :

$$d\psi = d\Phi \cdot N_3 = dB S_{\text{обп}} N_3. \quad (7)$$

При этом в обмотке L_3 будет наводиться ЭДС

$$\mathcal{E}_{L_3} = - \frac{d\psi}{dt} = - \frac{dB S_{\text{обп}} N_3}{dt}. \quad (8)$$

В цепи обмотки L_3 и рамки потечет индукционный ток:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{L_3}}{R} = - \frac{d\psi}{R dt} = - \frac{dB S_{\text{обп}} N_3}{R dt}, \quad (9)$$

где R — сопротивление этой цепи. Через рамку пройдет заряд

$$Q = \int I dt = \frac{1}{R} \int d\psi = \frac{\Delta\psi}{R} = \frac{S_{\text{обп}} N_3 \Delta B}{R}. \quad (10)$$

Следовательно, как показано ранее (см. формулу (40) в описании лабораторной работы 14), в баллистическом режиме гальванометра отброс α_0 , пропорциональный заряду Q , прошедшему через рамку, будет пропорционален и изменению индукции ΔB в образце сечением S с обмоткой из N_3 витков:

$$\alpha_0 = \frac{S_{\text{обр}} N_3}{AR} \Delta B. \quad (11)$$

В настоящей лабораторной работе в качестве основного измерительного прибора используется микровеберметр, работающий в баллистическом режиме. Его конструктивные параметры подобраны так, что его показание β равно изменению потокоцепления $\Delta\psi$:

$$\beta = \Delta\psi = S_{\text{обр}} N_3 \Delta B. \quad (12)$$

Таким образом,

$$\Delta B = \frac{\beta}{S_{\text{обр}} N_3}. \quad (13)$$

Это соотношение позволяет вычислить величину изменения магнитной индукции в образце ΔB при изменении тока в намагничивающей обмотке.

У п р а ж н е н и е 1. НАБЛЮДЕНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА НА ЭКРАНЕ ОСЦИЛЛОГРАФА

Подготовка эксперимента. Подключить выход генератора к гнездам $X1, X2$ монтажной панели (см. рис. 1), гнезда $X5, X6, X7$ соединить с входами Y и X осциллографа.

Ключ S_2 поставить в положение 1.

Включить приборы. После их прогрева установить частоту напряжения генератора примерно равной 300 Гц, а величину этого напряжения и режим работы осциллографа — такими, чтобы на экране наблюдалась петля гистерезиса.

Выполнение эксперимента. Изменяя величину выходного напряжения генератора, наблюдать соответствующие изменения формы петли гистерезиса.

Установить на экране осциллографа петлю гистерезиса, близкую к предельной, зарисовать ее. Записать параметры элементов схемы, данные в приложении. Измерить и записать величины отрезков OA, OB, OC и OD наблюдаемой петли (рис. 2, а).

Обработка результатов эксперимента

Отрезок OA несет информацию о коэрцитивной силе H_c образца:

$$H_c = n_1 I_1 = n_1 \frac{U_1}{R_1} = n_1 \frac{(OA) C_x}{R_1}, \quad (14)$$

где n_1 — число витков на единицу длины обмотки L_1 ; I_1 и U_1 — соответственно ток в обмотке L_1 и напряжение, действующее на резисторе R_1 , когда магнитная индукция образца обращается в нуль

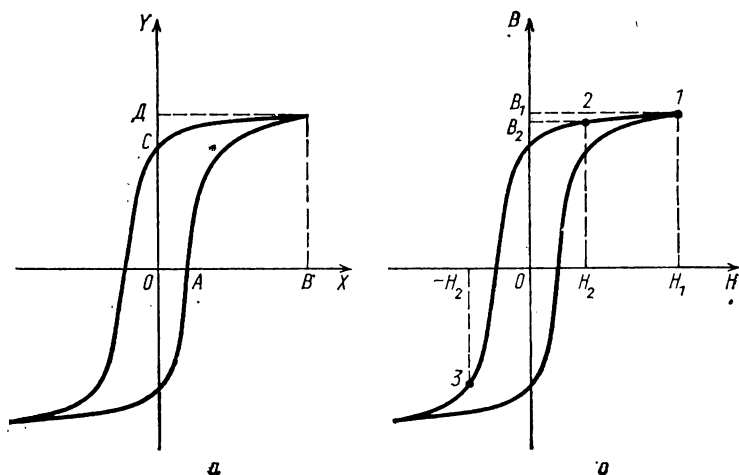


Рис. 2. Петля гистерезиса ферромагнетика

(точка A на петле гистерезиса); C_x — чувствительность осциллографа по каналу X .

Отрезок OC несет информацию об остаточной индукции образца $B_{ост}$:

$$B_{ост} = \frac{R_3 C U_c}{N_2 S_{обр}} = \frac{R_3 C (OC) C_y}{N_2 S_{обр}}. \quad (15)$$

Отрезок OD несет информацию об индукции насыщения B_S :

$$B_S = \frac{R_3 C (OD) C_y}{N_2 S_{обр}}. \quad (16)$$

Отрезок OB несет информацию о величине магнитного поля, в котором измерена индукция насыщения:

$$H_S = \frac{n_1 (OB) C_x}{R_1}. \quad (17)$$

Вычислить величины H_c , $B_{ост}$, B_S , H_S .

Упражнение 2. СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ОБРАЗЦА ПРИ ОСЦИЛЛОГРАФИРОВАНИИ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Размагнитить образец, т. е. уменьшить напряжение генератора до нуля. При этом петля гистерезиса на экране осциллографа превращается почти в точку, соответствующую $H \approx 0$ и $B \approx 0$.

Далее следует увеличивать амплитуду переменного напряжения небольшими ступенями и для каждой из них регистрировать величины отрезков $ОВ$ и $ОД$ (рис. 2, а). Теперь эти отрезки, соответствующие не предельной петле гистерезиса, как в предыдущем упражнении, а частным петлям гистерезиса, несут информацию о точках на кривой намагничивания образца $B(H)$. Результаты измерений оформить в виде таблицы.

После окончания измерений образец размагнитить, т. е. уменьшить переменный ток через обмотку L_1 до минимального. Вычислить величины H и B для каждой точки, а также относительную магнитную проницаемость $\mu_r = B/\mu_0 H$ и построить графики $B(H)$ и $\mu_r(H)$.

Упражнение 3. СНЯТИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Подготовка эксперимента. К гнездам 1, 2 подключить источник постоянного тока. Для измерения силы тока в эту цепь включается миллиамперметр. К гнездам 3, 4 подключается вход микровеберметра. Осциллограф можно оставить подключенным к схеме. Переключатель S_2 на монтажной панели должен находиться в замкнутом положении (1).

Подготовить таблицу для занесения в нее следующих величин: тока I через намагничивающую обмотку образца; напряженности магнитного поля H , соответствующего току I ; изменения потоко-сцепления $\Delta\Phi$, возникающего при коммутации тока I (отсчет по индикатору микровеберметра); индукции образца B , соответствующей полю H , в котором находится образец; магнитной проницаемости μ , также соответствующей полю H .

Выполнение измерений. Установить ток I в намагничивающей цепи 2—3 мА. Занести его значение в таблицу.

Ключом S_1 несколько раз прокоммутировать ток в намагничивающей цепи — этим стабилизируется магнитное состояние образца, соответствующее точке на кривой намагничивания.

Нажав кнопку «пуск» микровеберметра, затем с интервалом примерно 0,5 с перевести ключ S_1 в противоположное положение. Произвести отсчет на индикаторе микровеберметра ($\Delta\Phi$). Повторить эту процедуру несколько раз. Занести в таблицу усредненное значение $\Delta\Phi$.

Увеличив ток, выполнить измерение соответствующей ему величины $\Delta\Phi$. Выполнить измерения до значения тока, обеспечивающего насыщение образца ($I = 100$ мА).

При установлении каждого нового значения тока его следует только увеличивать, иначе, в результате изменения магнитного состояния по частным циклам, можно сойти с кривой намагничивания. В связи с этим необязательно устанавливать значения тока в целых единицах силы тока — пусть оно окажется нецелым, например 7,3 мА и т. п. (лишь бы не уменьшать ток, подстраивая его к целым значениям).

Обработка результатов эксперимента. Вычислить напряженность магнитного поля для каждого значения тока:

$$H = n_1 I, \quad (18)$$

где n_1 — число витков намагничивающей обмотки на единицу длины (метр).

Вычислить величину магнитной индукции образца для каждого значения намагничивающего поля:

$$B = \frac{\Delta\psi}{2N_3 S_{\text{обр}}}, \quad (19)$$

где $\Delta\psi$ — отсчет по микровеберметру (в веберах!).

Вычислить относительную магнитную проницаемость μ_r для каждого значения намагничивающего поля:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (20)$$

Результаты вычислений занести в таблицу, а зависимости $B(H)$ и $\mu_r(H)$ представить графически.

Определить путем экстраполяции величину начальной магнитной проницаемости $\mu_{r\text{нач}}$ (при $H=0$), а также величину максимальной магнитной проницаемости $\mu_{r\text{макс}}$ исследуемого образца.

Упражнение 4. СНЯТИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Методика измерений. Петля гистерезиса строится по экспериментальным точкам (B, H) , которые получаются при ступенчатом изменении магнитного поля. Пусть исходному магнитному состоянию образца соответствует точка 1 (насыщение) (рис. 2, б). Если поле изменить скачком до значения H_2 , то индукция в образце изменится от значения B_1 до значения B_2 , что вызовет изменение потокосцепления $\Delta\psi_{1,2}$ в измерительной обмотке образца L_3 . Если затем изменить поле на противоположное, т. е. перейти от H_2 к $-H_2$, то образец окажется в магнитном состоянии с индукцией B_3 (точка 3 на рис. 2, б). Соответствующее изменение потокосцепления будет $\Delta\psi_{2,3}$. И наконец, если магнитное поле изменить от значения $-H_2$ до значения $-H_1$, то образец перейдет в насыщенное состояние с индукцией $B_4 = -B_1$. Соответствующее изменение потокосцепления будет $\Delta\psi_{3,4}$. Измерив величины $\Delta\psi_{1,2}$, $\Delta\psi_{2,3}$, $\Delta\psi_{3,4}$, можно на основе формулы (19), вычислить значения B_1, B_2, B_3 :

$$B_1 = \frac{\Delta\psi_{12} + \Delta\psi_{23} + \Delta\psi_{34}}{2} \cdot \frac{1}{N_3 S_{\text{обр}}}, \quad (21)$$

$$B_2 = B_1 - \frac{\Delta\psi_{12}}{N_3 S_{\text{обр}}}, \quad (22)$$

$$B_3 = B_2 - \frac{\Delta\psi_{23}}{N_2 S_{\text{обр}}}. \quad (23)$$

Установить ключ S_1 в положение 2, а ключ S_2 — в положение 1. Установить ток через намагничивающую обмотку $I=100$ мА. При этом образец находится в насыщенном состоянии 1 (см. рис. 2, б). Обратите внимание, что светящаяся точка на экране осциллографа при изменении тока движется вдоль горизонтальной оси, т. е. ее смещение пропорционально току (и магнитному полю). Таким образом, положение этой точки на горизонтальной оси экрана осциллографа позволяет судить о том, в каком магнитном поле находится образец (если в центре, значит $I=0$ ($H=0$); при $I=100$ мА точка находится у правого края экрана, при $I=-100$ мА — у левого).

Подготовить таблицу для занесения в нее величин I_2 (от 90 до 10 мА), $\Delta\psi_{12}$, $\Delta\psi_{23}$, $\Delta\psi_{34}$, а также таблицу для величин I_1 (от 100 до -100 мА), H , B .

Выполнение измерений

Подготовительный цикл. Перевести ключ S_2 в положение 2, при этом в цепи намагничивающего тока оказывается переменный резистор R_4 . Вращая ручку этого резистора, установить ток $I_2 < I_1$, например $I_2=90$ мА (светящаяся точка на экране осциллографа при этом соответственно сместится). Образец при этом окажется в состоянии 2.

Последовательно перевести: ключ S_1 в положение 1 (при этом образец окажется в состоянии 3); ключ S_2 в положение 1 (при этом образец окажется в состоянии 4); ключ S_1 в положение 2 (при этом образец вернется в состояние 1). В ходе всех этих переключений контролируйте положение светящейся точки на экране осциллографа.

Измерительный цикл. Нажать кнопку «пуск» микровеберметра и с задержкой 0,5 с перевести ключ S_2 в положение 2. Отсчет величины $\Delta\psi_{12}$ по индикатору микровеберметра занести в таблицу.

Нажать кнопку «пуск» и с задержкой 0,5 с перевести ключ S_1 в положение 1. Отсчет величины $\Delta\psi_{23}$ по индикатору занести в таблицу.

Нажать кнопку «пуск» и с задержкой 0,5 с перевести ключ S_2 в положение 1. Отсчет $\Delta\psi_{34}$ по индикатору микровеберметра занести в таблицу.

Перевести ключ S_1 в положение 2 — образец опять окажется в состоянии 1 (см. рис. 2, б).

Затем выполнить подготовительный цикл, в ходе которого установить новое значение тока I_2 , например $I_2=80$ мА, и выполнить измерительный цикл.

Выполнить измерения до минимального значения тока ($I_2=5-10$ мА).

Обработка результатов эксперимента. Вычислить значения напряженности магнитного поля для тока I_1 и для каждого значения тока I_2 (по формуле (18)), занеся их в таблицу.

Вычислить величину магнитной индукции образца B_1 , соответ-

ствующую току I_1 , а также B_2 и B_3 для каждого значения тока I_2 по формулам (21)—(23).

Результаты вычислений занести в таблицы.

Зависимость $B(H)$ изобразить графически. Таким образом, будет получена часть петли гистерезиса, соответствующая намагничиванию образца в одном направлении. Другая часть петли, имеющая симметричный характер, может быть построена без дополнительных измерений по уже имеющимся данным.

По петле гистерезиса определить величины H_c , $B_{ост}$, B_S и H_S и сравнить их с тем, что было получено в упражнении 1.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем ферромагнетики отличаются от других веществ?
2. Какие вещества являются ферромагнитными?
3. Почему магнитная индукция в ферромагнетиках, помещенных в магнитное поле, значительно превышает индукцию этого поля?
4. Что такое домен? Почему ферромагнетик разбивается на домены?
5. Как происходит намагничивание ферромагнетиков?
6. Что такое петля гистерезиса? Какие причины ее вызывают?
7. Каким образом на намагничивание ферромагнетика сказывается его форма?
8. В чем заключается осциллографический метод исследования ферромагнетиков?
9. В чем заключается баллистический метод исследования ферромагнетиков?
10. Каким образом можно размагнитить образец?
11. Почему при снятии кривой намагничивания поле рекомендуется только увеличивать (или коммутировать), но не уменьшать?
12. Чем вызвана необходимость при снятии петли гистерезиса баллистическим методом после снятия каждой новой точки «прогонять» образец по петле гистерезиса?
13. Что выражает относительная магнитная проницаемость μ_r ?
14. Как определяется величина магнитного поля, в котором находится образец, при осциллографическом (а также при баллистическом) методе исследований?
15. Как определяется величина магнитной индукции образца при осциллографическом (а также при баллистическом) методе исследований?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, с. 298—302.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985. Гл. XI.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. М.: Наука, 1977, § 58, 61, 74, 75, 79.

Лабораторная работа 17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Целью настоящей работы являются изучение поведения намагниченности ферромагнетика в зависимости от температуры и определение его температуры Кюри.

Оборудование экспериментальной установки состоит из печи ($t_{\text{макс}} = 150^\circ\text{C}$), генератора ($f \approx 300$ Гц, $U = 15$ В), осциллографа (чувствительность по каналу $Y - 2$ мВ/мм, по каналу $X - 10$ мВ/мм), термопары медь—константан, милливольтметра (чувствительность 0,01 мВ) и образца (индукция насыщения при комнатной температуре $B = 1,5$ Т, коэрцитивная сила 100 А/м, точка Кюри ниже 150°C ; намагничивающая и измерительная обмотки имеют по 500 витков).

Методика исследования температурной зависимости намагниченности и описание экспериментальной установки

Метод измерений, применяемый в данной работе, основан на наблюдении петли магнитного гистерезиса, характерного для ферромагнетиков. У парамагнитных веществ магнитный гистерезис отсутствует. Поэтому температура перехода T_c из ферромагнитного состояния в парамагнитное определяется по исчезновению петли гистерезиса при нагревании образца.

Для наблюдения петли гистерезиса используется электронный осциллограф. Ферромагнитный образец располагается в нагревательной печи, температура его измеряется термопарой.

Исследуемый образец представляет собой ферромагнитный сплав с относительно невысокой температурой Кюри ($T_c < 150^\circ\text{C}$). Основная компонента сплава — Ni (72—73%), добавки Cu (14%), Mo, W, V (по 3%), Cr (2%) и остальное Fe. Это так называемый магнитомягкий материал, характеризующийся малым значением коэрцитивной силы. Образец изготовлен в виде тороида прямоугольного сечения. Размеры тороида приведены на установке.

Принципиальная электрическая схема установки показана на рис. 1.

На ферромагнитный образец тороидальной формы намотаны (по всей длине тороида, вплотную к образцу) две обмотки: первичная L_1 (намагничивающая) с числом витков N_1 и вторичная L_2 (измерительная) с числом витков N_2 . На обмотку L_1 через резистор с известным сопротивлением R_1 подается переменное напряжение звуковой частоты $U_{\text{ген}}$ от генератора. Концы вторичной обмотки L_2 подсоединены к интегрирующей цепочке (ячейке)

R_2C . На вход X осциллографа подается напряжение с резистора R_1 , на вход Y — с емкости C интегрирующей ячейки. Образец расположен внутри нагревательной печи (изображена пунктиром). В центре образца помещена термопара (T), концы которой подсоединены к милливольтметру (мВ).

Принцип осциллографического метода наблюдения петли гистерезиса, а также измерения величин магнитной напряженности

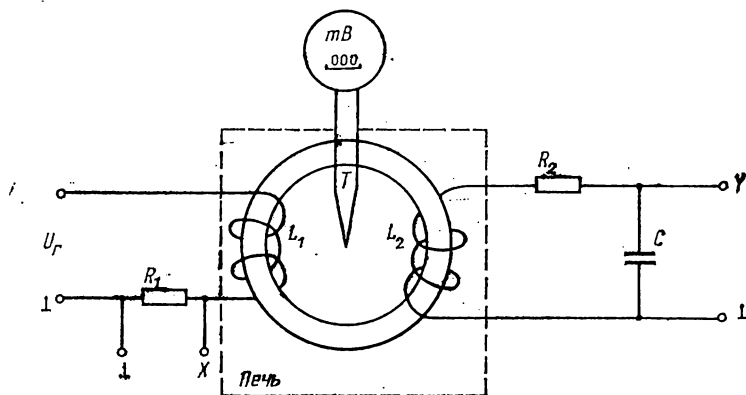


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

поля H и магнитной индукции B образца изложены в описании лабораторной работы 16.

Печь для нагрева образца позволяет получать внутри температуру до $150\text{—}160^\circ\text{C}$. Скорость нагрева можно регулировать реостатом, ручка которого выведена на боковую поверхность печи. Образец расположен внутри печи; медь-константовая термопара помещена в центре образца. Концы обмоток катушек L_1 и L_2 , а также концы термопары выведены наружу через верхнюю часть печи.

Поскольку нагревание печи происходит медленно, можно считать, что термопара и образец с достаточной для данной задачи точностью имеют в один и тот же момент времени одинаковую температуру. Температура образца определяется по показаниям милливольтметра, к которому подключены концы термопары. Градуировка термопары проведена с милливольтметром. Градуировочная кривая приложена к установке.

Упражнение 1. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦА ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Собрать схему, изображенную на рис. 1. К соответствующим гнездам панели подключить генератор, обмотки L_1 и L_2 образца, осциллограф. Проверить, подключена ли термопара к вольтметру, (отсоединять концы термопары от прибора не рекомендуется).

Осциллограф установить в режим работы с разверткой от внешнего источника, т. е. подать на вход «Х» напряжение с резистора R_1 . Напряжение, подаваемое на схему от генератора, должно иметь частоту $200 \div 300$ Гц.

Включить приборы в сеть. После прогрева установить режим их работы таким, чтобы на экране осциллографа наблюдалась предельная петля гистерезиса, соответствующая техническому насыщению.

Измерить отрезки (в делениях) OA , OB , OC и OD (рис. 2 в описании лабораторной работы 16), соответствующие коэрцитивной силе H_c , насыщающему полю H_s , остаточной индукции B_r и индукции насыщения образца B_s . Рассчитать значения этих магнитных характеристик, используя формулы (14)—(17) из описания лабораторной работы 16.

Упражнение 2. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНДУКЦИИ НАСЫЩЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНОГО ОБРАЗЦА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧКИ КЮРИ

В настоящем упражнении ведется наблюдение за петлей гистерезиса образца в процессе нагревания. Прежде чем приступить к температурным измерениям, необходимо убедиться, что термопара расположена в центре образца (если нет, обратиться к лаборанту). Установить реостат печи в среднее положение.

Включить печь и измерить зависимость величины OD ($OD \sim B_s$) от температуры. Результаты измерений занести в таблицу.

Измерения следует начать с комнатной температуры и вести их с интервалами $8-10^\circ$ до 100°C , а выше — с интервалами $3-5^\circ$; измерения проводятся до тех пор, пока петля не пропадет. По окончании измерений ввести полностью реостат печи и выключить печь тумблером. Открыть дверцу (для более быстрого охлаждения образца) и пронаблюдать восстановление петли гистерезиса. Восстановившуюся петлю зарисовать.

Построить график зависимости полученных значений B_s от температуры T и, экстраполируя кривую $B_s = f(T)$ к значениям T , при которых $B=0$, определить точку Кюри T_c .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие вещества называют ферромагнитными?
2. Почему с повышением температуры ферромагнетика его спонтанная намагниченность падает?
3. Что такое температура Кюри?
4. Каким образом на экране осциллографа можно получить изображение петли гистерезиса?
5. Каким образом осуществляются нагрев образца и измерение его температуры?
6. Каким образом рассчитываются величины магнитного поля,

действующего на образец, и соответствующие величины магнитной индукции образца?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985. Гл. XI.

Лабораторная работа 18

ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Изучается зависимость ЭДС Холла в полупроводниковом образце от величины магнитного поля, определяются электропроводность образца, концентрация носителей тока и некоторые другие параметры.

Постановка задачи. Экспериментальное исследование эффекта Холла является эффективным методом изучения движения электрических зарядов, обуславливающих электрический ток в проводниках как с металлической, так и полупроводниковой проводимостью. Эффект Холла несет информацию о таких важнейших характеристиках проводников, как концентрация носителей тока, и знак носителей тока. В полупроводниках он позволяет установить принадлежность полупроводников к n -типу (с электронной проводимостью) или к p -типу (с дырочной проводимостью), благодаря чему является одним из важнейших методов исследования полупроводников.

Эффект Холла заключается в следующем. Пусть образец имеет форму прямоугольной пластинки длиной l , шириной d , толщиной b (рис. 1). Если вдоль длины образца (направление оси y) пропустить электрический ток I , перпендикулярно плоскости пластинки (направление оси x) приложить магнитное поле B , то в направлении, перпендикулярном I и B (направление оси z), возникнет электрическое поле, называемое полем Холла, с напряженностью $E_{\text{Холл}}$. На практике, как правило, поле Холла характеризуют разностью потенциалов, которую измеряют между симметричными точками C и D на боковых поверхностях образца. Эта разность потенциалов называется холловской разностью потенциалов $U_{\text{Холл}}$ или ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$.

В классической теории проводимости эффект Холла объясняется тем, что в магнитном поле на движущиеся электрические за-

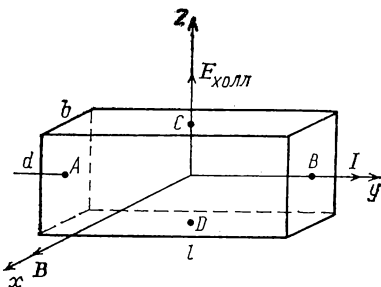


Рис. 1. Ориентация тока, индукции магнитного поля и напряженности холловского поля в полупроводниковой пластине

ряды действует сила Лоренца, величина и направление которой определяются векторным уравнением

$$\mathbf{F} = e[\mathbf{v}\mathbf{B}], \quad (1)$$

где \mathbf{B} — индукция магнитного поля, \mathbf{v} — скорость движения зарядов, e — заряд носителей тока с учетом знака, « $+e$ » — для дырочной проводимости, « $-e$ » — для электронной проводимости.

Электрическое поле Холла:

$$E_{\text{Холл}} = vB \quad (2)$$

связано с ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$, или с холловской разностью потенциалов $U_{\text{Холл}}$, следующим образом:

$$\mathcal{E}_{\text{Холл}} = U_{\text{Холл}} = E_{\text{Холл}}d = vBd. \quad (3)$$

Так как сила тока, протекающего через единицу поверхности образца, т. е. плотность тока, равна

$$j = env, \quad (4)$$

где n — число носителей тока в единице объема образца (концентрация носителей тока), то сила тока

$$I = jbd = envbd, \quad (5)$$

что позволяет записать

$$v = \frac{I}{enbd} \quad (6)$$

и

$$\mathcal{E}_{\text{Холл}} = \frac{IB}{enb}. \quad (7)$$

Таким образом, ЭДС Холла пропорциональна силе тока через образец I и обратно пропорциональна толщине образца b .

Экспериментальное определение ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$ проводят на образце с заданной толщиной b при фиксированном токе через образец I . При этом полученное значение ЭДС Холла, как принято, рассчитывают на единицу толщины образца и единицу силы тока, т. е. рассчитывают величину

$$\mathcal{E}_{\text{Холл}}^* = \frac{\mathcal{E}_{\text{Холл}}b}{I}, \quad (8)$$

которую называют удельной или приведенной ЭДС Холла. Приведенная ЭДС Холла пропорциональна индукции магнитного поля B :

$$\mathcal{E}^*_{\text{Холл}} = RB, \quad (9)$$

где коэффициент пропорциональности

$$R = \frac{1}{en} \quad (10)$$

является характеристикой изучаемого вещества и называется коэффициентом Холла или постоянной Холла.

Рассмотренный эффект Холла, причиной которого является действие на движущиеся в магнитном поле заряды силы Лоренца, называется классическим эффектом Холла. Как следует из формулы (9), для классического эффекта Холла характерна линейная зависимость $\mathcal{E}^*(B)$. Опыт между тем показывает, что в природе есть вещества, в которых линейная зависимость $\mathcal{E}^*(B)$ не выполняется. Это свидетельствует о существовании другой причины эффекта Холла, которая, однако, может быть понята только с позиций квантовой теории твердого тела.

Мы будем изучать эффект Холла в полупроводниках, поскольку в них эффект Холла имеет в основном классическую природу, и, следовательно, для его описания справедливо выражение (9).

Выражение (10) для классической постоянной Холла получено в предположении, что все носители тока имеют одинаковую скорость движения v , которая к тому же не изменяется при движении носителей тока в веществе. Мы не учли, следовательно, что при движении в реальном веществе носители тока испытывают столкновения и потому рассеиваются на примесях, на колебаниях решетки. Учет рассеяния носителей тока в веществе приводит к несколько исправленным выражениям для R , вид которых зависит от механизма рассеяния. Так, для чистых полупроводников с собственной проводимостью, когда рассеяние происходит главным образом на колебаниях решетки, для постоянной Холла получается выражение

$$R = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{en}. \quad (11)$$

Полученную теоретически зависимость постоянной Холла от концентрации носителей тока используют для экспериментального определения природы носителей тока.

Через образец толщины b пропускают электрический ток и при разных значениях магнитного поля B измеряют ЭДС Холла \mathcal{E} . По формуле (8) вычисляют удельную ЭДС Холла \mathcal{E}^* и строят график зависимости \mathcal{E}^* от B , который должен быть линейным. По тангенсу угла наклона прямой $\mathcal{E}^*(B)$ определяют постоянную Холла R . Используя формулу (11) и полагая, что абсолютное значение заряда носителей тока равно заряду электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, вычисляют концентрацию носителей тока:

$$n = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{Re} = 7,4 \cdot 10^{-18} \frac{1}{R}. \quad (12)$$

При экспериментальном определении $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$ следует обратить внимание, что наряду с эффектом Холла наблюдаются также некоторые другие эффекты: гальваномагнитный эффект, термомагнитный эффект и др. Для исключения влияния побочных эффектов используют свойство четности этих эффектов, т. е. их независимость от направления магнитного поля. Между тем как эффект Холла, являясь нечетным эффектом, меняет свой знак при изменении направления магнитного поля.

Для того чтобы исключить побочные эффекты и определить истинное значение $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$, напряжение между холловскими контактами измеряют при двух направлениях магнитного поля. Действительно, пусть при выбранном направлении поля напряжение между холловскими контактами $U_1 = \mathcal{E}_{\text{Холл}} + \mathcal{E}_{\text{доб}}$; при изменении направления поля на противоположное напряжение $-U_2 = -\mathcal{E}_{\text{Холл}} + \mathcal{E}_{\text{доб}}$.

Отсюда

$$\mathcal{E}_{\text{Холл}} = \frac{|U_1| + |U_2|}{2}. \quad (13)$$

т. е. $\mathcal{E}_{\text{доб}}$, обусловленное побочными четными эффектами, исключено.

Если наряду с постоянной Холла определить удельное электросопротивление полупроводника, то можно вычислить еще такую важную характеристику, как подвижность носителей тока.

Подвижностью носителей тока μ называется дрейфовая скорость носителей тока, которую они приобретают в электрическом поле с напряженностью 1 В/м. Очевидно, что если носители тока движутся в поле с напряженностью E , то их дрейфовая скорость

$$v = \mu E. \quad (14)$$

Если концентрация носителей тока n , заряд e , то плотность электрического тока через образец равна

$$j = env = en\mu E. \quad (15)$$

По закону Ома

$$j = \sigma E, \quad (16)$$

где σ — удельная электропроводность вещества, которая согласно (15) и (16) выражается через подвижность формулой

$$\sigma = en\mu. \quad (17)$$

Удельное электрическое сопротивление

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{en\mu}, \quad (18)$$

откуда

$$\mu = \frac{1}{\rho en}. \quad (19)$$

С учетом выражения (11) для постоянной Холла R подвижность носителей тока выражается следующим образом:

$$\mu = \frac{8}{3\pi} \frac{R}{\rho} = 0,85 \frac{R}{\rho}. \quad (20)$$

Для определения удельного электрического сопротивления изучаемого полупроводника измеряют электрическое сопротивление между двумя контактами, расположенными на длинной поверхности образца на расстоянии Δl . С этой целью пропускают электрический ток I вдоль длины образца и измеряют падение напряжения U_p между указанными контактами. Тогда удельное сопротивление вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{U_p}{I} \frac{bd}{\Delta l}, \quad (21)$$

где bd — поперечное сечение образца.

Все входящие в расчеты величины выражены в системе СИ.

Для установления типа изучаемого полупроводника, т. е. знака носителей тока, необходимо определить знак измеряемой ЭДС Холла при выбранных направлениях тока через образец I и магнитного поля B .

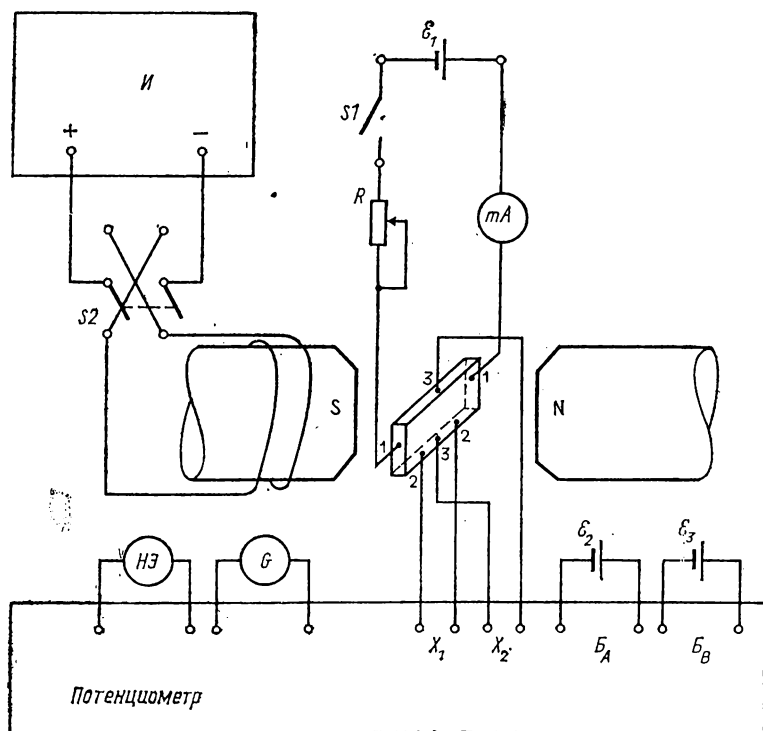


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Описание экспериментальной установки. Схема измерения эффекта Холла и удельного сопротивления приведена на рис. 2. Изучаемый образец приготовлен из полупроводникового вещества в форме прямоугольной пластинки, размеры которой указаны на установке. Здесь

1—1 — токовые контакты (для пропускания электрического тока через образец);

2—2 — контакты для измерения сопротивления;

3—3 — холловские контакты для измерения эффекта Холла.

Источником тока через образец является батарея \mathcal{E}_1 . Сила тока регулируется магазином сопротивлений R , измеряется миллиамперметром mA .

Магнитное поле в образце создается электромагнитом SN , питание которого осуществляется от источника постоянного тока I . Установленное значение силы тока I_M через электромагнит измеряется амперметром, расположенным на лицевой панели источника. Значение индукции магнитного поля в зазоре электромагнита при различных значениях тока I_M определяется по градуировочному графику или таблице.

Образец расположен между полюсами электромагнита таким образом, чтобы магнитное поле было перпендикулярно плоскости образца. Изменение направления магнитного поля на противоположное производится изменением направления тока I_M в электромагните с помощью переключателя $S2$.

Измерение падения напряжения U_p на образце между контактами 2—2 и напряжения $U_{\text{холл}}$ между холловскими контактами 3—3 производится компенсационным методом. В качестве компенсационной схемы в данной задаче используется высокоомный потенциометр РЗ7-1. Потенциометр имеет два входа X_1 и X_2 для измерения двух разных напряжений. На вход X_1 подается напряжение U_p , на вход X_2 — напряжение $U_{\text{холл}}$.

Рабочий ток в потенциометре создается батареями \mathcal{E}_2 и \mathcal{E}_3 , которые подключены к клеммам потенциометра B_A и B_B . Величина рабочего тока выставляется по эталонному напряжению, создаваемому нормальным элементом HE .

Нуль-индикатором потенциометра является гальванометр G . Нулевое показание гальванометра свидетельствует о том, что в измерительной схеме достигнуто состояние компенсации. А это означает, что измеряемое напряжение равно компенсационному напряжению, создаваемому в потенциометре с помощью переключателей измерительных декад.

Для изменения чувствительности гальванометра служит шунтирующее сопротивление, величина которого изменяется переключателем «10 МОм—0». Положение «10 МОм» соответствует минимальной чувствительности, положение «0» — максимальной чувствительности гальванометра. Рекомендуется всегда начинать измерения на грубой чувствительности и только по мере компенсации напряжений постепенно переходить к максимальной чувствительности гальванометра.

Упражнение 1. ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Ознакомиться с работой потенциометра по описанию. Нажать кнопку «измерение» и зафиксировать ее в таком положении, повернув на небольшой угол.

Установить рабочий ток I_A . Для этого переключатель рода работ установить в положение I_A и ручками «средне» и «точно», относящимися к току I_A , установить стрелку гальванометра на нуль.

Переключатель рода работы поставить в положение X_1 . Заглубить гальванометр, поставив переключатель в положение «10 МОм».

Проверить положение декад магазина R (магазин должен быть введен полностью). Замкнув ключ S_1 , установить ток $I=0,5$ мА. Измерить получающееся напряжение U_p .

Измерение напряжения заключается в том, что с помощью переключателей измерительных декад увеличивают компенсационное напряжение, добиваясь нулевого положения стрелки индикатора. При этом чувствительность постепенно увеличивают. Когда компенсация достигнута при максимальной чувствительности гальванометра, производят отсчет.

Заглубив гальванометр, установить другую величину тока через образец I и повторить измерение напряжения U_p .

Выполнив измерения U_p при токе $I=1, 2$ и 3 мА, вычислить величину удельного сопротивления ρ по формуле (21).

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Поставив переключатель рода работы в положение I_B , установить рабочий ток с помощью ручек средней и тонкой регулировки.

Переключатель рода работы поставить в положение X_2 . Установить ток через образец величиной $I=1$ мА. Включить источник постоянного тока и установить ток через обмотку электромагнита величиной $I_M=0,1$ А. Измерить напряжение $U_{\text{холл}}$, как описано выше измерение U_p .

Провести измерения при различных величинах магнитного поля, увеличивая ток I_M через электромагнит.

Затем, изменив направление тока в электромагните (переключателем S_2) и полярность на клеммах X_2 потенциометра, вновь измерить $U_{\text{холл}}$ при тех же величинах тока через электромагнит. Истинную величину ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{холл}}$ определить как среднее арифметическое двух значений напряжений, полученных при двух направлениях поля, по формуле (13). Вычислив удельную ЭДС Холла $\mathcal{E}^*_{\text{холл}}$ по формуле (8), построить зависимость $\mathcal{E}^*_{\text{холл}}$ от индукции магнитного поля B и определить постоянную Холла R по тангенсу угла наклона прямой $\mathcal{E}^*_{\text{холл}}(B)$.

Установить ток через образец $I=3$ мА и повторить измерения.

По найденным значениям удельного сопротивления ρ и постоянной Холла R вычислить концентрацию носителей тока n в из-

учаемом полупроводнике и их подвижность μ , используя формулы (12) и (20).

Для определения типа носителей тока необходимо найти направление тока I в образце по полярности источника тока \mathcal{E}_1 , направление магнитного поля B (с помощью магнитной стрелки) и знак ЭДС Холла $\mathcal{E}_{\text{Холл}}$ по полярности на клеммах X_2 потенциометра.

Математическая обработка результатов эксперимента на ЭВМ

В основе обработки лежит метод наименьших квадратов.

Удельное сопротивление образца ρ вычисляется как среднее значение N измерений:

$$\rho = \frac{bd}{l} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{U_i}{I_i}.$$

Стандартное отклонение S_ρ вычисляется по формуле:

$$S_\rho = \sqrt{\frac{(\rho_i - \rho)^2}{N - 1}}.$$

Постоянная Холла также находится методом наименьших квадратов. Удобно ввести обозначение $Y = U_i b / I$.

Тогда

$$Y = \alpha + \beta B, \text{ где } \beta = R.$$

Приближенные значения коэффициентов α и β находятся методом наименьших квадратов.

При графическом представлении результатов эксперимента прямую линию следует провести в соответствии со значениями коэффициентов α и β .

С помощью ЭВМ вычисляются также концентрация носителей заряда и их подвижность.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Какова причина классического эффекта Холла?
3. Написать выражение для силы Лоренца, действующей на носители заряда, в векторном виде. Определить ее направление для заданных направлений тока I и магнитного поля B .
4. Вывести основное выражение для ЭДС Холла. Написать выражение для постоянной Холла и рассказать, как ее экспериментально определяют.
5. Как вычисляется концентрация носителей тока?
6. Определить понятие подвижности носителей тока. Как связаны подвижность носителей тока с электропроводностью вещества? Как определяется подвижность носителей тока?

7. Почему взят в задаче для исследования не металлический образец, а полупроводниковый?
8. Какие типы электропроводности наблюдаются в полупроводниках?
9. Объяснить сущность потенциометрического метода измерения напряжений. Что такое нормальный элемент, назначение его при потенциометрических измерениях? Назначение вспомогательных батарей.
10. Перечислить последовательно все измерительные операции на приборе, а также необходимые вычисления при определении удельного сопротивления образца.
11. Почему не рекомендуется производить выключение и переключение тока в обмотке электромагнита при больших значениях тока в ней?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, § 31.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 88, 147, 150—153.

Лабораторная работа 19

ДОМЕННАЯ СТРУКТУРА ФЕРРОМАГНЕТИКА

Целью работы являются ознакомление с доменной структурой и процессами технического намагничивания ферромагнетиков, а также измерение основных характеристик петли магнитного гистерезиса в помощью магнитооптического эффекта Фарадея.

Исследуемые образцы и метод наблюдения. Доменная структура и петли гистерезиса наблюдаются на прозрачных монокристаллических пленках редкоземельных ферритов со структурой граната $R_3Fe_5O_{12}$ толщиной $h=5-10$ мкм, имеющих ось легкого намагничивания, ориентированную по нормали к поверхности пленки. Состояние намагниченности образца выявляется с помощью магнитооптического эффекта Фарадея, заключающегося в том, что при прохождении плоскополяризованного света через намагниченное тело плоскость поляризации поворачивается на угол φ , пропорциональный компоненте намагниченности вдоль светового луча и длине пути h света в магнетике.

Антипараллельно намагниченные соседние домены поворачивают плоскость поляризации на углы $+\varphi$ и $-\varphi$ соответственно. Поворотом анализатора можно погасить свет от доменов с одним направлением намагниченности, т. е. получить контрастное изображение доменной структуры. Изменение намагниченности образца вызовет изменение светового потока, регистрируемого фотоприемником.

Оборудование экспериментальной установки. Специальное оптическое устройство, включающее в себя источник света, коллиматор, формирующий параллельный пучок света, поляризатор, по-

ляризационный микроскоп, микрофотонасадка и фотоприемник (фотодиод); намагничивающая катушка с блоками питания (постоянного и переменного тока), амперметры и осциллограф с каналами X и Y.

Оптическая схема установки изображена на рис. 2, а.

Параллельный пучок плоскополяризованного света 1 попадает на образец 2, установленный в средней части намагничивающей

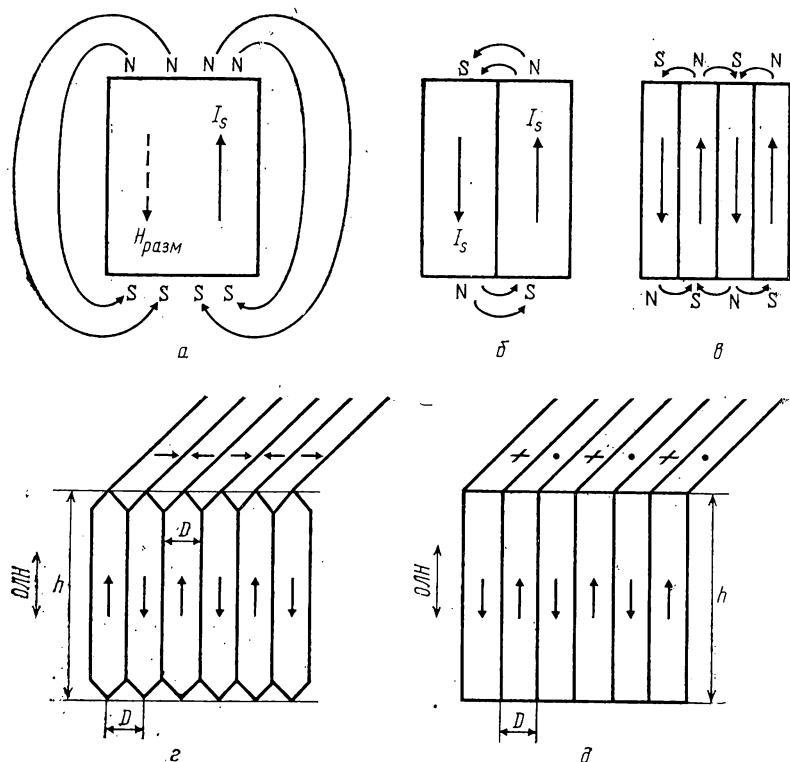


Рис. 1. Типы доменной структуры

катушки 3. Линзы 4 и 6 являются объективом и окуляром поляризационного микроскопа (анализатор 5 установлен между ними). Пластика 7 распределяет свет в окуляр 8 для визуального наблюдения доменной структуры и в сторону фотоприемника 9, преобразующего световой поток в электрический сигнал, регистрируемый с помощью осциллографа.

Принципиальная электрическая схема установки изображена на рис. 2, б. Питание намагничивающей катушки L осуществляется либо постоянным током (ключ S1 — в левом положении), либо переменным (ключ S1 в правом положении). Сила постоянно-

го тока, измеряемая амперметром A_1 , регулируется с помощью реостата R_1 , а его направление изменяется ключом S_2 . Сила переменного тока, измеряемая амперметром A_2 , определяется положением движка автотрансформатора T . С резистора R_2 напряжение, пропорциональное силе переменного тока в катушке L , т. е. напряженности магнитного поля, действующего на образец, подается на вход X осциллографа и обеспечивает смещение луча вдоль горизонтальной оси экрана, пропорциональное магнитному полю H . На вход Y осциллографа подается напряжение с фотоприемника, пропорциональное намагниченности образца $J = J_s(S_1 - S_2)/S_0$ (J_s — спонтанная намагниченность, $S_0 = S_1 + S_2$ — площадь поверхности образца).

Упражнение 1. ИЗУЧЕНИЕ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Зависимость намагниченности ферромагнетиков J от приложенного магнитного поля H имеет нелинейный и неоднозначный характер. Такое поведение ферромагнетиков в магнитном поле обусловлено существованием в них доменов — областей спонтанной (самопроизвольной) намагниченности, объем и ориентация намагниченности которых изменяются под действием внешнего поля. Этот процесс называют техническим намагничиванием. Равновесная магнитная структура ферромагнетика определяется из условия минимума энергии тела в целом, с учетом его формы и размеров. Энергия W ферромагнитного тела в магнитном поле H может быть представлена в виде суммы членов, характеризующих различные виды магнитного взаимодействия:

$$W = W_A + W_H + W_M + W_K. \quad (1)$$

Здесь W_A — энергия обменного (квантового) взаимодействия между магнитными моментами соседних атомов, ответственная за образование спонтанной намагниченности J_s (в ферромагнетиках эта энергия минимальна, когда магнитные моменты всех атомов ориентированы параллельно друг другу); W_H — энергия магнетика во внешнем поле (минимальная при ориентации магнитного момента образца вдоль поля H); W_M — магнитостатическая энергия поля рассеяния, вызванного образованием магнитных полюсов на поверхности намагниченного тела.

Эти полюсы создают поле рассеяния $H_{\text{расс}}$ как вне, так внутри тела (рис. 2). Внутри тела поле рассеяния направлено против намагниченности (размагничивающее поле $H_{\text{разм}}$), и это поле является главной причиной образования доменов. Для конфигурации, показанной на рис. 2, б, когда имеются два антипараллельно намагниченных домена, энергия W_M примерно вдвое меньше, чем в случае однодоменного образца (рис. 2, а). При дальнейшем дроблении на слоистые домены (рис. 2, в) протяженность пространства, в котором имеется существенное поле рассеяния, уменьшается пропорционально уменьшению ширины доменов D . W_K — энергия магнитной анизотропии, минимальная в случаях ориентации

J_s вдоль оси легкого намагничивания. Когда же вектор J_s ориентирован вдоль трудной оси, то энергия W_K при этом возрастает на величину, равную константе анизотропии K (в расчете на единицу объема ферромагнетика).

Между соседними доменами имеются сравнительно узкие (порядка 10^2 — 10^3 межатомных расстояний) переходные слои, кото-

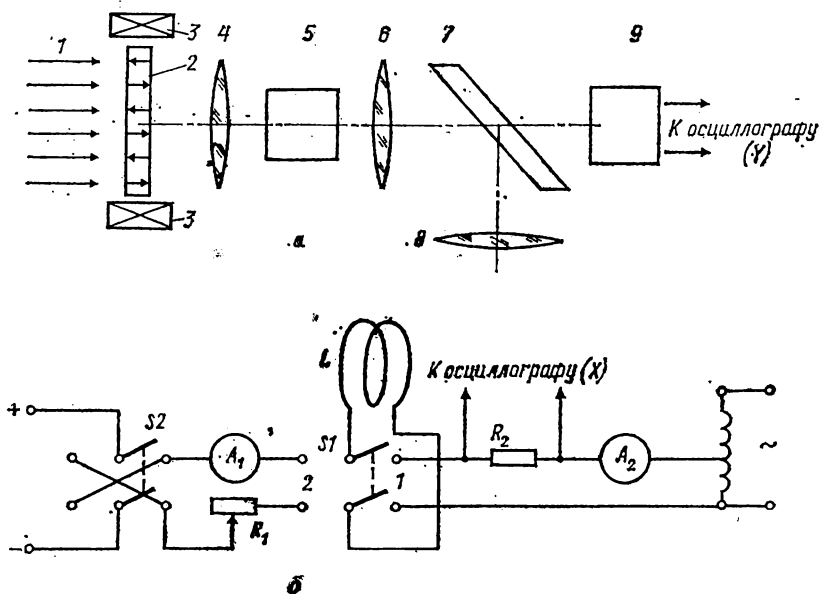


Рис. 2. Устройство экспериментальной установки: а) электрическая схема; б) оптическая схема

рые называются доменными границами (или стенками). В этих слоях направление J_s постепенно изменяется на противоположное. Толщина граничного слоя определяется условиями равновесия между силами анизотропии, стремящимися сузить стенку, и квантовыми обменными силами, стремящимися расширить ее. В многодоменном образце энергия доменных границ будет тем больше, чем больше общая площадь границ.

Выполнение эксперимента

До включения установки переключатель $S1$ должен находиться в положении 1, переключатель $S2$ — в произвольном положении; все приборы выключены, а автотрансформатор T отключен от сети.

Включить источник света. При этом в наблюдательном окуляре должна быть видна доменная структура образца. Если она недостаточно отчетлива, то необходимо сфокусировать изображение и, вращая ручку анализатора, которая выведена вверх на трубе

микроскопа, добиться контрастного изображения доменной структуры.

Для получения равновесной доменной структуры размагнитить образец путем подачи в катушку переменного тока. Подключить автотрансформатор к сети ~ 220 В, установить в намагничивающей катушке достаточно большой ток ($I=0,4$ А) и поворотом ручки автотрансформатора снизить его до нуля.

Зарисовать полученную доменную структуру и измерить равновесную ширину доменов D_0 , пользуясь шкалой окуляра.

К обработке результатов эксперимента

Рассмотрим магнитоодноосный кристалл в виде пластинки с осью легкого намагничивания (ОЛН), перпендикулярной плоскости образца. В однодоменном состоянии намагниченная до насыщения перпендикулярно плоскости пластинка имеет энергию W , равную максимальной магнитостатической энергии $W_M = \mu_0 J_s^2 V / 2$. Если намагниченность лежит в плоскости пластинки, то $W_M = 0$ и энергия $W = W_K = KV$ (V — объем образца). Энергия образца будет значительно снижена, если он будет размагничен, т. е. объем его будет разбит, например, на слоистые домены.

Сравним два варианта доменной структуры: а) «замкнутая» структура (рис. 1, з) и б) «открытая» структура (рис. 1, д). Оценим энергию каждого варианта структуры, предполагая, что ширина доменов D мала по сравнению с толщиной пластинки h .

«Замкнутая» доменная структура

Магнитный поток полностью замкнут, поле рассеяния отсутствует и, следовательно, $W_M^a = 0$. Полная энергия W^a складывается из энергии доменных границ W_r и энергии анизотропии W_K^0 замыкающих доменов. Число границ, приходящихся на единицу площади поверхности пластинки, равно $1/D$, их площадь приблизительно равна h/D . Удельная энергия доменных границ $W_r/S_0 = \sigma_r h/D$. В замыкающих доменах J_s лежит по трудной оси, и здесь объемная плотность энергии анизотропии равна K . Замыкающие домены имеют форму треугольных призм сечением $D^2/4$, которые расположены на обеих поверхностях пластинки. Следовательно,

$$\frac{W_K^a}{S_0} = 2K \frac{1}{D} \frac{D^2}{4} = \frac{KD}{2}. \quad (2)$$

Энергия замкнутой доменной структуры, отнесенная к единице площади поверхности пластинки, равна

$$\frac{W^a}{S_0} = \frac{\sigma_r h}{D} + \frac{KD}{2}. \quad (3)$$

Здесь σ_r — поверхностная плотность энергии границ, имеющая размерность Дж/м². В большинстве ферромагнетиков σ_r порядка

$10^{-3} \div 10^{-2}$ Дж/м². Оптимальная (равновесная) ширина доменов D_0 определяется из условия минимума энергии $W^a(D)$, т. е. из условия $dW^a/dD=0$

$$D_0^a = \sqrt{\frac{2\sigma_r h}{K}}. \quad (4)$$

Подставив D_0^a в (3), получим минимальное значение энергии для замкнутой структуры:

$$\frac{W_{\min}^a}{S_0} = \sqrt{2K\sigma_r h}. \quad (5)$$

Используя (4), можно исключить σ_r и получить

$$\frac{W_{\min}^a}{S_0} = KD_0^a. \quad (6)$$

«Открытая» доменная структура

Намагниченность J_S всюду лежит по ОЛН, т. е. энергия анизотропии $W_K^{\sigma}=0$. Энергия системы складывается из магнитостатической энергии и энергии доменных границ. Для случая, когда D во много раз меньше толщины образца h (рис. 1, в), Киттель получил выражение

$$W_M^{\sigma} = \frac{1,7\mu_0}{4\pi} J_S^2 D S_0. \quad (7)$$

В многодоменном образце необходимо учитывать энергию доменных границ, которая тем больше, чем больше объемная площадь границ S_r .

$$W_r = \sigma_r S_r. \quad (8)$$

Воспользовавшись формулами (7) и (8), получим

$$\frac{W^{\sigma}}{S_0} = \frac{1,7\mu_0}{4\pi} J_S^2 D + \frac{\sigma_r h}{D}. \quad (9)$$

Оптимальная ширина доменов D_0^{σ} для открытой структуры, полученная из условия $\partial W^{\sigma}/\partial D=0$, равна

$$D_0^{\sigma} = \sqrt{\frac{4\pi \sigma_r h}{1,7\mu_0 J_S^2}}. \quad (10)$$

Энергия равновесной «открытой» доменной структуры равна

$$\frac{W_{\min}^{\sigma}}{S_0} = 2 \sqrt{\frac{1,7\mu_0}{4\pi} J_S^2 \sigma_r h}, \quad (11)$$

или, в зависимости от равновесной ширины доменов D_0^{σ} ,

$$\frac{W_{\min}^6}{S_0} = \frac{3,4\mu_0}{4\pi} J_s^2 D_0^6. \quad (12)$$

Из сравнения величины энергии для обоих типов доменной структуры (ср. формулы (5) и (11)) следует важный вывод о том, что в пластинках из материала с относительно высокой магнитной анизотропией ($K > 3,4 \cdot 10^{-7} J_s^2$) многодоменное размагниченное состояние с «открытой» структурой энергетически предпочтительнее, чем «замкнутая» структура.

После выполнения эксперимента следует:

- 1) используя полученное значение D_0 , рассчитать по формулам (6) и (12) энергию, приходящуюся на единицу поверхности образца для доменной структуры «замкнутого» и «открытого» типов (для данного образца значения K и J_s указаны в приложении к установке);
- 2) убедиться, что для исследуемого образца энергетически более выгодна доменная структура «открытого» типа;
- 3) с помощью формулы (11) рассчитать поверхностную плотность энергии границ σ_r .

Упражнение 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Если ферромагнитное тело находится в исходном многодоменном размагниченном состоянии, то при включении магнитного поля \mathbf{H} происходит намагничивание тела, т. е. появляется результирующий магнитный момент в направлении поля. Техническое намагничивание осуществляется с помощью двух основных процессов:

- 1) смещения доменных границ, вызывающего увеличение объема выгодно намагниченных доменов (в которых угол между \mathbf{J}_s и \mathbf{H} острый);
- 2) вращения вектора \mathbf{J}_s в каждом из доменов в сторону вектора поля \mathbf{H} .

В данной лабораторной работе производится визуальное наблюдение процессов квазистатического намагничивания монокристаллических образцов со сквозной микрополосовой доменной структурой. Начиная с некоторого критического значения напряженности магнитного поля (поля старта доменных границ $\mathbf{H}_{\text{ст.гр}}$) можно обнаружить значительную перестройку доменов, которая осуществляется путем необратимых смещений доменных границ. При этом видно, что площадь одних доменов (например, светлых) увеличивается за счет уменьшения площади других (темных). По мере приближения к насыщению площадь невыгодно намагниченных доменов резко сокращается, остаются лишь отдельные узкие домены, которые исчезают в поле насыщения \mathbf{H}_s , когда образец становится однородно намагниченным по полю. Процесс намагничивания завершен.

Рассмотрим процесс перемагничивания образца, первоначально находящегося в насыщенном состоянии. Когда поле, приложенное вдоль ОЛН, уменьшается, то при некотором значении $H_{\text{зар}}$ в образце появляются магнитные домены с обратной намагниченностью (зародыши). Это поле $H_{\text{зар}}$ называется полем зародышеобразования. Причиной появления зародышей служит сильное размагничивающее поле, направленное против намагниченности образца.

При дальнейшем уменьшении напряженности поля до нуля в результате роста числа и объема зародышей намагниченность образца уменьшается, но остается некоторая остаточная намагниченность J_r . Необратимое смещение границ происходит еще в положительных полях. При отрицательном поле $-H_c$ площади темных и светлых доменов становятся одинаковыми ($J=0$). Коэрцитивная сила H_c очень близка к значению поля старта границ $H_{\text{ст.гр.}}$. Процесс перемагничивания завершается в отрицательном поле $-H_s$, когда исчезнут все невыгодно намагниченные домены.

Выполнение эксперимента

Переключатель $S1$ поставить в положение 2. Включить источник питания постоянного тока. Плавно увеличивая ток, определить поле H_s , при котором доменная структура исчезает и намагниченность образца становится равной $+J_s$. Уменьшая ток, зафиксировать поле $H_{\text{зар}}$, при котором возникают домены с противоположной намагниченностью. Уменьшить ток до нуля и наблюдать доменную структуру в остаточном состоянии. Увеличивая обратный ток, перевести образец в насыщенное состояние с намагниченностью $-J_s$. Повторить процесс перемагничивания и соответствующие измерения несколько раз. Рассчитать по измеренным значениям токов критические поля H_s , $H_{\text{зар}}$ по формуле $H=CI$, где C — постоянная катушки, данная в приложении к установке.

Упражнение 3. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ¹

Ключ $S1$ поставить в положение 1, при этом следует иметь в виду, что на вход X осциллографа подается напряжение с резистора R_2 (см. рис. 1, б), пропорциональное силе тока в катушке L (т. е. напряженности магнитного поля). На вход Y осциллографа подается напряжение от фотодиода, пропорциональное намагниченности образца.

Плавно увеличивая напряжение на выходе автотрансформатора, наблюдать на экране осциллографа, как происходит «раскрытие» петли гистерезиса, следя одновременно за изменением доменной структуры. Измерить минимальное поле $H_{\text{ст.гр.}}$, при котором начинается движение границ.

Получить предельную петлю (максимальный ток 0,2 А), зарисовать ее и указать критические точки: H_s , H_c , $H_{\text{зар}}$, J_r .

Измерить по петле гистерезиса относительные величины критических полей H_c/H_{\max} , $H_{\text{зар}}/H_{\max}$ и относительную остаточную намагниченность J_r/J_s . Вычислив H_{\max} , рассчитать критические поля H_c , $H_{\text{зар}}$, H_s .

Сравнить значение $H_{\text{ст.гр}}$ с полем H_c , определенным по петле гистерезиса.

Сравнить значения критических полей H_s и $H_{\text{зар}}$, измеренных в разных упражнениях.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем вызвано разбиение ферромагнитного тела на домены?
2. Какие виды магнитной энергии в ферромагнетиках оказывают влияние на процессы намагничивания?
3. Назовите основные процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков.
4. Какие типы доменной структуры вы знаете? Какими методами можно наблюдать доменную структуру?
5. Дайте определение и разъясните физический смысл критических полей ($H_{\text{зар}}$, H_c , H_s).
6. Каковы причины магнитного гистерезиса? Какими методами можно изучать петлю гистерезиса?
7. Что такое «размагничивающее поле образца»?
8. Чему равна объемная плотность энергии магнитного поля в вакууме и в веществе?
9. Какими характеристиками должен обладать ферромагнитный материал, пригодный для применения в качестве запоминающего элемента?
10. В чем заключается эффект Фарадея?
11. Как формируется магнитооптическое изображение доменной структуры?
12. Чему равна поверхностная плотность энергии образца в однодоменном состоянии?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, с. 223—227.
3. Телеснин Р. В., Яковлев В. Ф. Курс физики. Электричество. М.: Просвещение, 1970, с. 297—316.
4. Ландсберг Г. С. Оптика. Общий курс физики. М.: Наука, 1980, с. 618—620.

Лабораторная работа 20

ЛАРМОРОВА ПРЕЦЕССИЯ

Исследуется одно из магнетомеханических явлений — ферромагнитный резонанс. Выполняемые измерения позволяют проверить теорему Лармора, определить природу элементарных носителей ферромагнетизма и обнаружить анизотропию магнитных свойств ферромагнетиков.

Постановка задачи. Изучаемое магнетомеханическое явление — прецессия магнитных моментов в магнитном поле. Здесь имеются в виду магнитные моменты электронов атомов, входящих в состав твердого тела (ферромагнетика).

Если частица с магнитным моментом \mathbf{P}_m находится в магнитном поле \mathbf{B} , так что между этими векторами имеется угол φ (рис. 1, а), то энергия W частицы, обусловленная моментом \mathbf{P}_m , определяется скалярным произведением

$$W = \mathbf{P}_m \cdot \mathbf{B} = -P_m B \cos \varphi. \quad (1)$$

Эта энергия минимальна при $\varphi=0$, т. е. когда $\mathbf{P}_m \parallel \mathbf{B}$. Но как будет вести себя момент \mathbf{P}_m , когда $\varphi \neq 0$? Частица с магнитным моментом \mathbf{P}_m испытывает воздействие вращающего момента \mathbf{T} со стороны поля \mathbf{B} :

$$\mathbf{I} = [\mathbf{P}_m \mathbf{B}], \quad (2)$$

который ориентирован, как показано на рис. 1, б. Очевидно, конец вектора \mathbf{P}_m под воздействием момента \mathbf{T} будет описывать окружность, т. е. вектор \mathbf{P}_m будет прецессировать относительно направления вектора \mathbf{B} (см. рис. 1, б).

Для отдельной частицы или множества частиц справедлива *теорема Лармора*: если на систему частиц, обладающих одинаковым отношением электрического заряда к массе, наложить постоянное магнитное поле \mathbf{B} , то магнитные моменты этих частиц будут прецессировать относительно поля \mathbf{B} с частотой

$$\Omega = \gamma B. \quad (3)$$

Это явление называют ларморовой прецессией, частоту Ω — ларморовой частотой. Величина γ представляет собой отношение магнитного момента частицы к ее механическому моменту. Для электрона это отношение

$$\gamma = g \frac{e}{2m}, \quad (4)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона, $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса электрона; коэффициент, называемый g -фактором, равен единице, если в прецессии принимают участие только орбитальные магнитные моменты электронов, и $g=2$, если прецессируют только собственные магнитные моменты электронов.

Теорема Лармора описывает поведение не только свободных частиц, но и частиц, входящих в состав твердого тела.

В реальном ферромагнетике возбужденное каким-либо образом прецессионное движение магнитного момента долго продолжаться не может. Наличие тормозящих сил различной природы приводит к тому, что энергия прецессирующего магнитного момента тратится на совершение работы против этих сил. В результате угол прецессии постепенно уменьшается, а энергия прецессионного движения переходит в энергию колебательного движения кристаллической решетки ферромагнетика, т. е. в тепло.

Если мы наложим на ферромагнетик переменное магнитное

поле \mathbf{b} круговой поляризации, перпендикулярное постоянному полю \mathbf{B} , то потери энергии прецессионного движения момента \mathbf{P}_m будут восполняться за счет энергии поля b (в случае, если вращение вектора \mathbf{b} совпадает по фазе с прецессией вектора \mathbf{P}_m). При изменении частоты ω этого поля \mathbf{b} угол прецессии φ будет меняться резонансным образом и при совпадении частоты ω с ларморовой частотой Ω будет максимальным. В этом и заключается ферромагнитный резонанс (ФМР).

В настоящей задаче мы рассматриваем ФМР, а не более простое явление ЭПР (электронный парамагнитный резонанс), потому что ФМР легче обнаружить. Действительно, величина энергии W , отбираемой прецессирующим магнитным моментом \mathbf{P}_m от переменного поля \mathbf{b} , определяется выражением

$$W \sim P_m b \cos \varphi, \quad (5)$$

т. е. эта энергия пропорциональна моменту \mathbf{P}_m , который у ферромагнетиков значительно больше. Поэтому внесение ферромагнит-

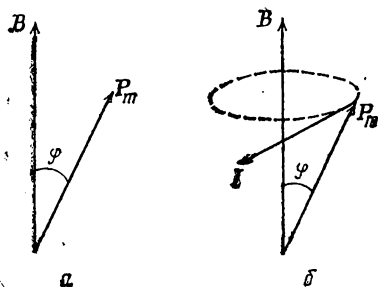


Рис. 1. Прецессия магнитного момента в магнитном поле

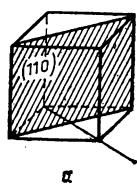


Рис. 2. Ориентация основных кристаллографических направлений в плоскости (110)

ного образца в поле \mathbf{b} уменьшит энергию этого поля значительно сильнее, чем внесение парамагнитного образца. Регистрировать же мы будем изменение энергии переменного поля \mathbf{b} .

Ферромагнетик, который здесь изучается, будучи монокристаллом, обладает кристаллографической анизотропией. Анизотропны и его магнитные свойства. В частности, резонансное значение внешнего магнитного поля вдоль разных кристаллографических направлений образца оказывается различным.

Обнаружение ларморовой прецессии. Объект исследования — ферромагнетик в форме шарика диаметром 0,9 мм. На него накладывается постоянное магнитное поле, создаваемое электромагнитом, и переменное поле, создаваемое электромагнитной волной. Источником электромагнитной волны является СВЧ генератор. Волна от него распространяется по волноводу, который проходит в зазоре электромагнита, где внутрь волновода с помощью специального держателя вставляется образец. Таким образом дости-

гается одновременное воздействие на образец постоянного и СВЧ переменного полей.

При обнаружении прецессии магнитных моментов в постоянном магнитном поле \mathbf{B} частота СВЧ поля сохраняется постоянной. Меняется собственная, ларморовская частота прецессии магнитных моментов электронов, определяемая в соответствии с соотношением (3) индукцией поля \mathbf{B} . Таким образом, регистрируя энергию электромагнитной волны, прошедшей через образец, мы ожидаем, что она будет иметь минимум при некотором значении индукции \mathbf{B} . Это произойдет при совпадении ларморовской частоты Ω с частотой ω СВЧ поля b .

Кристаллографическая анизотропия ферромагнетика. Исследуемый ферромагнетик имеет кубическую кристаллографическую анизотропию. Кристаллографическая плоскость (110) (на рис. 2, a она заштрихована) содержит в себе три наиболее характерных направления: $[100]$ — параллельное ребру куба, $[110]$ — параллельное диагонали грани куба и $[111]$ — параллельное пространственной диагонали. При этом мы будем считать эквивалентными между собой соответственно все ребра куба, все диагонали граней и все пространственные диагонали, так как магнитные свойства вдоль этих направлений (соответственно) одинаковы. Исследуемый образец предварительно ориентирован и приклеен к держателю таким образом, что его плоскость (110) горизонтальна. Поэтому при вращении держателя вокруг вертикальной оси мы можем совмещать с направлением \mathbf{B} , которое горизонтально, любое направление в плоскости (110). Измеряя величину B , при которой $\Omega = \omega$ при той или иной ориентации \mathbf{B} в плоскости (110), мы можем выявить различие этой величины в разных направлениях.

Проверка теоремы Лармора и определение g -фактора. Теорема Лармора устанавливает пропорциональность между индукцией постоянного поля \mathbf{B} и частотой прецессии Ω магнитных моментов электронов. Определив частоту Ω , соответствующую ряду значений индукции \mathbf{B} , на основе соотношения $\Omega = \omega_{\text{рез}}$ можно проверить выполнение указанной пропорциональности.

Тангенс угла наклона линейной зависимости Ω (\mathbf{B}) позволяет вычислить (на основе соотношения (3)) величину g -фактора.

Экспериментальная установка. Блок-схема установки изображена на рис. 3. Электромагнитные колебания, вырабатываемые клистронным генератором G , по волноводному тракту через вентиль B (устройство, пропускающее электромагнитную волну только в одном направлении), поступают на двойной Т-мост. Этот мост обладает таким свойством, что электромагнитная волна, поступившая в плечо 1, разветвляется на две, идущие в плечи 2 и 4, так что в плечо 3 ничего не попадает. Часть СВЧ мощности, поступившая в плечо 4, полностью поглощается нагрузкой, а часть СВЧ мощности, попавшая в плечо 2, доходит до короткозамкнутого волновода K и, отразившись от задней стенки этого волновода, возвращается к плечу 2. При этом электромагнитная волна воздействует на ферромагнитный образец, с помощью специальной

втулки помещаемый в пучность линейно поляризованной магнитной компоненты, образовавшейся в короткозамкнутом волноводе стоячей электромагнитной волны. Ориентация волновода в зазоре между полюсными наконечниками электромагнита такова, что пе-

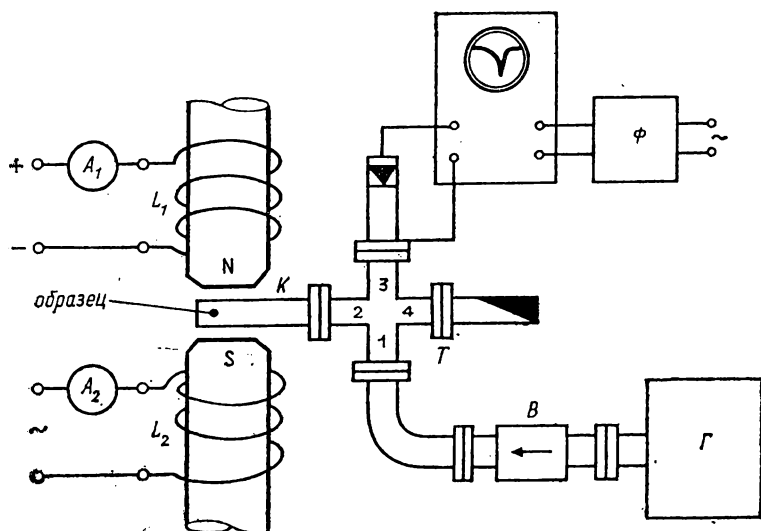


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

ременное СВЧ поле перпендикулярно постоянному полю электромагнита, что требуется для наблюдения ФМР.

Электромагнитная волна, возвратившаяся в плечо 2 моста после взаимодействия с ферромагнетиком, имеет уже меньшую амплитуду, так как часть ее энергии пошла на поддержание прецессионного движения магнитного момента образца. Эта волна разветвляется на две части: первая часть ее, пошедшая в плечо 1, поглощается вентилем B , а вторая, идущая в плечо 3, попадает на детектор.

При плавном изменении величины постоянного магнитного поля в окрестности резонансного значения ток этого детектора изменяется резонансным образом вследствие резонансного характера поглощения СВЧ мощности образцом.

Плавное изменение величины постоянного магнитного поля достигается созданием переменного поля с помощью обмоток электромагнита L_2 , в которые подается переменный ток от сети 50 Гц.

Ток с СВЧ детектора подается на вход Y осциллографа, развертка которого осуществляется также от сети 50 Гц. При этом отклонение луча на экране осциллографа вдоль горизонтальной оси оказывается пропорциональным индукции магнитного поля в зазоре электромагнита (а не времени). Чтобы изображения на

экране осциллографа, соответствующие прямому и обратному изменению переменного поля, совпали между собой, фаза напряжения, подаваемого на горизонтальный вход осциллографа, корректируется с помощью фазовращателя Φ .

Упражнение 1. ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ ЛАРМОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ g -ФАКТОРА

Включить в сеть генератор, осциллограф, источник постоянного тока, автотрансформатор. Установить постоянный ток через обмотку L_1 электромагнита не более 150 мА, переменный ток через обмотку L_2 — не более 1 А. После прогрева генератора установить максимальный уровень генерации на какой-либо частоте в пределах его диапазона. На экране осциллографа установить линию развертки в пределах сетки делений.

Изменяя величину постоянного тока с помощью регулировок на источнике питания, добиться появления на экране осциллографа сигнала ФМР. Затем с помощью регулировочных винтов волноводного тракта добиться максимальной величины этого сигнала.

Величину постоянного тока установить такой, чтобы при вращении образца сигнал ФМР не уходил за пределы развертки. Вращая образец, оставить его в положении, когда сигнал ФМР располагается в середине развертки.

Записать значения силы тока I_0 и частоты Ω .

Изменив частоту излучения генератора, установить максимальный уровень генерации на новой частоте. Изменяя силу постоянного тока, добиться появления на экране осциллографа сигнала ФМР и установить его в середине развертки. С помощью регулировочных винтов волноводного тракта добиться максимальной величины этого сигнала.

Записать новые значения силы постоянного тока I_0 и частоты Φ .

Прodelать аналогичные измерения во всем диапазоне работы генератора. Результаты измерений оформить в виде таблицы, где предусмотреть место для значений индукции магнитного поля, вычисленных для каждого значения постоянного тока по формуле

$$B = (6,20 + 175 I_0) \cdot 10^{-2}, \quad (6)$$

представляющей собой калибровочную зависимость $B(I_0)$ электромагнита. Здесь ток I_0 выражается в амперах, индукция B — в теслах.

Зависимость $\Omega(B)$ представить графически. По наклону прямой линии, описывающей эту зависимость, определить величину g -фактора (см. формулу (3)).

Упражнение 2. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ОБРАЗЦА

Установить на экране осциллографа сигнал ФМР, соответ-

ствующий любой частоте излучения генератора. Отрегулировать силу постоянного тока I_0 таким образом, чтобы при вращении образца сигнал не уходил за пределы развертки осциллографа.

Поворачивая образец последовательно через 10° в пределах 360° , снять зависимость между углом поворота образца α и положением сигнала ФМР на экране осциллографа x . Развертка отрегулирована так, что она составляет десять больших делений на сетке экрана. Положение сигнала ФМР вдоль развертки регулировать с точностью до 0,1 большого деления. Перевод значений x в соответствующие величины индукции магнитного поля B выполнить по формуле

$$B = (6,20 + 175 I_0) \cdot 10^{-2} - 1,65 \cdot I_{\sim} (1 - 2 \cdot 10^{-2} x), \quad (7)$$

где I_{\sim} — эффективное значение силы переменного тока в обмотке L_2 электромагнита (в амперах), x — положение сигнала ФМР на развертке осциллографа ($0 \leq x \leq 100$). Результаты измерений и расчетов занести в таблицу (α , x , B).

Зависимость $B(\alpha)$ представить графически. Обратить внимание на 180° -симметрию этой зависимости. Значения угла α , при которых зависимость $B(\alpha)$ имеет экстремумы, сопоставить с основными кристаллографическими направлениями в плоскости (110).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается теорема Лармора?
2. Чем определяется величина частоты ларморовой прецессии?
3. Какие магнетомеханические опыты Вы знаете?
4. Как можно объяснить величину орбитального магнитного момента электрона?
5. Почему прецессия магнитных моментов электронов образца, исследуемого в данной задаче, не затухает?
6. Каким образом проявляется анизотропия кристаллографической структуры изучаемого образца?
7. Объяснить назначение элементов экспериментальной установки.
8. Как можно сопоставить экстремумы в экспериментально полученной зависимости индукции резонансного поля от угла поворота образца в плоскости (110) с характерными направлениями кристалла кубической симметрии $[100]$, $[110]$ и $[111]$?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, § 40, 43.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, с. 236—242, 566.
3. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности. М.: Высшая школа, 1986.
4. Стрелков С. П. Механика. М.: Физматгиз, 1965, с. 218—220.

Лабораторная работа 21

МАГНИТОСТРИКЦИЯ

В настоящей лабораторной работе изучается зависимость магнитострикции железа, никеля и пермаллоя от величины внешнего магнитного поля.

Параметры, характеризующие магнитострикцию. Магнитострикция состоит в изменении размеров тела при воздействии на него магнитного поля, т. е. при изменении намагниченности тела. Деформацию, проявляющуюся в изменении линейных размеров тел, описывают относительным изменением его размеров. Магнитострикцию называют *продольной*, когда интересуются изменением размеров тела вдоль направления приложенного магнитного поля:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l}. \quad (1)$$

Здесь λ — константа продольной магнитострикции, $\Delta l/l$ — относительное изменение размеров образца (l — первоначальная длина образца, Δl — абсолютное изменение размеров образца при его намагничивании). Когда же величины Δl и l определяются перпендикулярно направлению приложенного магнитного поля, то они определяют так называемую поперечную магнитострикцию. В общем случае зависимость между изменением размеров образца и его намагниченностью описывается тензором.

Ферромагнетик в магнитном поле может удлиняться — магнитострикция положительная ($\Delta l > 0$, $\lambda > 0$) и укорачиваться — отрицательная магнитострикция ($\Delta l < 0$, $\lambda < 0$).

Если образец в начальном состоянии размагничен, т. е. векторы намагниченности отдельных его областей (доменов) распределены беспорядочно, без какого-либо преимущественного направления, то при намагничивании образца до насыщения его магнитострикция также достигает насыщения. Эту величину называют магнитострикцией насыщения или константой магнитострикции материала λ_s и рассматривают как характеристику магнитострикционного поведения материала. Для разных ферромагнетиков она различна: у никеля, например, $\lambda_s = -40 \cdot 10^{-6}$, у железа $\lambda_s = -8 \cdot 10^{-6}$.

С повышением температуры λ_s , как правило, уменьшается, обращаясь практически в нуль в точке Кюри, где исчезает и спонтанная намагниченность ферромагнетика.

Магнитострикция ферромагнитных кристаллов обладает резко выраженной анизотропией.

Причина магнитострикции лежит в анизотропном взаимодействии магнитных атомов с внутрикристаллическим электрическим полем.

Явление магнитострикции находит широкое применение в технике (магнитострикционные стабилизаторы частоты, магнитострикционные генераторы и приемники ультразвука и т. д.) и играет важную роль при выяснении механизма процессов намагничивания ферромагнетиков и при исследованиях новых магнитных материалов.

Экспериментальная установка

Объектом исследования являются образцы железа, никеля и пермаллоя (сплав железа с никелем) в виде пластин с размерами $100 \times 10 \times 0,2$ мм³.

Установка позволяет для каждого образца снимать зависимость его намагниченности J и магнитострикции λ от величины напряженности внешнего поля H одновременно. Схема установки изображена на рис. 1.

В состав установки входит соленоид, внутри которого помещается исследуемый образец. Соленоид создает магнитное поле, воз-

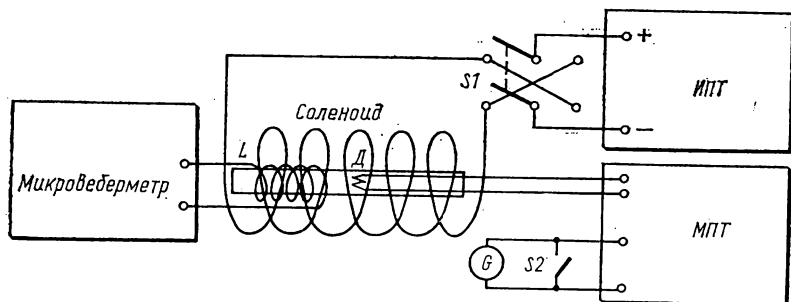


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

действующее на образец. Питание соленоида осуществляется от источника постоянного тока ИПТ (Б5-21). Ключ $S1$ позволяет производить коммутацию тока в соленоиде.

Исследуемый образец помещается в центре соленоида таким образом, что вектор магнитного поля H лежит вдоль наибольшего размера образца. На образец намотана обмотка L , позволяющая с помощью микровеберметра (Ф 5080) измерять намагниченность образца (см. описание лабораторной работы 16).

Измерение магнитострикции производится тензометрическим методом. Проволочный тензометр (датчик D) в виде плоской спирали из тонкой нихромовой проволоки диаметром 20 мкм общим сопротивлением 98,6 Ом наклеивается непосредственно на поверхность исследуемого образца. Величина изменения омического сопротивления датчика служит мерой наблюдаемой магнитострикции:

$$\lambda = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta R}{R}. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности между относительным изменением омического сопротивления тензометра $\Delta R/R$ и относительной деформацией $\lambda = \Delta l/l$ определен экспериментально (заранее) по известной величине относительной деформации. Величину, обратную этому коэффициенту, называют коэффициентом тензочувст-

вительности датчика. Для датчика, используемого в настоящей работе, $\gamma=2,00$. Проволочный тензометр включается в мост постоянного тока МПТ (МО=62). Индикатором равновесия моста служит гальванометр G (М17/11). Сигнал раскомпенсации моста пропорционален величине магнитострикции образца.

Монтаж и включение установки. Собрать схему в соответствии с рис. 1. Регулировка выхода источника должна быть в крайнем положении против часовой стрелки, что соответствует минимуму выходного напряжения.

Ключ $S2$ должен быть замкнут, шунтируя накоротко гальванометр G .

На верхней панели моста МО-62 переключатель питания поставить в положение «Сеть, 36 В», переключатель типа измерительной схемы — в положение «2 з» (двухзажимная схема), переключатель отношения плеч моста — в положение 1, переключатели декад установить в положения, соответствующие сопротивлению $10 \div 100$ Ом.

На микровеберметре установить предел измерения 1 мТл , величину сопротивления $R=40$ Ом.

Включить приборы в сеть. После прогрева в течение 15 мин можно приступить к измерениям.

Упражнение 1. КАЛИБРОВКА МОСТА

Тензодатчик должен быть подключен к входу моста R_x , а к гнездам ГН моста должен быть подключен внешний гальванометр (см. рис. 1).

В момент компенсации моста, когда показания декадных переключателей соответствуют измеренному сопротивлению, отклонение α гальванометра должно быть равно нулю (при разомкнутом ключе $S2$). Чтобы выразить ΔR через отклонение $\Delta \alpha$, раскомпенсируем мост с помощью декадного переключателя на величину ΔR_R , которая дает отклонение гальванометра, например $\Delta \alpha_R = 100$ мм. Тогда, очевидно, если при измерении магнитострикции сопротивление датчика изменится на величину ΔR , что приведет к отклонению гальванометра на величину $\Delta \alpha$, будет иметь место соотношение

$$\frac{\Delta R_R}{\Delta \alpha_R} = \frac{\Delta R}{\Delta \alpha}, \quad (3)$$

откуда

$$\Delta R = \Delta \alpha \frac{\Delta R_R}{\Delta \alpha_R}. \quad (4)$$

Теперь для расчета величины магнитострикции формула (2) приобретает следующий вид:

$$\lambda = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta R_R}{R \Delta \alpha_R} \Delta \alpha = K \Delta \alpha. \quad (5)$$

Вычислить величину коэффициента K :

$$K = \frac{1}{\gamma} \frac{\Delta R_R}{R \Delta \alpha_R}.$$

Упражнение 2. ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТОСТРИКЦИИ λ ОТ ЕГО НАМАГНИЧЕННОСТИ J

В этом упражнении одновременно снимаются зависимости $\lambda(H)$ и $J(H)$, что позволяет получить зависимость $\lambda(J)$.

Намагниченность образца измеряется баллистическим методом с помощью микроберметра (Ф 5080). Величина напряженности магнитного поля H , в котором находится образец, вычисляется по формуле

$$H = K_1 I,$$

где $K_1 = 0,093$ (А/м)/А. Размагничивающим полем образца пренебрегаем вследствие большого отношения его длины к толщине.

Величина намагниченности образца J вычисляется по формуле

$$J = K_2 \Phi,$$

где Φ — отсчет на табло микроберметра (в теслах), $K_2 = 1,57$ Гс/Тл.

Размагнитить образец. (Ключ $S2$ замкнут.) Для этого установить максимальный ток через образец ($I_{\max} = 5$ А) и, медленно уменьшая до нуля, коммутировать его с помощью ключа $S1$.

Установить первое значение тока ($I = 0,5$ А), прокоммутировать его несколько раз, стабилизируя частный цикл перемагничивания образца. Разомкнуть ключ $S2$ («зайчик» гальванометра должен стоять на нуле). Следующую операцию, основную, необходимо выполнять четко, быстро, но спокойно.

Нажать кнопку «пуск» микроберметра, провести однократную коммутацию тока соленоида (переключить ключ $S1$ в одну сторону) и произвести отсчет отклонения гальванометра $\Delta\alpha$, записать его в тетрадь, произвести отсчет показания микроберметра Φ и тоже записать его в тетрадь. Эти данные необходимо регистрировать в тетради в виде таблицы.

Закоротить гальванометр ключом $S2$.

Установить следующее значение тока соленоида, прокоммутировать его несколько раз, разомкнуть ключ $S2$.

Выполнить измерения величины $\Delta\alpha$ и Φ при этом значении тока и так далее до максимального значения $I_{\max} = 5,0$ А.

После окончания измерений установить исходное положение всех переключателей и регулировок на установке, выключить все приборы.

Выполнить расчет величин H , λ и J и закончить заполнение таблицы.

Построить график $\lambda(J)$.

Аналогичные измерения по указанию преподавателя могут быть выполнены с другими образцами.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается явление магнитострикции?
2. Каким образом описывается магнитострикция?
3. В чем заключается тензометрический метод измерения магнитострикции?
4. Как производится калибровка моста, измеряющего сопротивление тензометра, для определения величины магнитострикции образца?
5. В чем заключается баллистический метод измерения намагниченности образца?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1985.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1983.

ЛАБОРАТОРИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При выполнении работ лаборатории переменного тока студенты

изучают физические явления: генерирование переменного напряжения, прохождение квазистационарного переменного тока через цепи, содержащие R -, C -, L -элементы, изменение амплитуды и фазы тока и напряжения в этих цепях, резонанс токов, напряжений и сопротивлений, включение и выключение постоянной ЭДС в цепях, содержащих R -, C -, L -элементы, обратную связь в радиотехнических устройствах, дифференцирование и интегрирование сигналов, разложение сложного колебания на гармоники;

изучают физические законы: закон Ома для цепи переменного тока, теорему Фурье;

овладевают методами расчета цепей переменного тока: символическим (комплексным) методом, методом векторных диаграмм;

овладевают методами измерений в цепях переменного тока: методом, в котором основным измерительным прибором является вольтметр, осциллографическим и мостовым методами;

приобретают навыки измерения величин сопротивления резистора, сопротивления утечки конденсатора, активного сопротивления катушки индуктивности, емкости конденсатора, коэффициента самоиндукции катушки индуктивности, амплитудных и эффективных значений тока и напряжения, импеданса цепи переменного тока, фазовых сдвигов между токами и напряжениями в R -, C -, L -цепях;

приобретают навыки работы с приборами: генератором звуковых частот, ламповым вольтметром, осциллографом, магазинами R -, C -, L -элементов, а также *навыки монтажа схем*, включающих различные комбинации R -, C -, L -элементов и приборы;

знакомятся с устройством, принципом действия и применениями конкретных радиофизических элементов, широко используемых в технике физического эксперимента: RC -цепочками, фазовращателем, двойным T -мостом, LCR -резонансным контуром, четырехплечными и T -образными мостами, генератором переменного напряжения, цепью обратной связи.

Лабораторная работа 22

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В Z -, C -, R - ЦЕПЯХ

Цель работы — изучение характера изменения тока и напряжений в цепях, содержащих разные комбинации L -, C -, R -элементов, при включении и выключении постоянной ЭДС.

Оборудование. Монтаж исследуемой цепи осуществляется на специальной плате с размещенными на ней гнездами, к которым подключаются катушка индуктивности ($L=0,01$ Гн), магазин сопротивлений ($R=0,1 \div 10\,000$ Ом), конденсатор ($C=0,1$ мкФ, $0,05$ мкФ и $0,01$ мкФ). Специальный генератор вырабатывает прямоугольные импульсы напряжения амплитудой ± 3 В и длительностью примерно $0,02$ с. Выходное сопротивление генератора $R_{\text{вых}}=200$ Ом. Осциллограф должен иметь чувствительность не хуже 2 мВ/см.

Методика эксперимента заключается в наблюдении осциллограмм тока и напряжения в исследуемых цепях при включении и выключении в них постоянной ЭДС.

Упражнение 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ИМПУЛЬСОВ ГЕНЕРАТОРА

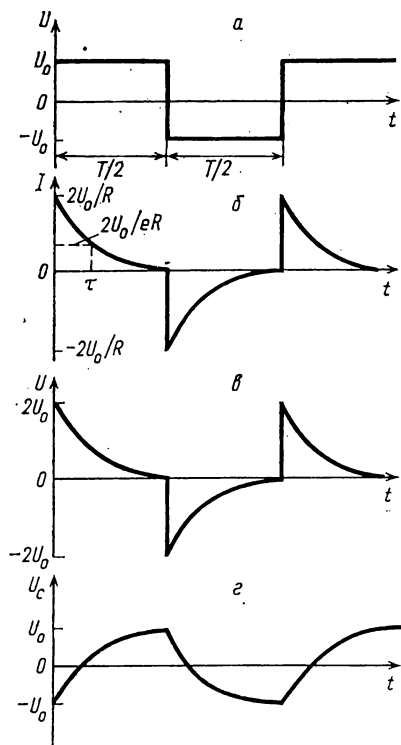


Рис. 1. Эпюры напряжения и тока в исследуемых цепях

Исследуемая цепь подключается к выходу генератора, вырабатывающего импульсы напряжения, форма которых показана на рис. 1, а. В течение половины периода этого напряжения в цепи действует положительная ЭДС, затем происходит скачкообразное изменение ЭДС, в результате чего в цепи начинает действовать отрицательная ЭДС. При каждом изменении ЭДС ток в цепи и падение напряжения на резисторе и конденсаторе изменяются не мгновенно. Их изменение к постоянным значениям, соответствующим действующей ЭДС, представляет собой некоторый переходный процесс. Чтобы проследить этот процесс от начала до конца, необходимо, чтобы он закончился до очередного изменения ЭДС, т. е. в течение одного полупериода напряжения генератора.

Определим период прямоугольных импульсов, вырабатываемых генератором.

Выполнение эксперимента. Соединить выход генератора с входом осциллографа. Включить приборы в сеть и дать им прогреться в течение нескольких минут. Ручками управления осциллографа добиться появления на экране сигнала, подобного изображенному

на рис. 1, а. Зарисовать в тетради наблюдаемую осциллограмму. Определить период сигнала, используя калибровку развертки осциллографа, и результат записать в тетради.

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕЗАРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР

Подавая на RC -цепь прямоугольные импульсы напряжения амплитудой U_0 , в действительности мы будем иметь дело с процессом перезарядки конденсатора от напряжения $U_C = U_0$ до напряжения $U_C = -U_0$.

Ток при перезарядке конденсатора изменяется по закону (рис. 1, б):

$$I = \pm (2U_0/R) \exp(-t/\tau). \quad (1)$$

Падение напряжения на резисторе по форме совпадает с током (рис. 1, в):

$$U_R = \pm 2U_0 \exp(-t/\tau). \quad (2)$$

Напряжение на конденсаторе (рис. 1, г)

$$U_C = \pm U_0(1 - 2e^{-t/\tau}). \quad (3)$$

В этих формулах знак «+» соответствует полупериоду положительного напряжения генератора. Время $\tau = RC$, в течение которого ток в цепи падает в e раз, называют временем релаксации.

Напряжение на резисторе

Монтаж экспериментальной установки. Необходимо собрать схему в соответствии с рис. 2, а. Конденсатор устанавливается на

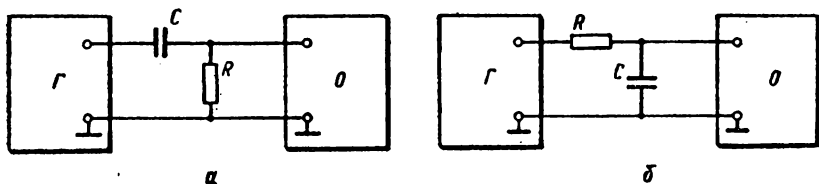


Рис. 2. Соединение исследуемых схем с приборами

монтажной панели, магазин сопротивлений подключается к соответствующим гнездам на этой панели. Величины емкости C и сопротивления R должны быть такими, чтобы постоянная RC -цепочки была меньше полупериода напряжения генератора в $3 \div 5$ раз.

Записать в тетради выбранные значения R и C .

Подключить к схеме выход генератора и вход Y осциллографа.

Включение установки и подготовка эксперимента. Включить приборы в сеть, прогреть их несколько минут. С помощью регулировок осциллографа добиться появления на экране сигнала, подобного изображенному на рис. 1, в.

Выполнение эксперимента. Зарисовать наблюдаемую осциллограмму напряжения $U_R(t)$, действующего на резисторе. Оценить

по осциллограмме величину τ . Изменить параметры R и C в сторону уменьшения ($\tau \ll T$) и в сторону увеличения ($\tau \gg T$). Записать в тетради новые значения R и C . Зарисовать соответствующие осциллограммы.

Напряжение на конденсаторе

Изменить схему в соответствии с рис. 2, б. Параметры R и C взять такими же, как и ранее, когда время релаксации было меньше полупериода напряжения генератора в $3 \div 5$ раз.

Зарисовать наблюдаемую осциллограмму напряжения $U_C(t)$, действующего на конденсаторе.

Оценить по осциллограмме величину τ .

Изменить параметры R и C в сторону уменьшения и затем в сторону увеличения τ , взяв такие же R и C , что и ранее в п. б) в этих случаях.

Зарисовать соответствующие осциллограммы.

К анализу результатов

Сопоставляя осциллограмму, наблюдавшуюся в п. а) при $\tau \ll T$, с формой напряжения, поступающего на RC -цепочку, можно заметить, что крутому перепаду входного напряжения соответствует острый всплеск выходного. Это примерно то, что должно быть при дифференцировании входного сигнала. Действительно, участку функции $U_{вх}(t)$, где она постоянна, соответствует нулевой выходной сигнал, а участку, где она резко изменяется, соответствует узкий сигнал большой амплитуды. Это сравнение можно подтвердить следующим анализом.

Ток в цепи

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C \frac{dU_C(t)}{dt}, \quad (4)$$

где $Q(t)$ — заряд на конденсаторе.

Напряжение, действующее на резисторе:

$$U_R(t) = RI(t) = RC \frac{dU_C(t)}{dt} = RC \frac{d}{dt} [U'_{вх}(t) - U_R(t)]. \quad (5)$$

Если

$$U_R(t) \ll U_{вх}(t), \quad (6)$$

то

$$U_R(t) = RC \frac{dU_{вх}(t)}{dt}. \quad (7)$$

Таким образом, при выполнении условия (6) выходной сигнал пропорционален производной от входного.

При сопоставлении осциллограммы, наблюдавшейся в п. б) при

$\tau \gg T$, с формой напряжения, поступающего на RC -цепочку, можно говорить об интегрировании входного сигнала. Действительно, каждому участку функции $U_{\text{вх}}(t)$, где она постоянна, соответствует линейно изменяющийся выходной сигнал, что должно быть при интегрировании. Анализ цепи подтверждает это.

Величина заряда Q на конденсаторе связана с током следующим образом:

$$Q(t) = \int I(t) dt. \quad (8)$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_C(t) = \frac{Q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int I(t) dt = \frac{1}{C} \int \frac{U_{\text{вх}}(t) - U_C(t)}{R} dt. \quad (9)$$

Если

$$U_C(t) \ll U_{\text{вх}}(t), \quad (10)$$

то

$$U_C(t) \simeq \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}}(t) dt. \quad (11)$$

Таким образом, при выполнении условия (10) выходной сигнал пропорционален интегралу от входного.

Возможность с помощью RC -цепочек выполнять операции дифференцирования и интегрирования подаваемого на них напряжения широко используется в радиотехнике.

Упражнение 3. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ В ZCR -КОНТУРЕ

Если постоянную ЭДС подключить к цепочке последовательно соединенных элементов L , C , R , то в такой цепи переходной процесс станет более сложным. При достаточно малом сопротивлении этой цепи переходный процесс будет носить колебательный характер:

$$I(t) = \frac{2U_0}{\omega L} e^{-\gamma t} \sin \omega t, \quad (12)$$

$$U_C(t) = U_0(1 - 2e^{-\gamma t} \cos \omega t), \quad (13)$$

где

$$\omega \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (14)$$

— частота собственных затухающих колебаний LCR -цепи, называемой резонансным контуром; $\gamma = R/2L$ — коэффициент затухания.

Переходный процесс имеет колебательный характер, если $\gamma < \omega$.

Степень затухания характеризуют логарифмическим декрементом:

$$\theta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n}, \quad (15)$$

где A_0 — амплитуда начального колебания, A_n — амплитуда n -го колебания.

Логарифмический декремент затухания связан с параметрами контура:

$$\theta = \frac{\pi R}{\sqrt{L/C}}. \quad (16)$$

Подготовка эксперимента

Для выбранных L и C вычислить величину сопротивления R , при котором в контуре будут иметь место колебания. Вычислить частоту собственных колебаний контура по формуле (14). Вычислить значение логарифмического декремента затухания, соответствующего выбранным параметрам контура.

В схему (см. рис. 2, б) между генератором и резистором включить катушку индуктивности.

Получить на экране осциллографа картину затухающих колебаний.

Выполнение эксперимента

Зарисовать цуг затухающих колебаний.

Измерив на экране осциллографа продолжительность t нескольких (n) колебаний, вычислить частоту этих колебаний:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{t}. \quad (17)$$

Измерив амплитуды двух удаленных друг от друга колебаний, определить по формуле (15) логарифмический декремент затухания.

Результаты измерений величин ω , γ сравнить с результатами предварительного расчета.

Изменив сопротивление R в 2—3 раза, зарисовать получающийся переходный процесс.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие токи называют квазистационарными?
2. Рассмотреть цепь последовательно включенных конденсатора C и резистора R , к которым подключается постоянная ЭДС. Записать закон Ома для этой цепи. Решить получившееся дифференциальное уравнение относительно тока $I(t)$ и напряжения на конденсаторе $U_C(t)$.
3. Показать, что через время $\tau = RC$ ток в рассматриваемой цепи спадает в e раз.
4. Нарисовать эпюры тока $I(t)$, напряжений $U_R(t)$ и $U_C(t)$ для

процесса зарядки (или перезарядки) конденсатора. Как они изменяются при изменении параметров R и C ?

5. Нарисовать схемы, с помощью которых изучаются переходные процессы.
6. Показать возможность дифференцирования (интегрирования) напряжения с помощью RC -цепочки.
7. Написать формулы, выражающие зависимость $I(t)$ и $U_C(t)$ в контуре. Нарисовать графики, выражающие эти зависимости.
8. Что такое логарифмический декремент затухания? Как он связан с параметрами контура?
9. Как с помощью осциллографа измеряются временные интервалы.
10. Как определяются время релаксации, логарифмический декремент затухания?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 23

АМПЛИТУДНЫЕ И ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Целью работы является изучение изменения амплитуды и фазы напряжения при прохождении переменного тока через простейшие цепи из R -, C -элементов.

Оборудование экспериментальной установки состоит из специальных монтажных плат с размещенными на них R - и C -элементами, магазина резисторов, генератора и осциллографа. Магазин представляет собой набор резисторов от 10 Ом до 10 кОм; генератор имеет параметры: выходное напряжение $0 \div 2$ В, диапазон частот 20 Гц — 10 кГц, выходное сопротивление 600 Ом; осциллограф позволяет наблюдать на экране сигналы в указанном диапазоне частот при чувствительности не хуже 2 мВ/см.

Методика измерений. В данной работе применяется осциллографический метод измерений амплитуды и фазы гармонического напряжения. Он заключается в следующем.

Если на входы Y и X осциллографа подать два гармонических напряжения одной частоты, но различающихся амплитудой и фазой:

$$U_x = U_{x0} \sin \omega t \text{ и } U_y = U_{y0} \sin (\omega t + \varphi), \quad (1)$$

то на экране осциллографа будет наблюдаться эллипс, уравнение которого имеет вид

$$\left(\frac{x}{x_0} \right)^2 + \left(\frac{y}{y_0} \right)^2 - \frac{2xy}{x_0 y_0} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (2)$$

Точки пересечения эллипса с осями координат:

$$y=0 \quad \left(\frac{x}{x_0}\right)^2 = \sin^2 \varphi \pm \frac{x}{x_0} = \sin \varphi, \quad (3)$$

$$x=0 \quad \left(\frac{y}{y_0}\right)^2 = \sin^2 \varphi \pm \frac{y}{y_0} = \sin \varphi.$$

Из выражений (3) видно, что, измеряя на экране осциллографа отрезки x и x_0 или y и y_0 , можно получить информацию о сдвиге фазы φ исследуемых напряжений. Если при прохождении каналов X и Y осциллографа исследуемые сигналы усиливаются одинаково, то можно измерить отношение амплитуд этих напряжений:

$$K = y_0/x_0. \quad (4)$$

Упражнение 1. ПРОСТАЯ RC -ЦЕПЬ

Изучаемая цепь изображена на рис. 1. К входным клеммам a и b подключен генератор, так что переменный ток протекает через последовательно соединенные элементы R и C . Нас будет интересоваться амплитуда и фаза выходного напряжения, снимаемого с конденсатора C .

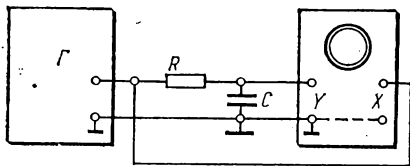


Рис. 1. Исследуемая RC -цепь

В ходе выполнения упражнения необходимо снять экспериментально зависимости амплитуды и фазы выходного напряжения RC -цепи от изменяемой величины R , а также рассчитать теоретически эти зависимости, исходя из известных параметров цепи C , R и частоты ω , на которой выполнен эксперимент.

Для рассматриваемой цепи амплитуды входного $U_1 = U_{10}e^{i\omega t}$ и выходного $U_2 = U_{20}e^{i\omega t + \varphi}$ напряжений связаны соотношением

$$U_{20} = U_{10} \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}, \quad (5)$$

и фазовый сдвиг выходного напряжения относительно входного определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = -\omega RC. \quad (6)$$

Монтаж экспериментальной установки

Собрать схему в соответствии с рис. 1. В качестве сопротивления R использовать магазин резисторов, а в качестве емкости C — конденсатор, расположенный на монтажной плате. Вход цепи соединяется с выходными клеммами генератора, выход цепи — с входом Y осциллографа, вход X осциллографа соединяется с входом цепи.

Включение установки и подготовка эксперимента

После проверки правильности всех соединений в схеме и исходных положений ручек управления приборов включить приборы в сеть. После прогрева приборов при произвольной величине сопротивления R на экране осциллографа должен наблюдаться эллипс. Изменяя величину сопротивления R , качественно проследить за изменением параметров эллипса.

При $R \rightarrow 0$ и $R \rightarrow \infty$ эллипс должен превратиться в прямые линии. Установить режим работы приборов, обеспечивающий наиболее удобное наблюдение эллипса.

Определить область изменения R , в которой происходят наиболее существенные изменения формы и ориентации эллипса (в этой области предстоит выполнить измерения). Определить шаг изменения R , обеспечивающий достаточно детальное снятие интересующих нас зависимостей.

Подготовить таблицу для занесения в нее величин y_0 , x_0 , y , x для каждого значения R . В таблице выделить строки (или столбцы) для величин $K_{\text{эксп}}$, $K_{\text{теор}}$, $\varphi_{\text{эксп}}$, $\varphi_{\text{теор}}$, которые будут вычислены для каждого значения R .

Выполнение измерений

Записать в рабочей тетради значения частоты и величины выходного напряжения генератора, при которых выполнен эксперимент.

Меняя R , измерить соответствующие значения y_0 , y , x_0 , x и занести их в таблицу.

Обработка результатов эксперимента

По результатам эксперимента для каждого значения R вычисляются значения коэффициента передачи напряжения исследуемой цепью $K_{\text{эксп}}$ (по формуле (4)) и фазового сдвига выходного напряжения относительно входного $\varphi_{\text{эксп}}$ (по формуле (3)). Теоретические значения коэффициента передачи $K_{\text{эксп}}$ и фазового сдвига $\varphi_{\text{эксп}}$ вычисляются на основании соотношений (5) и (6) по известным значениям величин ω , C и R . Все вычисленные таким образом величины помещаются в таблицу.

Экспериментальные зависимости $K_{\text{эксп}}(R)$ и $\varphi_{\text{эксп}}(R)$ и теоретические зависимости $K_{\text{теор}}(R)$ и $\varphi_{\text{теор}}(R)$ представляются также графически.

Упражнение 2. ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ

Здесь изучается цепь из RC -элементов (рис. 2, а), позволяющая получать выходное напряжение, сдвинутое относительно входного на угол $\varphi = 0 \div \pi$ при неизменной амплитуде выходного напряжения. Эта схема представляет собой четырехплечный мос-

тик (обычно $R_1=R_2$), в одну из диагоналей которого подается входное напряжение) $U_{вх}=U_0 \sin \omega t$, а с другой диагонали снимается выходное напряжение $U_{вых}=\frac{U_0}{2} \sin(\omega t+\varphi)$, сдвинутое по фазе относительно входного на угол

$$\varphi = -\arctg \frac{2\omega RC}{1-\omega^2 R^2 C^2}. \quad (7)$$

Как видно из этой формулы, при $R=0$ имеет место $\varphi=0$, при $R=1/\omega C$ $\varphi=-\pi/2$, а при $R \rightarrow \infty$ $\varphi \rightarrow -\pi$. Более наглядно это видно из анализа векторной диаграммы схемы фазовращателя (рис.

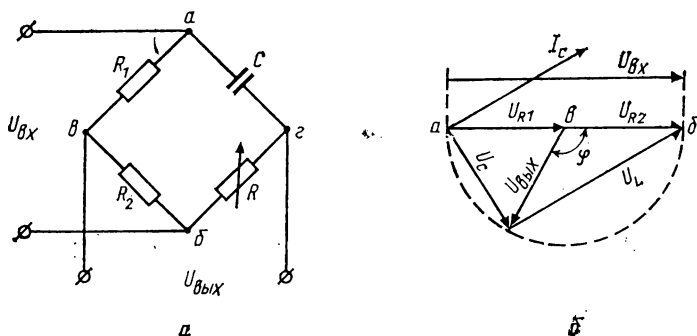


Рис. 2. Схема фазовращателя (а) и векторная диаграмма токов и напряжений в нем (б)

2, б). Отрезок ab изображает напряжение на входе фазовращателя $U_{вх}$, представленное суммой двух совпадающих по фазе напряжений U_{R1} и U_{R2} , действующих на резисторах R_1 и R_2 . Входное напряжение приложено и к правой ветви моста — цепочке CR . Напряжение U_C , действующее на конденсаторе, отстает по фазе на $\pi/2$ относительно напряжения U_R , действующего на переменном резисторе R , но в сумме векторы U_C и U_R , как указано выше, дают вектор $U_{вх}$. Таким образом, как бы ни изменялся вектор U_R при изменении сопротивления резистора R , угол между U_C и U_R будет всегда равен $\pi/2$, т. е. конец вектора U_C при этом перемещается по дуге полуокружности. Таким образом, при изменении R от 0 до ∞ вектор $U_{вых}$ меняет свою ориентацию относительно вектора $U_{вх}$ от $\varphi=0$ до $\varphi=-\pi$ при неизменности своего абсолютного значения.

Фазовращатель мостикового типа имеет недостаток, заключающийся в том, что у него вход и выход не имеют общей точки, что оказывается неудобным при включении такого фазовращателя в более сложную схему.

В ходе выполнения упражнения необходимо снять экспериментально зависимость $\varphi_{эксп}(R)$ фазы выходного напряжения изу-

чаемой цепи от изменяемой величины R , а также рассчитать эту зависимость теоретически, исходя из известных параметров цепи CR и частоты ω , на которой выполнен эксперимент.

Монтаж экспериментальной установки

Собрать схему в соответствии с рис. 3. В качестве сопротивления R использовать магазин резисторов, а в качестве конденсатора C и резисторов R_1 , R_2 — элементы, расположенные на специальной монтажной панели. Вертикальная (по схеме рис. 3) диагональ моста подключается к так называемому симметричному (незаземленному) выходу генератора, горизонтальная диагональ — к входу Y осциллографа, вход моста соединяется также непосредственно с пластинами X осциллографа.

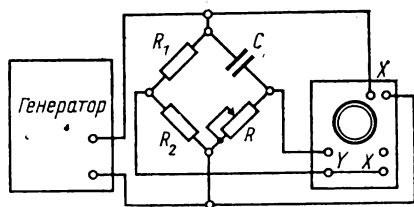


Рис. 3. Схема соединения фазовращателя с приборами

Подготовка эксперимента

При произвольной величине сопротивления R на экране осциллографа должен наблюдаться эллипс. Изменяя величину сопротивления R , качественно проследить за изменением параметров эллипса. При $R=0$ и $R \rightarrow \infty$ эллипс должен превращаться в прямые линии, наклоненные под углом 45° к вертикальной и горизонтальной осям на экране осциллографа.

Установить режим работы приборов, обеспечивающий наиболее удобное наблюдение эллипса.

Определить область изменения R , в которой происходят наиболее существенные изменения формы и ориентации эллипса (в этой области предстоит выполнить измерения). Определить шаг изменения R , обеспечивающий достаточно детальное снятие интересующих нас зависимостей.

Подготовить таблицу для занесения в нее величин R , y , y_0 , x , x_0 и предусмотреть место для величин $\varphi_{\text{эксп}}$, $K_{\text{эксп}}$, $\varphi_{\text{теор}}$, которые будут вычислены для каждого значения R .

Выполнение измерений

Записать в рабочей тетради значения частоты ω и величины выходного напряжения генератора, при котором будет выполнен эксперимент.

Меняя R , измерить соответствующие значения y , y_0 , x , x_0 и занести их в таблицу.

Обработка результатов эксперимента

По результатам эксперимента для каждого значения R вычисляются значения фазового сдвига $\varphi_{\text{эксп}}$ (по формуле (3)) и коэффициента передачи напряжения $K_{\text{эксп}}$ (по формуле (4)). Вычисляется также теоретическое значение фазового сдвига (по формуле (7)). Все вычисленные таким образом величины помещаются в таблицу.

Экспериментальная и теоретическая зависимости $\varphi_{\text{эксп}}(R)$ и $\varphi_{\text{теор}}(R)$ представляются графически.

Проанализировать полученные результаты.

Упражнение 3. ДВОЙНОЙ Т-МОСТ

Коэффициент передачи напряжения RC -цепью зависит не только от величины этих элементов, но также и от частоты переменного тока, проходящего по цепи. Это обстоятельство позволяет использовать RC -цепи в качестве частотных фильтров, т. е. устройств, которые пропускают (или не пропускают) ток в определенной области частот.

Следует отметить, что в качестве фильтров на низкие частоты колебательные LC -контуры не применяются, так как габариты необходимой катушки индуктивности становятся неприемлемыми, да и добротность таких контуров низкая. В этом случае используются избирательные свойства RC -фильтров.

Частотно-избирательные RC -системы широко применяются в современной радиотехнике. Уже простая RC -цепь является фильтром, что следует из ее частотной характеристики. Если подавать напряжение $U_{\text{вх}}$ на цепь RC , а снимать напряжение $U_{\text{вых}}$ или с резистора R , или с конденсатора C , то получится в одном случае фильтр напряжения низких, а в другом — высоких частот. Но такие фильтры довольно грубы.

Большой практический интерес представляет так называемый двойной T -мост из RC -элементов, применяемый в избирательных низкочастотных усилителях. Схема двойного T -моста представлена на рис. 4, а.

Составляющие его элементы R и C , действительно, образуют две буквы T . Такая цепь обладает частотной характеристикой, показанной на рис. 4, б. Из характеристики видно, что если менять частоту входного напряжения, подаваемого на двойной T -мост, при некоторой частоте $f_{\text{крит}}$ на выходе цепи напряжение должно отсутствовать, т. е. коэффициент передачи напряжения на этой частоте равен нулю. Двойной T -мост является заграждающим фильтром для частот, близких к частоте его настройки $f_{\text{крит}}$. При уменьшении и увеличении частоты входного сигнала относительно $f_{\text{крит}}$ коэффициент передачи возрастает, стремясь к единице на очень малых и очень больших частотах. Частотная характеристика двойного T -моста симметрична при логарифмическом масштабе частоты.

Анализ схемы двойного T -моста в общем виде довольно сложен. Рассматривая эту схему качественно, можно сказать, что передача напряжения на малых частотах осуществляется через активные сопротивления R_2 (так как сопротивления конденсаторов велики); на очень больших частотах передача напряжения осу-

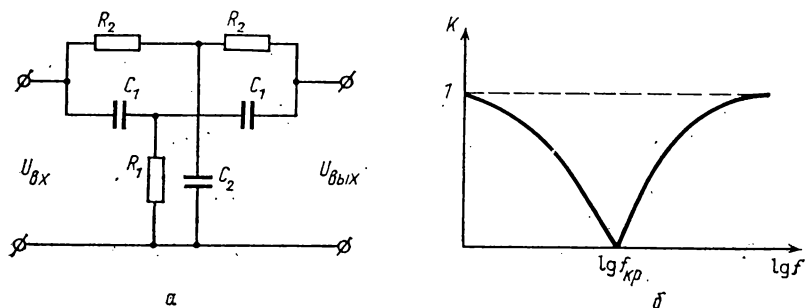


Рис. 4. Схема двойного T -моста (а) и его частотная характеристика (б)

ществляется через конденсаторы C_1 (их реактивные сопротивления малы).

Для симметричных мостов, применяемых на практике, между параметрами ветвей моста должны быть выполнены соотношения

$$C_2 = 2C_1, \quad R_2 = 2R_1, \quad (8)$$

которые соответствуют наибольшей избирательности.

Составляя уравнения Кирхгофа для схемы двойного T -моста и решая их относительно $U_{вх}$ и $U_{вых}$ для случая холостого хода симметричного моста ($U_{вых}$ подается на последующую схему, входное сопротивление которой бесконечно велико), комплексный коэффициент передачи \hat{K} получаем в виде

$$\hat{K} = \frac{1}{1 - i \frac{4\omega R_2 C_1}{1 - \omega^2 R_2^2 C_1^2}}. \quad (9)$$

Действительная часть K :

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{1 - \omega^2 R_2^2 C_1^2}{\sqrt{1 + 14\omega^2 R_2^2 C_1^2 + \omega^4 R_2^4 C_1^4}}. \quad (10)$$

Отсюда видно, что частота настройки моста

$$f_{\text{крит}} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}. \quad (11)$$

Изменяя параметры моста R и C , можно настроить его на разные частоты. Регулируя ширину пропускания путем изменения

соотношения между параметрами R и C , можно получать фильтры с различной избирательностью.

В ходе выполнения упражнения необходимо снять экспериментально зависимость коэффициента передачи моста $K_{\text{эксп}}$ от частоты входного напряжения f , а также рассчитать эту зависимость теоретически, исходя из известных параметров цепи C , R и частоты ω .

Монтаж экспериментальной установки

Собрать схему в соответствии с рис. 5. Схема моста смонтирована на специальной панели, и нужно только подключить к ней генератор и осциллограф.

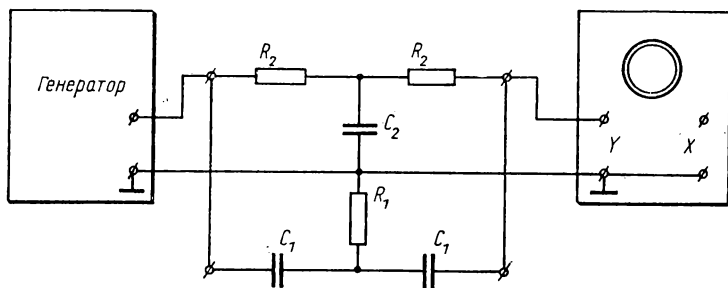


Рис. 5. Схема соединения двойного Т-моста с приборами

Подготовка эксперимента

При некотором напряжении генератора на экране осциллографа должен наблюдаться выходной сигнал исследуемой цепи (в виде синусоиды). Изменяя частоту генератора, качественно проследить за изменением величины выходного сигнала (при этом, поскольку нас интересует лишь амплитуда выходного сигнала, можно не обращать внимания на нарушение синхронизации развертки осциллографа и наложение синусоид друг на друга на экране).

Установить режим работы приборов, обеспечивающий наиболее удобное наблюдение выходного сигнала на различных частотах.

Убедиться в наличии частоты, при которой выходной сигнал практически обращается в нуль.

Определить область частот, в которой происходит наиболее существенное изменение амплитуды выходного сигнала. Определить шаг изменения частоты, обеспечивающий достаточно детальное снятие интересующей нас зависимости.

Подготовить таблицу для занесения в нее значений частоты генератора f и соответствующих величин выходного сигнала « u » (в делениях шкалы экрана осциллографа) и предусмотреть в ней

место для занесения величин коэффициента передачи $K_{\text{эксп}}$ и $K_{\text{теор}}$, которые будут вычислены для каждого значения f .

Выполнение измерений

Провод, идущий от входа y осциллографа к выходу моста, отсоединить от выхода моста и временно подсоединить его к входу моста, не нарушая соединения генератора с входом моста. При этом на экране осциллографа будет наблюдаться сигнал, величина которого $y_{\text{вх}}$ соответствует входному сигналу моста $U_{\text{вх}}$.

Режим работы генератора и осциллографа установить такими, чтобы сигнал на экране осциллографа был максимальным. Записать получившееся значение величины сигнала на экране осциллографа $y_{\text{вх}}$. В дальнейшем ни величину выходного напряжения генератора, ни чувствительность осциллографа не менять!

Снова подключить к входу осциллографа выход моста.

Измеряя величину сигнала на экране осциллографа y для каждой частоты генератора f , занести эти данные в таблицу.

Частоту настройки моста $f_{\text{крит}}$ можно определить более точно, если специально для этой цели (до или после снятия зависимости $y(f)$) увеличить чувствительность осциллографа в окрестности $f_{\text{крит}}$. Измеренное значение $(f_{\text{крит}})_{\text{эксп}}$ записать в рабочей тетради.

Обработка результатов эксперимента

По результатам эксперимента для каждого значения f вычисляется коэффициент передачи напряжения двойного T -моста:

$$K_{\text{эксп}} = \frac{y}{y_{\text{вх}}}. \quad (12)$$

Вычисляются также теоретические значения коэффициента передачи по формуле (10). Все вычисленные таким образом величины помещаются в таблицу.

Вычислить теоретическое значение $(f_{\text{крит}})_{\text{теор}}$ по формуле (11)..

Экспериментальные и теоретические зависимости $K_{\text{эксп}}(\lg f)$ и $K_{\text{теор}}(\lg f)$ представляются графически.

Проанализировать полученные результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие физические приближения делаются при анализе цепей переменного тока?
2. В чем заключается метод комплексных величин в теории переменных токов?
3. В чем заключается метод векторных диаграмм?
4. Вывести формулу для коэффициента передачи RC -цепи.
5. Вывести формулу для фазового сдвига выходного напряжения RC -цепи.

6. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для простой RC -цепи.
7. Построить векторную диаграмму токов и напряжений для фазовращателя.
8. В чем заключается осциллографический метод измерения амплитуд и фаз переменного напряжения?
9. Проанализировать источники ошибок осциллографического метода измерений.
10. Рассказать о подготовке приборов к работе. Указать основные меры техники безопасности при выполнении эксперимента.

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, § 48, 54, 55.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 218—220, 227, 228.

Лабораторная работа 24

РЕЗОНАНС В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: изучение установившихся вынужденных колебаний в цепях переменного тока. Изучение явления резонанса. Снятие амплитудных и фазовых характеристик цепей переменного тока.

Оборудование экспериментальной установки состоит из специальной монтажной панели, генератора, вольтметра и осциллографа. На панели размещены катушка индуктивности и наборы конденсаторов и резисторов с гнездами, позволяющими производить различные соединения. Индуктивность катушки в броневом ферритовом сердечнике СБ-5 составляет $20 \div 100$ мГн при $r = 20 \div 80$ Ом, набор резисторов $20 \div 200$ Ом, набор конденсаторов $0,001 \div 0,01$ мкФ. Генератор обеспечивает выходное напряжение до 30 В при выходном сопротивлении 50—600 Ом на частотах 1—10 кГц. Вольтметр ламповый с диапазонами измеряемого напряжения $1 \div 100$ В при выходном сопротивлении не менее 1 МОм. Осциллограф позволяет наблюдать на экране сигналы в указанном диапазоне частот при чувствительности не хуже 2 мВ/см.

Методика. В данной работе из элементов на панели собирается колебательный контур, который исследуется сначала в последовательном соединении с источником вынужденных колебаний, затем в параллельном. В качестве вынуждающей силы используется напряжение с генератора. При снятии амплитудной резонансной кривой измеряется напряжение на конденсаторе с помощью вольтметра. Фазовые соотношения исследуются с помощью осциллографа.

Упражнение 1. РЕЗОНАНСНАЯ КРИВАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Изучается цепь из последовательно соединенных конденсатора C , катушки индуктивности L и резистора R (см. рис. 1). Если в этой цепи течет квазистационарный гармонический ток, ее анализ может быть выполнен на основе закона Ома, применяемого к комплексным выражениям для напряжения, тока и сопротивления. Комплексное сопротивление рассматриваемой цепи (импеданс)

$$Z = R + i \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = |Z| e^{i\varphi}, \quad (1)$$

модуль импеданса

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}, \quad (2)$$

аргумент импеданса

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (3)$$

В соответствии с законом Ома, если на зажимах этой цепи действует напряжение

$$U = U_0 e^{-i\omega t}, \quad (4)$$

ток будет определяться выражением

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U_0}{|Z|} e^{i(\omega t - \varphi)}. \quad (5)$$

Аргумент импеданса φ представляет собой угол, на который ток I в цепи отстает от напряжения U .

Ток I , протекая по элементам цепи C , L и R , создает на них падение напряжения:

$$U_C = I Z_C = \frac{I}{i\omega C} = \frac{I_0}{\omega C |Z|} e^{i(\omega t - \varphi - \pi/2)}, \quad (6)$$

$$U_L = I Z_L = I i\omega L = \frac{U_0 \omega L}{|Z|} e^{i(\omega t - \varphi + \pi/2)}, \quad (7)$$

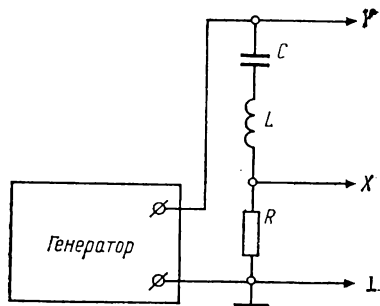


Рис. 1. Цепь из последовательно соединенных конденсатора, катушки индуктивности и резистора, соединенная с приборами для наблюдения фазовых соотношений

$$U_R = IR = \frac{U_0 R}{|Z|} e^{i(\omega t - \varphi)}. \quad (8)$$

Модуль импеданса, как это следует из выражения (2), на частоте, называемой резонансной:

$$\omega_{\text{рез}} \approx \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (9)$$

принимает минимальное значение, равное величине активного сопротивления контура R . Поэтому амплитуда тока в цепи на этой частоте максимальна. Максимальны при этом и амплитуды падений напряжения на активном сопротивлении R , емкости C и индуктивности L . Таким образом, ток в цепи последовательно соединенных элементов L , C и R , падения напряжения на этих элементах и полное сопротивление всей цепи имеют резонансный характер. Достижение амплитудами напряжений U_C и U_L , действующих соответственно на емкости и на индуктивности, максимальных значений на резонансной частоте и называют резонансом напряжений. Интересно, что при этом напряжения U_C и U_L оказываются в противофазе, следовательно, компенсируют друг друга. Таким образом, на резонансной частоте последовательный контур имеет чисто активное сопротивление, а падение напряжения на контуре определяется падением напряжения лишь на этом активном сопротивлении.

В экспериментальной части упражнения нас будет интересовать зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе от частоты, выражаемая соотношением

$$U_C^A = \frac{U_0}{\omega C |Z|}. \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &\text{На резонансной частоте} \\ U_{C_{\text{рез}}}^A &= Q U_0, \end{aligned} \quad (11)$$

где так называемая добротность контура

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (12)$$

На основании (11) можно сказать, что величина добротности контура показывает, во сколько раз напряжение на конденсаторе при резонансе превосходит напряжение, подаваемое к контуру.

Для контуров, добротность которых $Q \gg 1$, ее величину практически определяют как отношение резонансной частоты $\omega_{\text{рез}}$ к величине прилегающего к $\omega_{\text{рез}}$ частотного интервала $2\Delta\omega$, в пределах которого ток через контур (а также напряжения U_C , U_L , U_R или даже сопротивление Z) отличается от резонансного значения не более чем в $\sqrt{2}$ раз:

$$Q = \frac{\omega_{\text{рез}}}{2\Delta\omega}. \quad (13)$$

Величину $2\Delta\omega$ называют полосой пропускания контура.

В ходе выполнения упражнения необходимо снять экспериментально зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе контура U_C^A от частоты подаваемого на контур напряжения f , определить неизвестные параметры контура и рассчитать зависимость $U_C^A(f)$ теоретически.

Монтаж экспериментальной установки

К зажимам цепи (см. рис. 1) подсоединить низкоомный выход генератора. Вольтметр подсоединить к конденсатору. Катушка индуктивности L расположена на специальной монтажной плате. В качестве конденсатора C и резистора R необходимо взять элементы (пока произвольные) из наборов, также расположенных на этой плате.

Включение установки и подготовка эксперимента

Проверить правильность всех соединений в схеме и исходных положений ручек управления приборов, включить приборы в сеть и прогреть их в течение 10 мин.

Изменяя частоту напряжения генератора, обнаружить резонанс по показанию вольтметра. Оценить добротность контура по формуле (11).

Установить режим работы приборов, обеспечивающий наиболее удобную регистрацию резонансной кривой. Меняя элементы C и R , подобрать их таким образом, чтобы резонансная зависимость $U_C(f)$ для получающегося контура была удобной для измерений (не слишком «острой» и не слишком «тупой»).

Определить область изменения частоты генератора f , в которой происходит наиболее существенное изменение величины U_C^A , определить шаг изменения f , обеспечивающий достаточно детальное снятие интересующей нас зависимости.

Подготовить таблицу для занесения в нее величин f , U_C^A . Предусмотреть в таблице место для величин $(U_C^A)_{\text{рез}}$, которые будут вычислены для каждого значения f при математической обработке эксперимента.

Выполнение измерений

Записать в рабочей тетради значение емкости конденсатора C и сопротивления резистора R , входящих в исследуемый контур, а также величину выходного напряжения генератора $U_{\text{ген}}$, действующего на контуре (по прибору на лицевой панели генератора). Это напряжение в ходе снятия резонансной кривой должно быть стабильным, что необходимо контролировать и в случае необходимости подправлять.

Изменяя частоту генератора, снять зависимость $U_C^A(f)$, занося данные в таблицу.

Обработка результатов эксперимента

Экспериментально полученные значения напряжения на конденсаторе U_C^A и частоты f представить графически.

Прежде чем проводить линию, найдем параметры уравнения такой линии, которая удовлетворяет экспериментальным точкам наилучшим образом в смысле метода наименьших квадратов, т. е. чтобы была минимальна сумма квадратов расстояний от экспериментальных точек до линии на всем ее протяжении.

Формула, связывающая амплитуду напряжения на конденсаторе U_C^A с частотой $\omega = 2\pi f$ этого напряжения, имеет вид

$$U_C^A = \sqrt{\frac{U_{\text{рез}}^2}{\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{рез}}}\right)^2 + \left[\left(\frac{\omega}{\omega_{\text{рез}}}\right)^2 - 1\right]^2 Q^2}}. \quad (14)$$

Она легко приводится к виду

$$Y = AX^2 + BX + C, \quad (15)$$

если положить

$$\begin{aligned} A &= (Q/U_{\text{рез}} \cdot \omega_{\text{рез}}^2)^2, \\ B &= (1 - 2Q^2)/(U_{\text{рез}} \cdot \omega_{\text{рез}})^2, \\ C &= (Q/U_{\text{рез}})^2, \\ X &= \omega^2, \\ Y &= (1/U_C)^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Значения коэффициентов A , B , C находятся с помощью метода наименьших квадратов с использованием экспериментальных значений ω и U_C .

Расчет выполняется на ЭВМ.

Из соотношений (16) находятся резонансная частота $\omega_{\text{рез}}$, добротность Q и резонансное значение напряжения на конденсаторе $(U_C^A)_{\text{рез}}$:

$$\begin{aligned} \omega_{\text{рез}} &= \sqrt[4]{C/A}, \\ Q &= \sqrt{C/(B\omega_{\text{рез}}^2 + 2C)}, \\ U_{\text{рез}} &= Q/\sqrt{C}. \end{aligned} \quad (17)$$

По найденным значениям коэффициентов A , B и C ЭВМ вычисляет по формуле (15) значения $Y_{\text{теор}}$ и затем значения $U_{C \text{ теор}}$ для каждого значения X , т. е. ω . Результаты этого расчета заносятся в таблицу.

По этим данным на графике, где уже нанесены экспериментальные точки (U_C^A, f) , проводится линия через точки $(U_{C \text{ теор}}, f)$. Эта линия и является резонансной кривой исследованного контура. Описанный выше расчет на ЭВМ позволил нам провести эту линию наилучшим образом.

Записать в тетради вычисленные на ЭВМ значения $\omega_{рез}$, Q и $U_{рез}$, а также параметры катушки индуктивности.

По графику определить полосу пропускания контура $2\Delta\omega$ и добротность Q , используя соотношение (13).

Сравнить значения добротности контура, полученные путем расчета методом наименьших квадратов и графически.

Проанализировать полученные результаты.

Упражнение 2. ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Изучается фазовый сдвиг φ между напряжением, действующим на контуре (см. формулу (4)), и током, протекающим через контур (см. формулу (5)). Этот сдвиг описывается соотношением (3).

В ходе выполнения упражнения необходимо экспериментально снять зависимость фазового сдвига от частоты переменного напряжения f . Указанная зависимость снимается осциллографическим методом.

Монтаж экспериментальной установки

Собрать схему в соответствии с рис. 1. R , C , L -элементы остаются те же, что и в предыдущем упражнении. Напряжение, снимаемое с резистора R и подаваемое на вход X осциллографа, пропорционально току, протекающему через контур. На вход Y осциллографа подается напряжение, действующее на контуре.

Подготовка эксперимента

Установить частоту генератора, близкую к резонансной. Органы управления приборов установить так, чтобы эллипс на экране осциллографа был наиболее удобным для измерений.

Определить область изменения частоты генератора f , в которой происходит наиболее существенное изменение формы и ориентации эллипса. Определить шаг изменения частоты f , обеспечивающий достаточно детальное снятие интересующей нас зависимости.

Подготовить таблицу для занесения в нее значений частоты f , параметров эллипса y и y_0 (см. описание лабораторной работы 23). Предусмотреть в таблице место для значений фазового сдвига $\varphi_{эксп}$, вычисляемого по формуле

$$\varphi = \pm \arcsin \frac{y}{y_0}, \quad (18)$$

а также для значений $\varphi_{теор}$, вычисляемых в ходе математической обработки результатов эксперимента.

Выполнение измерений

Меняя частоту генератора вокруг резонансного значения, наблюдать изменения формы и ориентации эллипса. Зарисовать эллипс для случаев $f < f_{\text{рез}}$, $f = f_{\text{рез}}$ и $f > f_{\text{рез}}$.

Снять по точкам зависимость $y(f)$, где y — половина отрезка вертикальной оси, заключенного внутри эллипса на экране осциллографа.

Записать в рабочей тетради значение y_0 — половины вертикального размера эллипса.

Обработка результатов эксперимента

Используя экспериментально полученные значения y и y_0 , вычислить по формуле (18) величину фазового сдвига $\varphi_{\text{эксп}}$ для каждого значения f . Обратить внимание, что при переходе через резонансное значение частоты исследуемый фазовый сдвиг меняет знак. Результаты расчета занести в таблицу.

Экспериментально полученные пары значений $\varphi_{\text{эксп}}$ и f представить графически.

Прежде чем проводить кривую зависимости $\varphi_{\text{эксп}}(f)$, найдем уравнение кривой, которая удовлетворяет экспериментальным точкам наилучшим образом в смысле метода наименьших квадратов.

Зависимость между φ и ω описывается соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R_L + R}, \quad (19)$$

где R_L — активное сопротивление катушки индуктивности, R — резистор, включенный в контур. Эта зависимость может быть преобразована к линейному виду

$$Y = A + BX \quad (20)$$

следующей заменой переменных:

$$\begin{aligned} X &= \omega^2, \\ Y &= \omega \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned} \quad (21)$$

При этом

$$\begin{aligned} A &= -Q\omega_{\text{рез}}, \\ B &= Q/\omega_{\text{рез}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Теперь можно методом наименьших квадратов найти такие значения коэффициентов A и B , что сумма квадратов отклонений значений y , вычисленных по формуле (20), от значений $y_{\text{эксп}}$, вычисленных по формуле (21) с использованием экспериментально найденных величин ω и φ , будет минимальна, т. е. линия, описываемая уравнением (20), оказывается наилучшей, удовлетворяющей экспериментальным точкам при их преобразовании к виду

(21). По-видимому, линия, соответствующая зависимости между φ и f в первоначальном виде (19), при этом также будет наилучшей для экспериментальных точек (φ, f).

Программа для ЭВМ составлена таким образом, что при введении в нее массивов экспериментальных значений y, y_0 и f ЭВМ находит коэффициенты A и B , вычисляет значения $\varphi_{\text{теор}} = y$ (по формуле (20)) для каждого значения частоты f , вычисляет параметры контура $f_{\text{рез}}$ и Q .

Вычисленные ЭВМ значения $\varphi_{\text{теор}}$ занести в таблицу. Записать в рабочей тетради вычисленные ЭВМ значения $f_{\text{рез}}$ и Q .

На графике, где нанесены экспериментальные точки (φ, f), провести линию через точки ($\varphi_{\text{теор}}, f$).

Проанализировать полученные результаты.

Упражнение 3. ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ И ДОБРОТНОСТИ КОНТУРА ОТ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Зависимости $f_{\text{рез}}(C)$ и $Q(C)$ выражаются формулами

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (23)$$

$$Q = \frac{1}{R + R_L} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (24)$$

Формулы (23), (24) позволяют по измеренным значениям резонансной частоты $f_{\text{рез}}$ и добротности контура Q и известным значениям контура C и сопротивления резистора R вычислить неизвестные параметры контура: индуктивность L и активное сопротивление R_L катушки индуктивности.

Можно значительно повысить точность определения L и R_L , если для этой цели воспользоваться результатами измерений величин $f_{\text{рез}}$ и Q при разных значениях C . Это целесообразно сделать следующим образом. Как видно из формул (23) и (24), если в качестве аргумента рассматривать величину $1/\sqrt{C}$, то $f_{\text{рез}}(1/\sqrt{C})$ и $Q(1/\sqrt{C})$ оказываются линейными функциями:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}} \frac{1}{\sqrt{C}}, \quad (25)$$

$$Q = \frac{\sqrt{L}}{R + R_L} \frac{1}{\sqrt{C}}. \quad (26)$$

Таким образом, если экспериментально снять зависимости $f_{\text{рез}}(C)$ и $Q(C)$ и построить графики $f_{\text{рез}}(1/\sqrt{C})$ и $Q(1/\sqrt{C})$, то тангенсы углов наклона полученных прямых и будут коэффициентами уравнений (25), (26):

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L}} = \text{tg } \alpha, \quad \frac{\sqrt{L}}{R + R_L} = \text{tg } \beta. \quad (27)$$

Из этих соотношений следует

$$L = \frac{1}{4\pi^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}, \quad R_L = \frac{1}{2\pi \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta} R. \quad (28)$$

В ходе выполнения упражнения экспериментально снимаются зависимости $f_{\text{рез}}(C)$ и $Q(C)$ и путем их математической обработки вычисляются значения L и R_L .

Монтаж экспериментальной установки

Собрать схему в соответствии с рис. 2, исключив резистор R , чтобы все исследуемые контуры имели большую добротность. Конденсатор C — любой из имеющихся в наборе.

Подготовка эксперимента

Подготовить таблицу для занесения в нее величин емкости C конденсаторов, включенных в контур, значений экспериментально определяемой резонансной частоты $f_{\text{рез}}$ контура для каждого конденсатора и значений напряжения на конденсаторе U_C^A в момент резонанса, измеряемых также для каждого конденсатора. Предусмотреть в таблице место для значений $1/\sqrt{C}$, вычисляемых для каждого конденсатора, значений добротности Q , также вычисляемых для каждого конденсатора.

Выполнение измерений

Меняя конденсаторы, включенные в контур, для каждого из них найти и измерить (по лимбу генератора) резонансную частоту $f_{\text{рез}}$, а также резонансное значение напряжения на конденсаторе. Результаты измерений занести в таблицу.

Записать в рабочей тетради величину напряжения $U_{\text{ген}}$, подаваемого на контур с генератора. В ходе эксперимента поддерживать ее стабильной.

Выполнить эти измерения для всех конденсаторов, имеющихся на панели.

Обработка результатов эксперимента

Для каждого конденсатора вычислить величину $1/\sqrt{C}$. Для контуров с разными конденсаторами вычислить добротность по формуле

$$Q = \frac{(U_C^A)_{\text{рез}}}{U_{\text{ген}}} \quad (29)$$

(см. формулу (11)). Результаты этих вычислений занести в таблицу.

Зависимость $f_{\text{рез}}(1/\sqrt{C})$ и $Q(1/\sqrt{C})$ представить графически в

виде экспериментально найденных точек $(f_{\text{рез}}, 1/\sqrt{C})$, $(Q, 1/\sqrt{C})$. По этим точкам можно провести прямые линии, которые и будут изображать экспериментально найденные зависимости. Обычно это делают «на глазок». Но чем больше разброс экспериментальных точек, тем больше ошибка в определении наклона проводимых линий.

Обоснуем наклон проводимых линий математически. Найдем уравнение таких прямых линий, которые проходят через множество экспериментальных точек наилучшим образом в смысле метода наименьших квадратов:

$$f_{\text{рез}} = AX, \quad Q = BX, \quad (30)$$

где

$$A = \frac{1}{2\pi\sqrt{L}}, \quad B = \frac{\sqrt{L}}{R + R_L}, \quad X = \frac{1}{\sqrt{C}}. \quad (31)$$

Коэффициенты A и B находятся с помощью расчета на ЭВМ для экспериментально измеренных множеств точек $(f_{\text{рез}}, C)$ и (Q, C) .

После расчета на ЭВМ на графике зависимостей $f_{\text{рез}}(1/\sqrt{C})$ и $Q(1/\sqrt{C})$, где нанесены экспериментальные точки, следует провести прямые линии, проходящие через начало координат под найденными путем расчета углами наклона α и β к оси $1/\sqrt{C}$:

$$\alpha = \arctg(1/2\pi\sqrt{L}),$$

$$\beta = \arctg(\sqrt{L}/(R + R_L)). \quad (32)$$

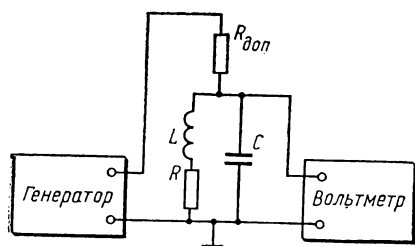


Рис. 2. Соединение исследуемой цепи с приборами для исследования зависимости резонансной частоты и добротности контура от емкости конденсатора

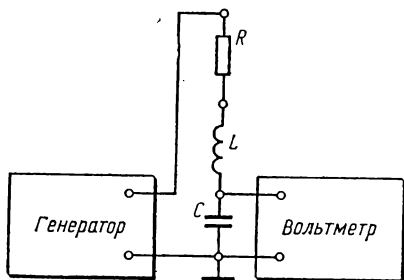


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования параллельного контура

Значения углов α и β , выдаваемых ЭВМ после расчета, следует записать в рабочей тетради. Записать также величины L и R_L , вычисляемые ЭВМ по формулам (28).

Проанализировать полученные результаты.

Упражнение 4. РЕЗОНАНС В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ КОНТУРЕ

Рассмотрим цепь, схема которой изображена на рис. 3. Модуль импеданса такого контура

$$|Z| = \frac{\gamma R Q^2}{\sqrt{(1 - \gamma^2) Q^2 + \gamma^2}}, \quad (33)$$

где $\gamma = \omega / \omega_{\text{рез}}$ относительно частоты ω имеет резонансный характер и при $\gamma = 1$ достигает максимального значения:

$$|Z|_{\text{макс}} = Q^2 R. \quad (34)$$

При этом ток, протекающий через контур, будет минимальным, но внутри контура, в индуктивной и емкостной его ветвях будут протекать токи, амплитуда которых в Q раз больше тока, протекающего через контур. Это явление и называют резонансом токов.

В ходе выполнения упражнения необходимо экспериментально снять зависимость напряжения на контуре от частоты протекающего через него тока, неизменного по амплитуде.

Монтаж экспериментальной установки

Собрать схему в соответствии с рис. 3. В качестве элементов контура L , C , R следует взять те же элементы, что и при изучении последовательного контура в упражнении 1. $R_{\text{доп}}$ — резистор с большим сопротивлением, расположенный отдельно на монтажной плате специально для выполнения этого упражнения, он обеспечивает постоянство амплитуды тока через контур при изменении частоты напряжения генератора.

Как было сказано выше, модуль импеданса контура меняется по резонансному закону (33), а так как ток через контур постоянен по амплитуде, то падение напряжения на контуре U_C , измеряемое вольтметром, будет по закону Ома также изменяться по резонансному закону.

Подготовка эксперимента

Меняя частоту напряжения генератора, обнаружить резонанс. Установить органы управления генератора и вольтметра таким образом, чтобы было удобно измерять напряжение U_C при изменении частоты генератора. Определить область частот, в которой происходит наиболее существенное изменение U_C при изменении f , определить шаг изменения f , обеспечивающий достаточно детальное измерение зависимости $U_C(f)$.

Подготовить таблицу для занесения в нее значений частоты f , напряжения U_C .

Выполнение измерений

Записать в рабочей тетради значения емкости конденсатора C и сопротивления резистора R , входящих в контур, сопротивление резистора $R_{\text{доп.}}$. Записать также значение напряжения $U_{\text{ген.}}$, подаваемого на контур с генератора.

Изменяя частоту напряжения генератора f , снять зависимость $U_c(f)$, занося данные в таблицу.

Обработка результатов измерений

Построить график зависимости $U_c(f)$. Определить по графику значения резонансной частоты $f_{\text{рез.}}$, полосы пропускания контура $2\Delta f$ и добротности контура Q .

Проанализировать полученные результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Начертить схему последовательного (параллельного) контура. Объяснить процессы, протекающие в контуре при подключении к нему источника переменного напряжения.
2. Каким образом описывается сопротивление контура переменному току?
3. Каково соотношение резонансного сопротивления контура и его активного сопротивления?
4. Как изменяется сопротивление контура с изменением частоты подключенного к нему переменного напряжения? Как при этом изменяется амплитуда тока, протекающего через контур? Соответствующие зависимости изобразить графически.
5. Как изменяются напряжения, действующие на элементах R , L , C в последовательном контуре при изменении частоты питающего контур напряжения?
6. Как собственная частота контура зависит от его параметров?
7. Как добротность контура зависит от его параметров?
8. Как добротность контура определяется по резонансным кривым?
9. Каковы фазовые соотношения между напряжениями и токами в последовательном и параллельном контурах?
10. Каким образом в задаче исследуются фазовые соотношения?
11. Из каких соображений выбирается выходное сопротивление генератора?
12. С какой точностью производится отсчет частоты генератора?
13. В чем заключается метод наименьших квадратов обработки результатов измерений?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, § 50.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 217—221, 224, 225, 227, 288.

Лабораторная работа 25

ИЗМЕРЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА МОСТОВЫМИ МЕТОДАМИ

Цель работы — измерение параметров цепей переменного тока (сопротивления, индуктивности и емкости) с помощью мостовых схем.

Оборудование экспериментальной установки состоит из специальной панели с расположенными на ней калиброванными резисторами ($R=1,00$ кОм), магазина емкостей ($C=0,001-0,1$ мкФ), магазина сопротивлений $R=0,01 \div 10\,000$ Ом, генератора и осциллографа. Генератор позволяет получать гармоническое напряжение частотой $200 \div 2000$ Гц при амплитуде $0 \div 3$ В. Осциллограф имеет чувствительность по каналам Y и X не хуже 3 мВ/см. Из этих элементов в работе собираются четырехплечный мост и T -мост.

Методика измерений заключается в использовании мостовых схем с применением осциллографа в качестве индикатора их баланса.

Для измерительных целей в современной лабораторной практике наибольшее распространение получили так называемые четырехплечные и T -образные мостовые схемы (рис. 1).

Сопротивления плеч моста могут иметь любой характер, т. е. содержать индуктивность, емкость или быть чисто активными.

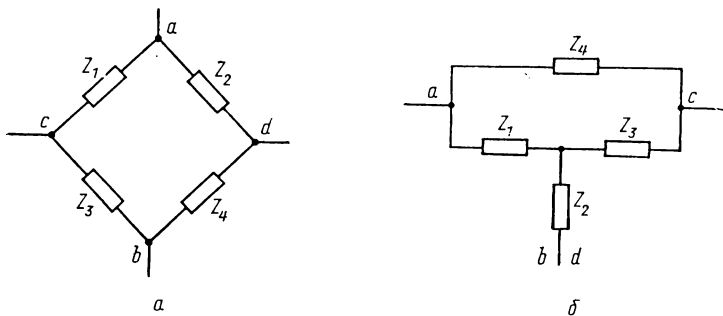


Рис. 1. Схемы четырехплечного (а) и T -образного (б) мостов

Для четырехплечного моста напряжение U_2 связано с напряжением U_1 и комплексными сопротивлениями Z_i соотношением

$$U_2 = U_1 \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - U_1 \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} = U_1 \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}. \quad (1)$$

Обычно вводят в рассмотрение коэффициент передачи схемы, равный отношению выходного напряжения к входному. Для рассматриваемой схемы четырехплечного моста

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}. \quad (2)$$

Коэффициент передачи T -образной мостовой схемы

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)}. \quad (3)$$

Мостовые схемы замечательны тем, что при определенном соотношении между их элементами Z_i выходное напряжение оказывается равным нулю. Схему при этом называют сбалансированной, уравновешенной. Условие баланса для четырехплечного моста имеет вид

$$Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3 = 0, \quad (4)$$

а для T -образного —

$$Z_1 Z_3 + (Z_1 + Z_3 + Z_4) Z_2 = 0. \quad (5)$$

Условие баланса моста, записанное в комплексной форме, распадается на два уравнения равновесия: для амплитуд и для фаз. Эти два уравнения показывают характерное отличие мостов переменного тока от мостов постоянного тока. Для достижения равновесия мостов переменного тока необходимо регулировать не менее двух параметров схемы, чтобы выполнить оба условия равновесия.

Измерение величин R , L и C с помощью мостовой схемы заключается в том, что неизвестный элемент включается в одно из плеч моста, затем подбором других элементов моста достигается его баланс, и из балансных условий вычисляется величина неизвестного элемента. Мостовые схемы, балансные условия для которых зависят от частоты, могут быть использованы для измерения частоты напряжения U_1 .

Обычно два элемента четырехплечного моста являются чисто активными калиброванными сопротивлениями. Так, в схеме на рис. 1, а $Z_1 = R_1$ и $Z_2 = R_2$. Для измерения чисто активного сопротивления $Z_3 = R_x$ надо и последний элемент мостовой схемы взять в виде активного сопротивления, т. е. $Z_4 = R_4$. Если же измеряемое сопротивление комплексное, Z_x , то для достижения баланса надо в одно из плеч моста включить калиброванное комплексное сопротивление Z_K . Каким именно образом следует разместить Z_x и Z_K в плечах моста? Ответ на этот вопрос даст анализ балансного условия. Если характер реактивных элементов Z_x и Z_K одинаков (емкостной или индуктивный), они должны стоять в смежных плечах (Z_1 и Z_2 или Z_3 и Z_4 , либо Z_1 и Z_3 или Z_2 и Z_4) (см. рис. 1, а). Когда же характер реактивных элементов Z_x и Z_K разный, они должны стоять в противоположных плечах (Z_1 и Z_4 или Z_2 и Z_3).

На рис. 2 представлена одна из мостовых схем, служащая для измерения импеданса с реактивным элементом того же рода, какой стоит в одном из плеч моста. Баланс этой схемы имеет место при выполнении условий

$$R_1 \left(r_4 + \frac{C_3}{C_4} r_3 \right) - R_2 r_3 = 0, \quad (6)$$

$$\omega^2 r_3 r_4 - \frac{1}{C_3 C_4} = 0. \quad (7)$$

Обычно генераторы, осциллографы и другие приборы имеют так называемый несимметричный вход (выход), т. е. одна из двух клемм входа (выхода) соединена с общим «минусом» схемы (корпусом прибора, «землей»). Вход и выход четырехплечной мостовой схемы не имеют общей точки, поэтому одновременное подсоедине-

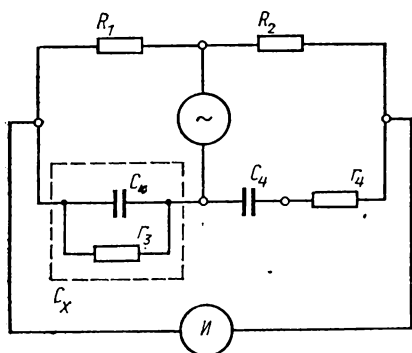


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для изучения четырехплечного моста

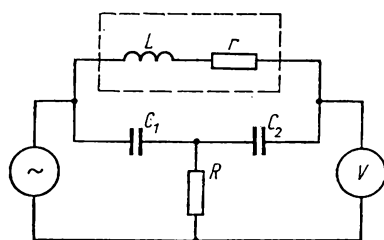


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для изучения T-образного моста

ние к ней генератора с несимметричным выходом и индикатора с несимметричным входом невозможно. От этого недостатка свободны T-образные схемы, одна из которых приведена на рис. 3. Балансные условия этой схемы имеют вид

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} = \omega^2 L, \quad (8)$$

$$\frac{1}{Rr} = \omega^2 C_1 C_2. \quad (9)$$

При протекании переменного тока через реальный конденсатор всегда имеют место потери энергии (утечка).

Поэтому обычно реальный конденсатор с диэлектриком представляют эквивалентной схемой в виде идеальной емкости с последовательно (или параллельно) соединенным активным сопротивлением, обуславливающим возникновение эквивалентных потерь. Для измерения емкости конденсатора с большими потерями применяют параллельную схему соединения C и $r_{\text{парал.}}$. Делают это потому, что введение последовательно в плечо большого сопротивления ослабляет ток через индикатор и уменьшает чувст-

вительность схемы. Если утечка небольшая, то эти два представления реального конденсатора эквивалентны. Для технических конденсаторов утечку характеризуют величиной тангенса угла потерь, который для последовательной схемы замещения равен

$$\operatorname{tg} \delta = \omega r_3 C_3,$$

здесь δ — угол, дополняющий до 90° угол φ — сдвига тока относительно напряжения в цепи реального конденсатора.

О точности измерений. Достоверность результата измерений на мостовых схемах зависит не только от класса точности калиброванных элементов схемы и от роли паразитных распределений емкостей и индуктивностей, но также и от чувствительности схемы в определении баланса. Чувствительность проявляется в степени изменения коэффициента передачи K с изменением любого параметра схемы вблизи равновесия моста. Отсюда видно, что чувствительность схемы можно увеличить, уменьшая знаменатель в выражениях (2), (3).

Характер зависимости коэффициента передачи K от любого параметра схемы (или частоты генератора) вблизи равновесия моста показан на рис. 4. Если в качестве изменяемого параметра

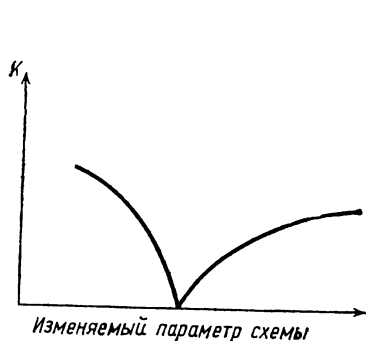


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи моста от какого-либо параметра схемы

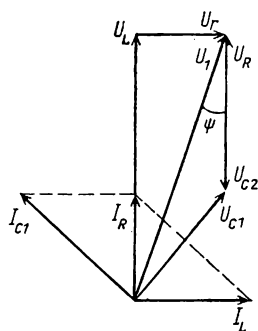


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений и токов T-образной мостовой схемы (см. рис. 3) в сбалансированном состоянии

схемы рассматривать частоту ω напряжения, подаваемого на вход моста, то мост представляет собой избирательный частотный фильтр.

В мостовой схеме типа представленной на рис. 2 с постоянными калиброванными сопротивлениями R_1 и R_2 , на погрешность результата измерения влияет отношение R_1/R_2 . Можно показать, что эта погрешность будет минимальна при $R_1 = R_2$.

Фазовые соотношения в мостовых схемах. Анализ электрических цепей с использованием метода векторных диаграмм в ряде случаев проще аналитического исследования. На рис. 5 построена векторная диаграмма напряжений и токов T -образной мостовой схемы, представленной на рис. 3 (в сбалансированном состоянии) фазовые сдвиги между напряжениями и токами определенным образом связаны с параметрами электрической схемы. Следовательно, измеряя фазовые сдвиги, можно определить соответствующие неизвестные параметры схемы. Из векторной диаграммы рис. 5 следует, что сдвиг фаз ψ между напряжением U_1 на входе схемы и напряжением U_R , действующим на сопротивлении R , определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{U_r}{U_L} = \frac{r}{L\omega}. \quad (10)$$

Это соотношение, конечно, может быть получено и аналитическим методом, но гораздо сложнее.

Упражнение 1. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА И СОПРОТИВЛЕНИЯ УТЕЧКИ

Собрать схему четырехплечного моста (см. рис. 2), где в качестве R_1 и R_2 взять калиброванные сопротивления, расположенные на специальной плате, в качестве C_4 и r_4 — магазин емкости и сопротивления, C_x — неизвестный конденсатор, который представлен эквивалентной схемой, включающей в себя идеальный конденсатор C_3 и параллельное сопротивление утечки r_3 . Поставить декады на магазине емкостей в среднее положение. На магазине сопротивлений ввести предварительно некоторое сопротивление (несколько десятков ом). Переменное напряжение частоты $200 \div 300$ Гц подать на схему с симметричного выхода генератора. В качестве индикатора I использовать осциллограф.

Включить генератор и осциллограф.

Подбирать поочередно значения C_4 и r_4 , начиная с грубых отсчетов, со все возрастающей точностью, для чего следует увеличивать коэффициент усиления осциллографа, получить на экране минимальный сигнал при максимальной чувствительности.

Записать в рабочей тетради значения ω , C_4 и r_4 , соответствующие балансу моста.

Используя соотношения (6) и (7), вычислить емкость C_3 неизвестного конденсатора и его сопротивления утечки r_3 .

Упражнение 2. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ Z И АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ r КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Собрать схему T -образного моста (см. рис. 3), где в качестве C_2 взять калиброванный конденсатор, в качестве C_1 и R — магазин емкости и сопротивления, а неизвестную катушку индук-

тивности включить в ветвь схемы, в которой стоят индуктивность L и сопротивление r . Сопротивления утечки конденсаторов C_1 и C_2 пренебрежимо малы. Переменное напряжение подать на схему с симметричного выхода генератора. Далее, так же как и в упр. 1, используя в качестве индикатора осциллограф, сбалансировать схему. Балансировку моста начать с подбора частоты генератора, при которой имеет место минимум выходного сигнала. Затем подбирать поочередно значения C_1 и R , добиваясь еще более глубокого минимума. Записать значения частоты и балансные значения C_1 и R , вычислить L и r .

Упражнение 3. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ В МОСТОВОЙ СХЕМЕ

Используя осциллограф, проверить равенство и противофазность напряжений U_R на резисторе R и U_{C_2} на конденсаторе C_2 сбалансированного моста. Для этого напряжения U_R и U_{C_2} подать соответственно на входы Y и X осциллографа (рис. 6). На экране осциллографа при этом должна наблюдаться прямая наклонная линия. Не изменяя балансных значений C_1 и R , проверить равенство и противофазность напряжений U_R и U_{C_2} для сбалансированного моста. Вычислить величину активного сопротивления катушки r , используя ранее найденное значение индуктивности L , а также значение ω (формула (10)).

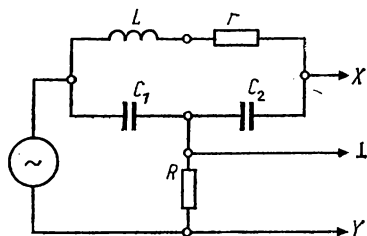


Рис. 6. Схема для наблюдения фазовых соотношений в T -образном мосте

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего используются мостовые схемы в практике физических измерений?
2. В чем заключаются достоинства и недостатки различных мостовых схем?
3. Записать условие баланса четырехплечного моста переменного тока в общем виде (в комплексной форме). Получить из него отдельно условия для амплитуды и фаз.
4. Объяснить, почему однотипные сопротивления нужно включать в прилегающие плечи четырехплечного моста, а разнотипные — в противоположные.
5. Как записать в комплексной форме сопротивление конденсатора с утечкой? Показать эквивалентность представления утечки

параллельным и последовательным сопротивлениями. Какими соотношениями связаны эквивалентные сопротивления утечки в параллельной и последовательной схемах?

6. В чем различие условий равновесия моста на постоянном и переменном токе?
7. Какие приборы могут быть использованы для регистрации уравновешенности моста?
8. Нарисовать векторную диаграмму напряжений и токов для участка цепи, содержащего конденсатор с утечкой, индуктивность с активным сопротивлением.
9. Найти условие максимальной чувствительности четырехплечного моста.

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, с. 335—340, 358, 359.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, с. 145—149, 485—488.

ЛАБОРАТОРИЯ РАДИОФИЗИКИ

При выполнении работ лаборатории радиофизики студенты изучают физические явления: генерирование переменного напряжения, генерирование релаксационных колебаний, разряд в газе, генерирование, распространение и прием электромагнитных волн;

знакомятся с гармоническим анализом колебаний сложной формы, электронным моделированием физических процессов; овладевают методами измерений величины, частоты и фазы переменного напряжения;

приобретают навыки работы с приборами: осциллографом, генератором, вольтметром, частотомером;

знакомятся с интегральными микросхемами, радиофизическими устройствами на них, с характеристиками усилителя переменного напряжения.

Лабораторная работа 26

ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Целью работы являются ознакомление с осциллографом, измерение его чувствительности, изучение систем развертки и синхронизации, применение осциллографа для исследования сигналов.

Устройство осциллографа

Электронно-лучевая трубка. Осциллограф — прибор, предназначенный для наблюдения и исследования разнообразных электрических процессов путем их графического воспроизведения на экране электронно-лучевой трубки. Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) — основной элемент осциллографа. Обычно в качестве индикатора применяется электронно-лучевая трубка с электростатическим управлением, т. е. фокусировкой и отклонением луча электрическим полем. Исследуемое напряжение наблюдается в виде светящейся кривой, возникающей на флюоресцирующем экране трубки в результате бомбардировки его электронным лучом, т. е. узким пучком быстролетающих электронов.

Электронно-лучевая трубка представляет собой электронный вакуумный прибор с длинным стеклянным баллоном цилиндрической формы, расширяющимся на одном из концов. Устройство трубки показано на рис. 1. Внутри баллона расположены электроды, которые можно разделить на две группы. Одна из них пред-

ставляет собой электронную пушку (электронный прожектор), создающую электронный луч, направленный вдоль оси трубки. Другая группа электродов — отклоняющие пластины — служит для управления электронным пучком при движении электронов к экрану.

Электронная пушка состоит из катода 2, подогреваемого нитью накала 1, управляющего электрода 3 и двух анодов 4, 5.

Управляющий электрод (модулятор) имеет цилиндрическую форму с отверстием в доньшке, в результате чего электроны, вылетевшие с катода, образуют сужающийся пучок. Изменение величины небольшого отрицательного потенциала модулятора приводит к изменению числа электронов, пролетающих сквозь него, т. е. к изменению плотности электронного пучка. В конечном счете это приводит к изменению яркости свечения экрана.

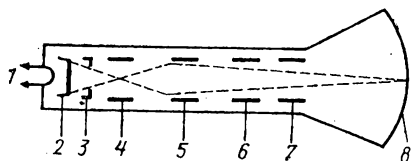


Рис. 1. Устройство электронно-лучевой трубки

Пролетев через цилиндрический первый анод, далее электроны летят расходящимся пучком. Степень расходимости этого пучка регулируется изменением потенциала первого анода. Конфигурация, расположение второго анода и подаваемый на него потенциал выбираются такими, чтобы электрическое поле, образующееся в пространстве между первым и вторым анодами (электронная линза), сфокусировало электронный пучок на поверхности экрана. Потенциал второго анода, определяющий скорость движения электронов в пучке и, следовательно, чувствительность трубки, не регулируется. Фокусировка луча осуществляется изменением потенциала первого анода (т. е. потенциал первого анода подбирается таким, чтобы электронный пучок, пройдя первый анод, имел именно такую расходимость, которую скомпенсирует электронная линза). Перед экраном электронный пучок пролетает между отклоняющими пластинами 6, 7, расположенными попарно горизонтально и вертикально. Когда потенциалы в каждой паре равны друг другу (хотя и отличны от нуля относительно земли), луч идет точно в центр экрана. При изменении разности потенциалов пластин в каждой паре луч смещается в сторону пластины, потенциал которой выше.

Пластины, расположенные горизонтально, обеспечивают отклонение луча по вертикали, а пластины, расположенные вертикально, — по горизонтали.

Блок-схема осциллографа. Основные блоки осциллографа можно разделить на две группы: блоки, относящиеся к каналу Y , т. е. к каналу, по которому проходит исследуемый сигнал, и блоки, относящиеся к каналу X , т. е. к каналу, в котором формируется напряжение развертки луча (рис. 2). К первому каналу относятся: делитель, калибратор и усилитель Y . Остальные блоки осциллографа относятся к каналу X .

Исследуемый сигнал подается на гнездо «вход Y». Если сигнал велик, то с помощью входного делителя его можно ослабить в 10 или 100 раз. Далее сигнал поступает на усилитель канала Y и затем на вертикально отклоняющие пластины электронно-луче-

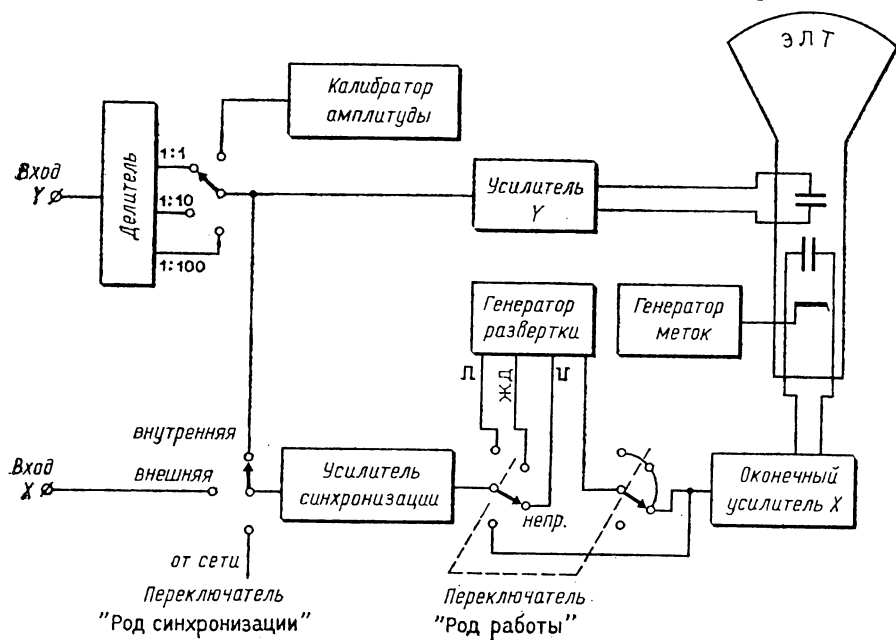


Рис. 2. Структурная схема осциллографа

вой трубки. Переключатель «делитель» в одном из своих положений позволяет подключать к входу усилителя канала Y вместо напряжения сигнала напряжение известной величины с блока калибратора амплитуды.

Генератор развертки вырабатывает пилообразное напряжение, которое в положении «непрерывно» переключателя «род работы» (имеющего две секции) поступает через оконечный усилитель канала X на горизонтально отклоняющие пластины трубки. Когда же этот переключатель находится в других положениях, генератор развертки вырабатывает только один импульс пилообразного напряжения после того, как на него через «усилитель синхронизации» (усилитель канала X) поступает положительный (л) или отрицательный (л) запускающий импульс от какого-либо внешнего устройства. Это и есть режим ждущей развертки.

Если генератор развертки работает в непрерывном режиме (переключатель «род работы» находится в положении «непрерывно»), то эту развертку можно синхронизировать напряжением исследуемого сигнала (переключатель «род синхронизации» — в положении «внутренняя»), напряжением сети 50 Гц (переключа-

тель «род синхронизации» — в положении «от сети») или напряжением от какого-либо внешнего источника (переключатель «род синхронизации» — в положении «внешняя»).

Когда переключатель «род работы» стоит в положении «усилитель», то выход «усилителя синхронизации» подключается к оконечному усилителю канала X , минуя генератор развертки. Таким образом, к горизонтально отклоняющим пластинам будет приложено усиленное напряжение, поданное на вход усилителя синхронизации. А какое напряжение подается на вход этого усилителя — определяется положением переключателя «род синхронизации». В положении «внутренняя» — это напряжение исследуемого сигнала, поступающее

из канала Y ; в положении «внешняя» — это напряжение, подаваемое на гнездо «вход X »; в положении «от сети» — сетевое напряжение частоты 50 Гц.

Генератор меток вырабатывает импульсы калиброванной частоты, модулирующие электронный поток трубки по плотности, что приводит к пунктирному изображению сигнала на экране. Так как период каждой метки известен, то легко определить длительность любой части исследуемого сигнала.

Генератор развертки. Для наблюдения изменения во времени исследуемого напряжения к горизонтально отклоняющим пластинам прикладывается напряжение, изменяющееся пропорционально времени (рис. 3, в). Это пилообразное напряжение вырабатывается схемой, изображенной на рис. 4. От мультивибратора — системы, обладающей двумя неустойчивыми состояниями, — на

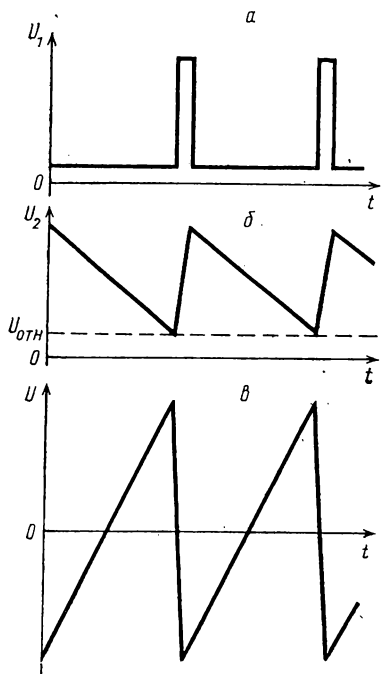


Рис. 3. Эпюры напряжений в различных точках генератора развертки

конденсатор C_i через малое сопротивление R поступает напряжение U_1 в виде коротких импульсов (рис. 3, а). Два уровня этого напряжения соответствуют двум устойчивым состояниям мультивибратора. Конденсатор C_i быстро заряжается благодаря малости R и затем начинает медленно разряжаться через большое сопротивление пентода R_i (сопротивление мультивибратора в это время еще больше, так что разряд через него невозможен).

Ток разряда конденсатора — это ток пентода. Пентод же имеет анодную характеристику, т. е. зависимость анодного тока от

анодного напряжения, такую, что при больших изменениях анодного напряжения ток через пентод практически не меняется. Таким образом, ток разряда конденсатора практически постоянен. А благодаря этому напряжение на конденсаторе при его разряде линейно изменяется во времени:

$$U_c(t) = \frac{1}{C} Q(t) = \frac{1}{C} \int I dt = \frac{I}{C} t.$$

Напряжение конденсатора при разряде определяет прямой ход луча (когда происходит наблюдение сигнала), а напряжение при заряде определяет обратный ход луча (при этом луч «гасится») (рис. 3, б).

Пилообразное напряжение с анода пентода U_2 подается на так называемый парафазный усилитель, т. е. усилитель с двумя выходами, с которых снимаются одинаковые, но противофазные напряжения. Эти напряжения в противофазе поступают на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки, так что непосредственно между пластинами действует знакопеременное напряжение (см. рис. 3, в), следовательно, в ходе развертки

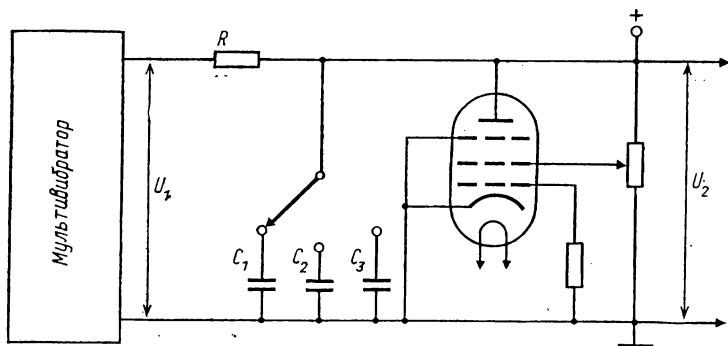


Рис. 4. Схема генератора развертки

луч может находиться по обе стороны от центра экрана, куда он попадает при разности потенциалов пластин, равной нулю.

Переключением конденсатора C_i скачкообразно меняется частота развертки, плавное изменение частоты развертки производится потенциометром, изменяющим напряжение на экранной сетке пентода и, таким образом, его внутреннее сопротивление R_i , вследствие чего меняется ток разряда конденсатора и, следовательно, длительность этого разряда, пропорциональная произведению $R_i C$.

Синхронизация развертки. При наблюдении периодического сигнала, например гармонического, его изображение на экране можно сделать неподвижным, подобрав длительность одного цикла развертки равной длительности одного или нескольких периодов исследуемого сигнала. Но период сигнала или период развертки

могут измениться, и тогда изображение на экране осциллографа начнет «мелькать». Чтобы этого не случилось, в схеме осциллографа предусмотрена автоматическая подстройка частоты исследуемого сигнала, т. е. синхронизация частоты развертки и частоты сигнала.

Как видно из рис. 3, б и 5, переход мультивибратора из одного состояния в другое начинается при достижении напряжением на конденсаторе уровня отпирания мультивибратора $U_{отп}$. Если

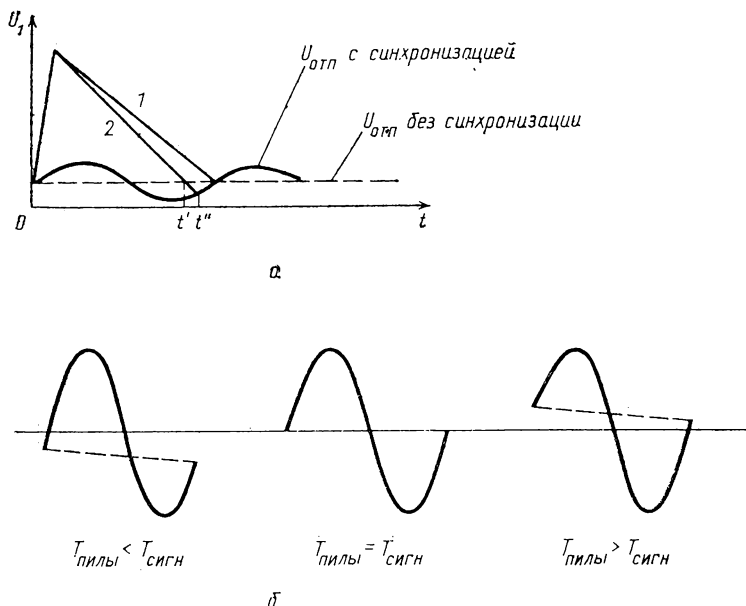


Рис. 5. Работа системы синхронизации развертки осциллографа: а) изменение момента окончания развертки в зависимости от соотношения между напряжением на конденсаторе C (см. рис. 4) и синхронизирующим напряжением; б) изменение формы наблюдаемого сигнала при различных соотношениях между периодом развертки (без синхронизации) и периодом исследуемого сигнала

изменить этот уровень, то изменится и время, необходимое для того, чтобы напряжение на конденсаторе упало до него (см. рис. 5). С этой целью в схему мультивибратора подается напряжение исследуемого гармонического сигнала (в положении «внутр.» переключателя «род синхр.» — см. рис. 2), что приводит к изменению уровня $U_{отп}$ по гармоническому закону (см. рис. 5). Если период сигнала точно равен периоду развертки, т. е. длительности пилообразного напряжения, то подача в схему мультивибратора напряжения гармонического сигнала ничего не изменит: на экране будет наблюдаться неподвижный синусоидальный сигнал (рис. 5, б). Если же период сигнала и период развертки не совпадают, то начнется процесс подстройки частоты развертки к

частоте сигнала (линия 2 на рис. 5). Тогда, если бы уровень $U_{отп}$ оставался неизменным, то развертка прекратилась бы в момент времени t' , когда на экране не успел уложиться полностью период сигнала. Но благодаря тому, что исследуемый гармонический сигнал подан также и в схему мультивибратора, уровень его перехода в другое состояние $U_{отп}$ меняется по гармоническому закону, и, как видно из рис. 5, а, напряжение на конденсаторе, изображаемое линией 2, для прекращения развертки должно будет достигнуть иной величины сравнительно со случаем отсутствия синхронизирующего напряжения. Это приведет к продолжению развертки до момента времени t'' . Следующий цикл развертки закончится тем, что разница между периодами сигнала и развертки сократится еще больше. Следует отметить, что при этом меняется начальная фаза сигнала, видимого на экране осциллографа. Суть описанной синхронизации в том и состоит, что благодаря изменению начальной фазы изображаемого сигнала на экране осциллографа длительность пилообразного изменения напряжения на конденсаторе увеличивается или уменьшается точно на столько, какова разница между этой длительностью и периодом сигнала в отсутствие синхронизирующего напряжения (см. рис. 5, б).

Синхронизация возможна и в том случае, когда на экране укладывается не один, а несколько периодов синхронизации.

Экспериментальная установка состоит из осциллографа типа С1-5 и генератора напряжения (диапазон частот 20 Гц ÷ 20 кГц).

Упражнение 1. ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОСЦИЛЛОГРАФА

С выхода генератора подать напряжение частоты 1 кГц на вход Y осциллографа. Усиление усилителя канала Y осциллографа установить максимальным.

Снять зависимость амплитуды отклонения луча на экране осциллографа от величины подаваемого напряжения, которая отсчитывается по шкале прибора на лицевой панели генератора.

Результаты измерений занести в таблицу и представить графически. Вычислить чувствительность осциллографа S_y по каналу Y как отношение величины напряжения, подаваемого на вход осциллографа, к величине отклонения луча на его экране.

Аналогичные измерения проделать для канала X осциллографа.

Упражнение 2. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

С выхода генератора подать на вход Y осциллографа напряжение не менее 0,1 В. Регулируя выходное напряжение генератора и усиление осциллографа, установить величину изображения сигнала на экране осциллографа, удобную для наблюдения. Запомнить величину получившегося изображения сигнала на экране по вертикали.

Поставить переключатель «делитель» в положение «калибр.» (на вход усилителя осциллографа подается калиброванное напряжение). Ручкой «калибровка амплитуды» установить изображение этого напряжения равным по величине изображению измеряемого сигнала. На шкале, связанной с ручкой «калибровка амплитуды», произвести отсчет величины калиброванного напряжения. При этом верхняя шкала (с надписью «имп.») позволяет произвести отсчет удвоенной амплитуды гармонического напряжения, а нижняя шкала (с надписью «эфф.») — отсчет эффективного значения гармонического напряжения.

Сравнить результаты измерения с показаниями вольтметра генератора для трех—пяти различных напряжений.

Упражнение 3. ИЗУЧЕНИЕ ГЕНЕРАТОРА РАЗВЕРТКИ

Измерить крайние частоты для трех соседних диапазонов генератора развертки. Для этого подать на вход Y напряжение от внешнего генератора. Установить частоту развертки осциллографа на одном из диапазонов, соответствующую крайнему против часовой стрелки положению ручки «частота—плавно». Убрать синхронизацию развертки, для чего ручку «синхронизация» поставить в крайнее против часовой стрелки положение. Изменяя частоту внешнего генератора, добиться установления на экране осциллографа изображения одного периода синусоидального напряжения (это соответствует равенству периода сигнала периоду развертки). Записать значение частоты генератора.

Установить частоту генератора развертки, которая соответствует другому концу диапазона, для чего ручку «частота—плавно» поставить в другое крайнее положение, и опять найти такую частоту колебаний внешнего генератора, при которой на экране осциллографа уложится один период синусоидального сигнала.

Аналогично выполнить измерения на других диапазонах развертки осциллографа.

Упражнение 4. ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

Установить развертку осциллографа в пределах первых трех диапазонов. Подать на вход Y осциллографа переменное напряжение от генератора величиной примерно 0,3 В. Ручку осциллографа «синхронизация» установить в положение, соответствующее делению «10», — при этом синхронизирующее напряжение максимально. Частоту генератора установить такой, чтобы на экране осциллографа наблюдались два периода сигнала. Уменьшая, а затем увеличивая частоту генератора, определить нижнюю границу f_n устойчивости осциллограммы и верхнюю границу f_v . Результаты измерений занести в таблицу.

Снять зависимость частот f_n и f_v от положения ручки «синхронизация», изменяющей амплитуду синхронизирующего напря-

жения. Результаты измерений занести в таблицу и изобразить графически в виде $f_n(U_{\text{синхр}})$ и $f_v(U_{\text{синхр}})$.

Объяснить характер этих зависимостей.

Упражнение 5. НАБЛЮДЕНИЕ ФИГУР ЛИССАЖУ

Поставить переключатель рода работы в положение «усилитель», а переключатель рода синхронизации — в положение «от сети» (при этом развертка осциллографа будет осуществляться с частотой 50 Гц).

На вход Y осциллографа подать напряжение генератора и, меняя его частоту в пределах 25—150 Гц, наблюдать на экране результат сложения двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний разных частот — так называемые фигуры Лиссажу.

Наиболее характерные фигуры зарисовать и определить соответствующее им соотношение частот $\left(\frac{1}{2} : 1, 1 : 1, 1 : 2, 1 : 3\right)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие исследования можно выполнять с помощью осциллографа?
2. Как устроена электронно-лучевая трубка?
3. Каким образом достигается смещение луча на экране трубки?
4. Начертить блок-схему осциллографа и описать взаимодействие ее элементов.
5. Каким образом обеспечивается линейное во времени движение луча на экране трубки осциллографа?
6. Благодаря какому своему качеству в схеме развертки используется пентод?
7. Как производится плавная регулировка частоты развертки?
8. Объяснить принцип синхронизации развертки осциллографа.
9. Как получаются фигуры Лиссажу?
10. Как амплитуда синхронизирующего напряжения влияет на устойчивость изображения на экране осциллографа?
11. Как оценить отношение емкостей конденсаторов генератора развертки, соответствующих разным диапазонам?

Литература

1. Брандт А. А., Ржевкин К. С. Техника монтажа и налаживания радиосхем. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966.

Лабораторная работа 27

RC-ГЕНЕРАТОР ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Изучается принцип действия генератора гармонических колебаний RC-типа, экспериментально проверяются условия возбуждения генератора.

Принцип действия RC-генератора. В современной радиоизмерительной аппаратуре звукового диапазона частот широко распространены генераторы *RC*-типа. Такое название эти генераторы получили потому, что в них отсутствует колебательный контур, а частота генерируемых колебаний определяется свойствами цепи обратной связи, состоящей из конденсаторов и резисторов. Основными достоинствами *RC*-генератора являются простота схемы, надежность в работе, удобство настройки в широком диапазоне частот и отсутствие в схеме сложных и громоздких деталей.

Принцип работы генератора состоит в следующем: пусть имеется усилитель, вход и выход которого соединены цепью обратной связи. На рис. 1 дана блок-схема усилителя с обратной связью, где U — напряжение внешнего источника; U_1 — входное напряжение усилителя (без обратной связи), U_2 — выходное напряжение усилителя, равное входному напряжению цепи обратной связи, U_3 — напряжение на выходе цепи обратной связи.

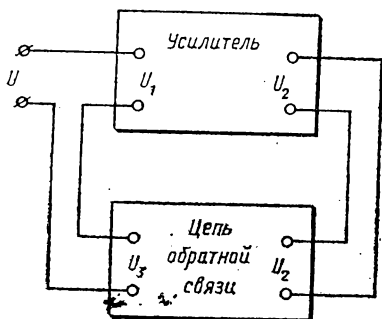


Рис. 1. Блок-схема усилителя с обратной связью

Введем следующие обозначения:

$U_2/U_1 = K$ — коэффициент усиления усилителя без обратной связи.

$U_3/U_2 = \beta$ — коэффициент обратной связи.

$U_2/U = K'$ — коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

Тогда из равенства $U_1 = U + U_3$ получим

$$K' = \frac{K}{1 - K\beta}. \quad (1)$$

В формуле (1), если фазы U и U_3 совпадают, то β положительно, если фазы противоположны, то β отрицательно. Заметим, что если в цепи обратной связи отсутствуют какие-либо ЭДС (цепь пассивна), то $0 \leq |\beta| \leq 1$.

Из анализа формулы (1) следует, что при $\beta > 0$ $K \leq K' \leq \infty$. Значение $K' = \infty$ получается при $\beta = 1/K$. Это значение будем называть *критическим*. Усилитель с положительной обратной связью ($\beta > 0$), большей критической ($\beta > 1/K$), и замкнутыми накоротко входными клеммами *А* и *Б* способен к автоколебаниям, т. е. является генератором незатухающих колебаний. Действительно, если во входной цепи такого усилителя по какой-нибудь случайной причине (например, тепловые флуктуации) возникают, хотя бы и весьма слабые, электрические колебания, то, пройдя через усилитель и цепь обратной связи, они вернуться на вход усилителя уже усиленными (так как при $\beta > 1/K$ $U_3 > U_1$).

Такой процесс приведет к нарастанию амплитуды колебаний в

усилителе до тех пор, пока она не окажется ограниченной нелинейностью характеристик транзистора. Следовательно, для возникновения и существования в генераторе незатухающих колебаний необходимо выполнение двух условий. Во-первых, фаза напряжения на выходе цепи обратной связи должна совпадать с фазой входного напряжения усилителя (обратная связь положительна). Во-вторых, амплитуда напряжения на выходе цепи обратной связи должна превышать амплитуду первичного входного напряжения. Эти условия называют условиями самовозбуждения генератора: первое — *условием баланса фаз*, второе — *условием баланса амплитуд*.

Для того чтобы происходила генерация колебаний, близких по форме к гармоническим, необходимо, чтобы условия самовозбуждения для него выполнялись в узком интервале частот.

Теперь, ознакомившись с общим принципом действия RC -генератора, разберем более подробно работу одной, широко распространенной схемы RC -генератора (рис. 2).

В этой схеме применен двухкаскадный транзисторный усилитель. Такой усилитель для средней части своей амплитудно-час-

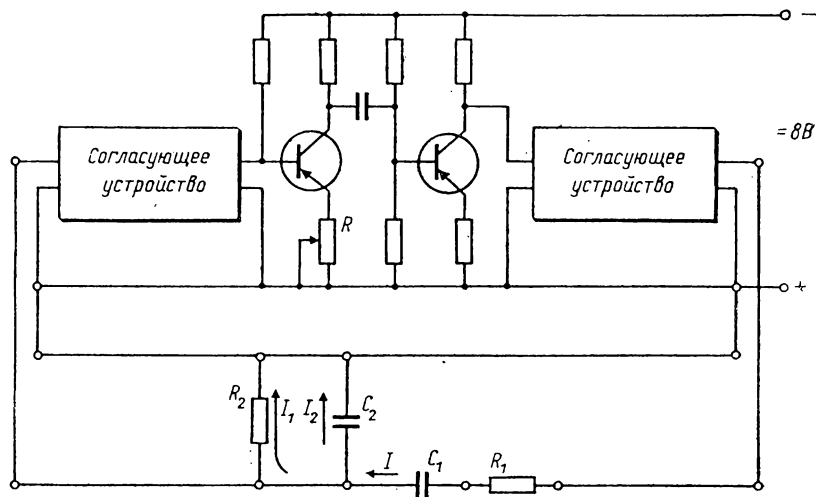


Рис. 2. Схема RC -генератора

тотной характеристики практически не поворачивает фазу выходного напряжения.

Исследование работы схемы будем проводить, используя метод комплексных амплитуд. Для этого заранее предположим, что в генераторе установились синусоидальные электрические колебания с круговой частотой ω . Комплексные амплитуды напряже-

ния на входе и выходе цепи обратной связи обозначим соответственно \dot{U}_2 и \dot{U}_3 .

Применим первое правило Кирхгофа в точке D (см. рис. 2):

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \text{ где } \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_3}{R_2}, \text{ а } \dot{I}_2 = \dot{U}_3(-i\omega C_2),$$

или

$$\dot{I} = \dot{U}_3 \left(\frac{1}{R_2} + i\omega C_2 \right). \quad (2)$$

Здесь I , I_1 , I_2 — комплексные амплитуды токов в соответствующих участках цепи, а i — мнимая единица.

Теперь применим второе правило Кирхгофа к контуру, включающему R_1 , C_1 , а также вход и выход цепи обратной связи:

$$\dot{U}_2 = \dot{I} \left(R_1 + \frac{1}{i\omega C_1} \right) + \dot{U}_3.$$

Подставим сюда I из уравнения (2):

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_3 \left[\left(R_1 + \frac{1}{i\omega C_1} \right) \left(\frac{1}{R_2} + i\omega C_2 \right) + 1 \right],$$

откуда

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_3 \left[\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1 + i \left(\omega C_2 R_1 - \frac{1}{\omega C_1 R_2} \right) \right]. \quad (3)$$

Так как усилитель не поворачивает фазу напряжения, то условие баланса фаз будет выполняться, если цепь обратной связи также не будет поворачивать фазу, т. е. фазы \dot{U}_2 и \dot{U}_3 будут совпадать. Последнее будет иметь место, когда коэффициент при \dot{U}_3 в формуле (3) будет действительным числом. Для этого необходимо, чтобы

$$\omega C_2 R_1 - \frac{1}{\omega C_1 R_2} = 0.$$

Разрешив это равенство относительно ω^2 , получим

$$\omega^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}, \quad \nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (4)$$

Таким образом, мы определили частоту ν , для которой выполняется условие баланса фаз.

Коэффициент обратной связи при соблюдении условия баланса фаз из уравнения (3) будет равен

$$\beta = \frac{U_3}{U_2} = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_2} = \frac{1}{R_1/R_2 + C_2/C_1 + 1}.$$

Условие баланса амплитуд $\beta \geq 1/K$ для нашего случая запишется так:

$$\frac{1}{\frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1} \geq \frac{1}{K}, \text{ или } K \geq \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1.$$

Наименьшим значением для K , начиная с которого в генераторе смогут возникнуть автоколебания, очевидно, будет значение

$$K = \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + 1. \quad (5)$$

При $R_1 = R_2$ и $C_1 = C_2$ $K = 3$.

При значениях K , близких к наименьшему, генерируемое напряжение будет по своей форме близко к синусоидальному, так как при этом условия самовозбуждения будут выполняться для узкого диапазона частот.

Выше мы считали, что коэффициент усиления усилителя K не зависит от величины входного сигнала. Эта так называемая линейная теория генератора дает возможность получить правильные выражения для условий самовозбуждения. Однако эта теория не дает возможности вычислить амплитуду колебаний. Вопрос об амплитуде решается нелинейной теорией генератора, которая здесь не рассматривается.

Описание экспериментальной установки

Блок-схема установки изображена на рис. 3. Транзисторный RC -генератор вместе с согласующими устройствами смонтирован на специальной панели. Цепь обратной связи также монтируется на отдельной панели. Питание ± 8 В подается на панель генератора от специального источника. Для наблюдения формы генерируемых колебаний имеется осциллограф (С1-5), а для измерения коэффициента усиления усилителя и частоты генерируемых колебаний — генератор напряжения звуковых частот (ГЗ-18). Резисторы и конденсаторы, из которых монтируется цепь обратной связи, располагаются отдельно.

Упражнение 1. ПРОВЕРКА УСЛОВИЯ БАЛАНСА ФАЗ

Собрать установку в соответствии со схемой рис. 3 (генератор пока не подсоединять). На панели для цепи обратной связи расположить резисторы и конденсаторы, образующие одну из комбинаций, указанных преподавателем.

По формулам (4), (5) предварительно вычислить частоту ожидаемых колебаний и необходимый коэффициент усиления для всех указанных комбинаций R и C элементов.

Включить приборы и дать им прогреться 5—10 мин. Плавным вращением ручки потенциометра R увеличивать коэффициент усиления усилителя до тех пор, пока не возникнет генерация — при этом на экране осциллографа должен появиться сигнал. Установить его удобным для наблюдения, убедиться в его гармонической форме и зарисовать в рабочей тетради.

Для проверки условия баланса фаз необходимо измерить частоту генерируемого напряжения и сравнить ее с вычисленной.

Развертку осциллографа сделать от генератора ГЗ-18. Меняя частоту генератора в районе частоты, вычисленной по формуле (4), добиться получения эллипса на экране осциллографа, что

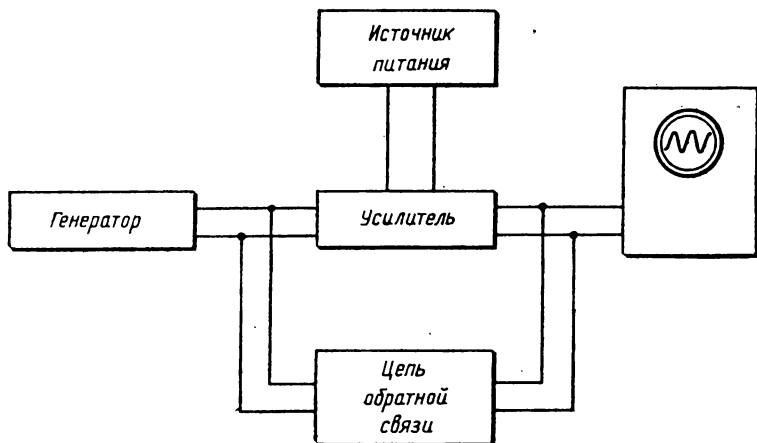


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки

будет свидетельствовать о равенстве частот исследуемого сигнала и напряжения генератора.

Выполнить описанные измерения для всех указанных комбинаций R и C элементов и занести результаты в рабочую тетрадь.

Упражнение 2. ПРОВЕРКА УСЛОВИЯ БАЛАНСА АМПЛИТУД

Для проверки условия баланса амплитуд необходимо измерить коэффициент усиления K , при котором возникает генерация, и сравнить его с вычисленным по формуле (5). Для этого на установке, собранной по схеме рис. 3 для выполнения предыдущего упражнения, плавным вращением ручки потенциометра R установить такой коэффициент усиления усилителя, при котором начинает возникать генерация. Оставив потенциометр R в этом положении, отключить от усилителя цепь обратной связи. Осциллограф удобнее перевести в режим внутренней развертки.

Подключить к входу усилителя генератор, частота колебаний которого должна быть такой же, как и при проверке условий баланса фаз с данной комбинацией элементов R и C цепи обратной связи.

Амплитуду напряжения, подаваемого с генератора на вход усилителя, установить такой, чтобы усилитель работал на линейном участке своей амплитудной характеристики (выходное напряжение пропорционально входному), а регулировки осциллографа

установить так, чтобы было удобно наблюдать сигнал на экране и удобно измерять его амплитуду (в относительных единицах).

Переключить осциллограф с выхода усилителя на его вход. При этом важно, чтобы не менялись никакие регулировки усилителя генератора, осциллографа. Измерить теперь амплитуду входного сигнала на экране осциллографа.

Отношение амплитуд сигнала на выходе и входе усилителя и есть коэффициент усиления:

$$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Выполнить описанные измерения для всех комбинаций R и C элементов, указанных преподавателем.

Результаты вычислений и измерений удобно свести в таблицу.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Начертить блок-схему установки, объяснить работу RC -генератора.
2. В чем заключается условие самовозбуждения генератора?
3. От каких параметров зависит частота возбуждаемых генератором колебаний? Каковы пределы изменения частоты генератора?
4. Какая форма колебаний напряжения возможна в RC -генераторе?
5. Укажите цепь обратной связи в данном генераторе. Чем обеспечивается существование положительной обратной связи?
6. Как измерить критическое значение коэффициента обратной связи?
7. Каким методом в данной задаче измеряется частота « ν » и коэффициент усиления « K »?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 28

ТИРАТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

В данной лабораторной работе изучаются характер и условия возникновения релаксационных колебаний в тиратронном генераторе.

Устройство тиратрона и физические процессы в нем. Простейший тиратрон — это трехэлектродная лампа, наполненная газом при низком давлении. Если анодное напряжение недостаточно для ионизации газа в нем, то ток через тиратрон подчиняется за-

конам, справедливым для вакуумного триода. При повышении анодного напряжения до напряжения зажигания в тиратроне возникает дуговой разряд. Развитие дугового разряда происходит с нарастающей скоростью — лавиной. Однако для возникновения лавины необходимо наличие некоторой определенной начальной ионизации. Когда анодное напряжение близко к напряжению зажигания, в тиратроне существует предразрядный ток. Этот ток создается за счет электронной эмиссии катода, а также за счет начальной ионизации газа — тихий или тлеющий разряд.

Так как электрическое поле в тиратроне определяется не только его анодным напряжением, но и его сеточным напряжением, то



Рис. 1. Пусковая характеристика тиратрона

и напряжение зажигания зависит от сеточного напряжения тиратрона. Кривая зависимости напряжения зажигания от сеточного напряжения называется пусковой характеристикой тиратрона; она имеет вид, показанный на рис. 1.

Анодное напряжение горящего тиратрона U_T не сильно отличается от потенциала ионизации газа и почти не зависит от тока через тиратрон. В процессе зажигания анодное напряжение падает от напряжения зажигания до значения U_T . Следовательно, сопротивление тиратрона в стадии зажигания отрицательное, а в стадии горения близко к нулю.

Анодное напряжение, при котором в тиратроне прекращается дуговой разряд, называется напряжением гашения. Напряжение гашения слабо зависит от сеточного напряжения. Это объясняется тем, что при наличии разряда ионный слой, создающийся у поверхности отрицательно заряженных проводников сетки, экранирует их от окружающего поля. При погасании тиратрон еще некоторое время сохраняет способность проводить ток за счет оставшихся после разряда ионов. Процесс исчезновения такой проводимости называется деионизацией тиратрона.

Принцип действия и основные свойства генератора. Принципиальная схема генератора приведена на рис. 2, а (R — сопротивление, C — конденсатор, T — тиратрон). Принцип действия генератора состоит в следующем: при подключении к схеме источника постоянного электрического напряжения U_n конденсатор C заряжается через сопротивление R . Когда напряжение на конденсаторе U_C станет равным напряжению зажигания U_z , тиратрон зажжется, и конденсатор практически мгновенно разрядится через него до напряжения гашения U_T . При этом тиратрон погаснет, и конденсатор снова станет заряжаться. Описанный процесс будет повторяться периодически. График зависимости напряжения на конденсаторе от времени представлен на рис. 2, б.

Колебания подобного вида, сильно отличающиеся по своей

форме от гармонических, часто называют срывными или релаксационными.

Для возникновения и существования колебаний в рассмотренной схеме необходимо выполнение следующих условий (условий самовозбуждения):

$$U_3 < U_{\pi} \text{ и } U_{\pi} - I_0 R < U_{\Gamma},$$

где I_0 — величина установившегося тока в сопротивлении при горящем тиратроне. Первое из этих условий очевидно. Второе условие равносильно утверждению, что в генераторе не может су-

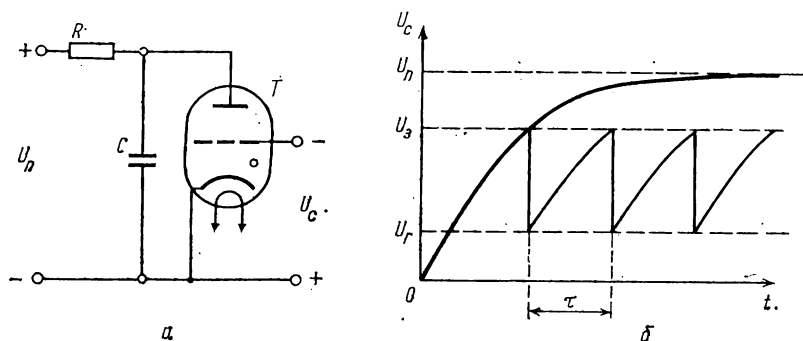


Рис. 2. Схема генератора релаксационных колебаний на тиратроне (а); характер изменения напряжения в схеме (б)

ществовать такой стационарный режим, при котором напряжение на конденсаторе было бы выше напряжения гашения тиратрона. Последнее условие для генераторов с тиратроном всегда выполняется, так как сопротивление горящего тиратрона весьма мало.

Период колебаний генератора τ , как видно из рис. 2, б, равен времени зарядки конденсатора C через сопротивление R от напряжения U_{Γ} до напряжения U_3 . Для вычисления периода напишем второе правило Кирхгофа для цепи генератора при погашенном тиратроне:

$$U_{\pi} = IR + U_C = RC \frac{dU_C}{dt} + U_C.$$

Преобразовав это выражение, получим

$$-RC \frac{d(U_{\pi} - U_C)}{U_{\pi} - U_C} = dt.$$

Проинтегрировав в пределах от U_{Γ} до U_3 , получим выражение для периода

$$\tau = RC \ln \frac{U_{\pi} - U_{\Gamma}}{U_{\pi} - U_3}.$$

Следует отметить, что полученная формула является неточной. У реальных генераторов период всегда несколько больше вычисленного (расхождение может доходить до 15—20%). Такое расхождение объясняется тем, что при вычислении периода не были учтены предразрядные токи тиратрона. Действительно, когда напряжение на конденсаторе становится близким к напряжению зажигания, часть тока, проходящего через сопротивление R , ответвляется через тиратрон (предразрядный ток) и зарядка конденсатора замедляется. Кроме того, на величине периода колебаний сказывается также и то, что при релаксационных колебаниях разрядка конденсатора происходит до напряжения более низкого, чем напряжение гашения тиратрона, определенное из измерений в статическом режиме.

Этот факт легко объяснить, если учесть, что в тиратроне, после того как перестанут существовать условия для образования дугового разряда, ток все еще продолжается до тех пор, пока не произойдет полная деионизация газа.

Описание экспериментальной установки

Схема релаксационного генератора собрана на отдельной панели (рис. 3). В схеме применен тиратрон ТГ1-01/03 с аргоновым наполнением. Конденсатор C и резистор R сделаны сменными.

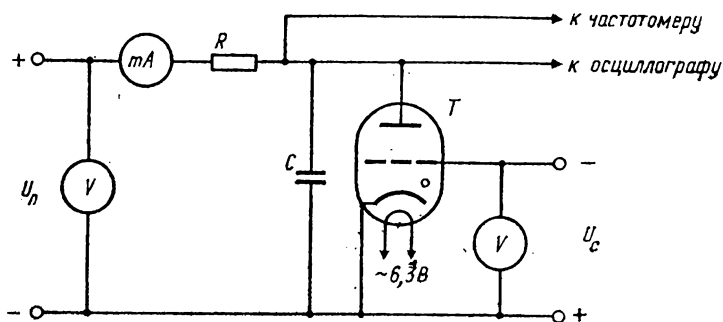


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для изучения работы генератора релаксационных колебаний на тиратроне

Питание генератора осуществляется от выпрямителя, с выходов которого на схему подаются напряжения: +150 В для питания анодной цепи, -15 В на сетку тиратрона и ~6,3 В для накала тиратрона. Постоянные напряжения регулируются ручками управления источника.

В установке используются: осциллограф универсальный, электронный частотомер (20 Гц—20 кГц), вольтметры с пределами измерений 15 и 150 В, миллиамперметр с пределом измерения 15 мА.

Монтаж и включение экспериментальной установки. Собрать схему в соответствии с рис. 3. Включить в схему резистор R и конденсатор C из имеющихся в наборе. Подключить к схеме приборы.

Включить приборы в сеть и дать им прогреться, установить режим, удобный для последующей работы.

Упражнение 1. СНЯТИЕ ПУСКОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРАТРОНА

Установить наибольшее запирающее напряжение U_C на сетке тиратрона (-15 В) и, плавно увеличивая напряжение питания анодной цепи U_n , заметить момент возникновения колебаний (на экране осциллографа). Напряжение U_n , при котором это произойдет, и является напряжением зажигания тиратрона U_z для данного напряжения U_C по сетке. Записать измеренные значения U_z и U_C в тетради. Установить новое значение U_C и определить соответствующее ему напряжение зажигания тиратрона. Таким образом, снять зависимость $U_z(U_C)$ и оформить результаты измерений в виде таблицы.

Построить график пусковой характеристики $U_z(U_C)$.

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ОТ РЕЖИМА РАБОТЫ ТИРАТРОНА

Наибольшее изменение напряжения на конденсаторе при релаксационных колебаниях будем называть размахом этих колебаний и обозначать буквой A (см. рис. 2, б). Тогда напряжение, до которого разряжается в процессе релаксационных колебаний конденсатор C , будет равно $U_{\min} = U_z - A$.

Ввиду наличия послеразрядной проводимости $U_{\min} < U_r$. При определении U_{\min} напряжение зажигания U_z взять из пусковой характеристики, размах A измерить с помощью осциллографа, а частоту релаксационных колебаний ν измерить частотомером.

Измерения ν и U_{\min} производят для тех же значений U_C , R и C , которые были использованы в первом упражнении. Напряжение питания U_n при этом поддерживается равным 140 В. Полученные значения занести в таблицу. Кривую зависимость U_{\min} от U_C нанести на график пусковой характеристики.

Кроме того, вычислить ν по формуле

$$\nu_{\text{теор}} = \frac{1}{\tau_{\text{теор}}} = \frac{1}{RC \ln \frac{U_n - U_{\min}}{U_n - U_z}}$$

для значений параметров, соответствующих измеренным ν . Результаты вычисления также занести в таблицу. Необходимые для вычисления данные взять из предыдущих упражнений.

Упражнение 3. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОТ ВЕЛИЧИН R И C

Установить $U_n = 140$ В, $U_c = -8$ В и произвести измерения ν для различных комбинаций R и C . Результаты измерений и вычислений занести в таблицу. Измеренные значения $\nu_{\text{эксп}}$ сравнить с вычисленными.

Упражнение 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ДЕИОНИЗАЦИИ ТИРАТРОНА

Для выполнения упражнения используется основная схема установки в следующем режиме: $U_n = 140$ В, $U_c = -8$ В. Конденсатор отключают, включают резистор $R = 100$ кОм. Роль емкости генератора при этом играют входные емкости осциллографа, измерителя частоты, вольтметра и емкости монтажа. Осциллограф должен работать в режиме непрерывной развертки. Необходимо получить осциллограмму напряжения на выходе тиратронного генератора, которая будет иметь вид, показанный на рис. 4. Интервал времени τ_d , в течение которого $U = \text{const}$, является временем деионизации тиратрона. В течение этого времени зарядка конденсатора не происходит, так как тиратрон находится в проводящем состоянии.

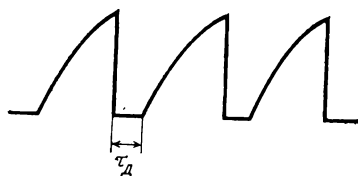


Рис. 4. Осциллограмма выходного напряжения

Интервал времени τ_d , в течение которого $U = \text{const}$, является временем деионизации тиратрона. В течение этого времени зарядка конденсатора не происходит, так как тиратрон находится в проводящем состоянии.

Для определения τ_d измеряют с помощью частотомера частоту релаксационного генератора ν . Затем на экране осциллографа измеряют отношение $\tau_d/\tau = n$ и из полученных данных определяют

$$\tau_d = \frac{\tau_d}{\tau} \cdot \frac{1}{\nu} = \frac{n}{\nu}. \text{ Величину } \tau_d \text{ выражают в микросекундах.}$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой дуговой разряд?
2. Как устроен тиратрон? Каковы его основные параметры и как они определяются?
3. Почему напряжение гашения тиратрона меньше напряжения зажигания?
4. В чем состоит процесс деионизации тиратрона, что такое время деионизации и как оно измеряется?
5. Начертить схему генератора релаксационных колебаний и пояснить его работу. Какую роль играет тиратрон в схеме генератора?
6. Как в схеме генератора осуществляется «обратная связь» и каковы условия самовозбуждения генератора релаксационных колебаний (сбросового генератора)?

7. От каких параметров зависит период колебаний?
8. Какими приборами оснащена лабораторная работа? Как надо подготовить эти приборы к работе?
9. С какой точностью производятся измерения в данной задаче?
10. Чем можно объяснить отличие измеренного периода колебаний от расчетного?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 29

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В настоящей лабораторной работе определяются амплитуды и частоты гармоник колебаний сложной формы, которые затем используются для синтеза колебаний, сравниваемых с исходными.

Гармонический спектр периодических функций. Из курса математического анализа известно, что всякую периодическую функцию, удовлетворяющую определенным условиям (условия Дирихле), можно разложить в ряд по гармоническим функциям аргумента с частотами, кратными основной частоте (ряд Фурье).

В настоящей работе мы будем рассматривать только такие функции, для которых подобное разложение выполнимо.

Ряд Фурье имеет следующий вид:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + \dots$$

$$\dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t + \dots,$$

где $\omega = 2\pi/T$ — круговая частота, T — период изменения функции $f(t)$. Коэффициенты этого ряда вычисляются по формулам Эйлера:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt, \quad b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt.$$

Ряд Фурье может быть преобразован к следующему виду:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots$$

$$\dots + A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \dots,$$

где

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{a_k}{b_k}.$$

Члены разложения этого ряда принято называть гармониче-

скими составляющими или гармониками функции $f(t)$. При этом величина A_k будет амплитудой k -й гармоники, а φ_k — ее начальной фазой.

Определение амплитуд и фаз гармоник данной периодической функции называется ее гармоническим анализом. Совокупность же амплитуд гармоник принято называть спектром данной функции. Иными словами, гармонический анализ некоторой функции состоит в нахождении ее гармонического спектра.

Исходя из изложенного, мы можем рассматривать всякий периодический ток как сумму синусоидальных переменных токов, а всякое периодическое напряжение как сумму синусоидальных напряжений с кратными частотами. Амплитуды и фазы гармоник этих токов и напряжений определяются по формулам нахождения амплитуд и фаз членов разложения соответствующих рядов Фурье.

Приведем ряды Фурье для некоторых видов периодических напряжений.

1) Прямоугольное напряжение (рис. 1, а). Напряжение в первую половину периода равно $U = +U_0$, а во вторую половину периода $U = -U_0$. Изменения напряжения происходят практически мгновенно. Процесс периодически повторяется. Вычислив коэффициенты a_k и b_k по формулам Эйлера и подставив их в ряд Фурье, получим

$$U(t) = \frac{4U_0}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \dots \right) = \\ = \frac{4U_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin (2k-1) \omega t}{2k-1}.$$

2) Пилообразное напряжение (рис. 1, б). Напряжение линейно спадает от значения $U = U_0$ при $t=0$ до значения $U = -U_0$ при $t=T/2$ по закону

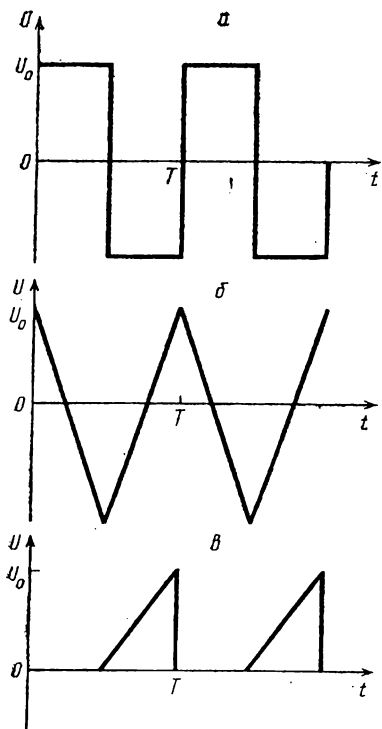


Рис. 1. Форма исследуемых напряжений

$$U(t) \begin{cases} U_0 \left(-\frac{4t}{T} + 1 \right) & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ U_0 \left(\frac{4t}{T} - 3 \right) & \frac{T_0}{2} \leq t \leq T. \end{cases}$$

Далее процесс повторяется периодически. Находим, как и в предыдущем случае, ряд Фурье пилообразного напряжения:

$$U(t) = \frac{8U_0}{\pi^2} \left(\cos \omega t + \frac{\cos 3\omega t}{3^2} + \frac{\cos 5\omega t}{5^2} + \dots \right) = \\ = \frac{8U_0}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos (2k-1) \omega t}{(2k-1)^2},$$

где $\omega = 2\pi/T$.

В обоих рассмотренных случаях начальные фазы всех гармоник равны нулю.

3) Однополярное пилообразное напряжение (рис. 1, в). Напряжение U половину периода равно нулю, затем линейно возрастает и при $t=T$ скачком падает до нуля. Затем процесс повторяется. Такое изменение напряжения можно представить в форме

$$U(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq \frac{T}{2}, \\ U_0 \left(\frac{2t}{T} - 1 \right) & \frac{T_0}{2} \leq t \leq T, \end{cases}$$

Соответствующий ряд Фурье имеет вид

$$U(t) = \frac{U_0}{2} + \frac{2U_0}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos (2k-1) \omega t}{(2k-1)^2} - \frac{U_0}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\omega t}{k}.$$

Описание экспериментальной установки

Блок-схема установки представлена на рис. 2.

Исследуемое напряжение вырабатывается генератором сигналов специальной формы Г6-15. Выделение гармоник выполняется

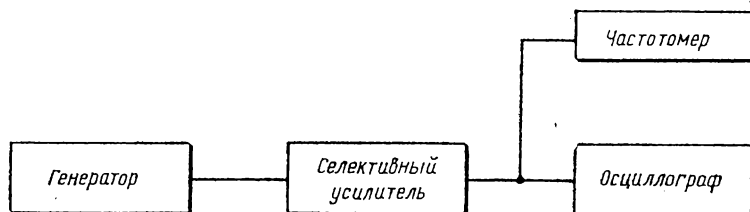


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

с помощью селективного прибора (усилителя У2-8 или микровольтметра В6-9, имеющего избирательный перестраиваемый по частоте усилитель с гнездом «выход»). Наблюдение формы сигналов осуществляется на экране осциллографа С1-68. Частота гармоник может быть измерена частотомером ЧЗ-33 (или с помощью осциллографа). Амплитуда гармоник измеряется по показаниям селективного прибора (или с помощью осциллографа).

Генератор вырабатывает напряжение синусоидальной, прямоугольной и пилообразной (двух типов) форм с частотой $0,001 \div 2000$ Гц и амплитудой $0 \div 10$ В. Все сигналы снимаются с основного выхода генератора.

Усилитель выполняет роль анализатора гармоник.

Установка работает следующим образом. С выхода генератора исследуемый сигнал подается на вход селективного усилителя. В режиме «широкая полоса» при коэффициенте усиления, равном 1, сигнал проходит через усилитель без изменения. Форму сигнала можно оценить по изображению на экране осциллографа. В узкополосном режиме через усилитель проходит только та гармоническая составляющая сигнала, на которую настроено избирательное устройство усилителя. Точность настройки на частоты гармоник определяется по максимуму показаний стрелочного прибора усилителя или по максимальной амплитуде изображения гармоник на экране осциллографа.

Монтаж и включение установки. Основной выход генератора соединить с входом усилителя, а выход усилителя — с входом У осциллографа и входом А частотомера. Включить тумблеры «сеть» и приборов и дать им прогреться 5—10 мин.

Упражнение 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

С выхода генератора подать напряжение $f(t)$ прямоугольной формы на усилитель, работающий в режиме «широкая полоса». Регулируя режимы работы приборов, добиться появления на экране осциллографа сигнала прямоугольной формы. Зарисовать этот сигнал. Для изучения гармоник перевести усилитель в узкополосный режим. Плавное перестраивая полосу пропускания усилителя, обнаружить первые 6—8 гармоник исследуемого сигнала, определить их амплитуду и частоту. Результаты измерений зафиксировать в рабочей тетради в виде таблицы.

Упражнение 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА ПИЛООБРАЗНОЙ ФОРМЫ

Генератор перевести в режим формирования напряжения $U(t)$ пилообразной формы. Добиться появления соответствующего сигнала на экране осциллографа и зарисовать его. Затем, также как и в первом упражнении, найти первые 4 гармоники исследуемого напряжения, определить их амплитуду и частоту.

Упражнение 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛА ТРЕУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Генератор перевести в режим получения напряжения $U(t)$ треугольной формы. Добиться появления соответствующего сигнала на экране осциллографа и зарисовать его. Затем, так же как и в предыдущих упражнениях, найти первые 8—10 гармоник исследуемого напряжения, определить их амплитуду и частоту.

Обработка результатов эксперимента. Синтез сигнала по обнаруженным гармоникам осуществляется путем сложения этих гармоник с использованием для расчета на ЭВМ. Для этого период первой гармоники разбивается на большое число интервалов, и для каждого интервала алгебраически складываются значения напряжений всех гармоник.

Для расчета на ЭВМ в каждом упражнении необходимо подготовить следующие данные: число зарегистрированных гармоник N ; число интервалов M , на которые разбивается период первой гармоники; частоты f_n и амплитуды U_{0n} зарегистрированных гармоник. В результате расчета ЭВМ выдает массивы значений напряжений, соответствующих последовательным интервалам времени, графическое представление которых дает форму синтезированного напряжения.

Построить графики и сравнить форму полученных сигналов с формой исходного напряжения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит гармонический анализ?
2. Написать выражение, описывающее ряд Фурье в общем виде для прямоугольного напряжения.
3. В чем состоит предназначение каждого из приборов установки?
4. Объяснить предназначение основных органов управления приборов.
5. Каким образом устанавливается соотношение между амплитудами гармоник?
6. Как определить соотношение между амплитудами гармоник и их частотами с помощью осциллографа?
7. Каким образом производится синтез сигнала?
8. Каким должно быть соотношение между амплитудами и частотами гармоник прямоугольного напряжения?
9. Какую форму будет иметь «прямоугольное» напряжение, восстановленное по одной (двум, четырем, ...) гармоникам?
10. Какое значение при синтезе имеет число интервалов, на которые разбивают период первой гармоники?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.

Лабораторная работа 30

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ТРЕХСАНТИМЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ИЗЛУЧАЕМОГО РУПОРом

В лабораторной работе изучаются основные характеристики излучаемого рупором потока энергии. Определяются длина волны λ и характер поляризации излучения.

Описание экспериментальной установки

Излучателем электромагнитных волн является линейный вибратор. Роль такого вибратора выполняет антенна, возбужденная переменным электрическим током высокой частоты. Генератором такого сигнала является клистрон отражательного типа.

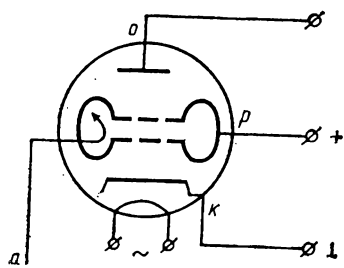


Рис. 1. Устройство клистрона

В свободном пространстве, в так называемой волновой зоне, где расстояние от вибратора до приемника $r \gg \lambda$, распространяются поперечные электромагнитные волны. Амплитуды напряженностей электрического E и магнитного H полей убывают, как $1/r$. Если вибратор, возбужденный клистроном, расположен в волноводе, который заканчивается рупором, то излучение происходит через отверстие рупора. В этом случае излучение направлено преимущественно вдоль оси рупора.

Отражательный клистрон является электровакуумным прибором (рис. 1), имеющим два электрода: катод K и отражатель O , между которыми вставлен объемный резонатор P .

Резонатор представляет собой полость в виде тора. Эта полость в средней части затянута двумя сетками. Резонатор расположен между отражателем O и катодом так, чтобы плоскости сеток были перпендикулярны к направлению движения потока электронов от катода к отражателю.

На резонатор подается положительный потенциал относительно катода; на отражатель — отрицательный потенциал. При включении питания клистрона в резонаторе появляются собственные колебания электромагнитного поля.

Автоколебания поддерживаются в резонаторе проходящим через него электронным потоком переменной плотности. Такой поток электронов создается в отражательном клистроне следующим образом. Электроны, ускоренные постоянным электрическим полем между катодом и первой сеткой, влетают в пространство между сетками резонатора. В этом пространстве, если в резонаторе уже происходят электромагнитные колебания, электроны по-

падают в высокочастотное переменное электрическое поле. Так как вектор напряженности электрического поля периодически меняет свое направление, то электроны ускоряются или замедляются в зависимости от момента их пролета через резонатор. Модулированные таким образом по скорости электроны влетают в область между второй сеткой резонатора и отражателем O . Здесь они сначала тормозятся постоянным полем между резонатором и отражателем, а затем, изменив направление движения на обратное, ускоряются и возвращаются снова к резонатору. На этом пути происходит пространственная группировка электронов: ускоренные высокочастотным полем резонатора электроны догоняют замедленные электроны. Образуется электронный поток переменной плотности. Если разность потенциалов между отражателем и резонатором подобрана так, что очередная группа электронов пересекает резонатор в момент, когда его высокочастотное поле вызывает их торможение, то за счет кинетической энергии электронов будут восполняться потери электромагнитной энергии колебаний резонатора.

Таким образом, непрерывно действующий механизм обратной связи, поддерживающий автоколебания в клистроне, состоит в том, что электроны, проходящие резонатор в одном направлении, модулируются по скоростям с частотой резонатора, а электроны, сгруппированные пространственно, проходят через резонатор в обратном направлении пульсирующим потоком, поддерживая в нем незатухающие колебания.

В полость резонатора вставлена петля связи с вибратором — антенной A , введенной в волновод, которая и возбуждает в последнем электромагнитные волны. Эти волны распространяются по волноводу к рупору, из которого излучаются в свободное пространство.

Клистрон укреплен непосредственно на волноводе. Питание клистрона осуществляется от источника, имеющего выходы: $=300$ В, 50 мА; $=200$ В, 10 мА; $\sim 6,3$ В, 2 А. Волновод, оканчивающийся рупором, расположен на подставке, позволяющей менять высоту расположения рупора над лабораторным столом и ориентацию рупора. Сама подставка может перемещаться вдоль стола. Клистрон и волновод имеют регулировочные устройства, позволяющие оптимизировать режим излучения.

Индикатором электрического поля служит зонд с детектором, контакты которого являются ненастроенной антенной; концы детектора присоединяются к микроамперметру. Эквивалентная схема измерительного зонда может быть представлена в виде, показанном на рис. 2, а, где \mathcal{E} — ЭДС, пропорциональная амплитуде напряженности электрического поля в точке наблюдения, R_i — внутреннее сопротивление детектора, R_n — внутреннее сопротивление микроамперметра, C — входная собственная емкость прибора. Из рис. 2 видно, что схема представляет собой электрическую цепь однополупериодного выпрямителя. Среднее значение выпрямленного тока в такой цепи будет определяться характе-

ристикой детектора, которая представлена на рис. 2, б. Для малых сигналов характеристика может быть представлена аналитической зависимостью между изменением напряжения и изменением тока в виде $I=aU^2$. Так как U пропорционально амплитуде поля E , то ток пропорционален E^2 и, следовательно, интенсивности S электромагнитного поля.

Основное требование, предъявляемое к зонду, заключается в том, что при внесении его в поле он должен не влиять или мало

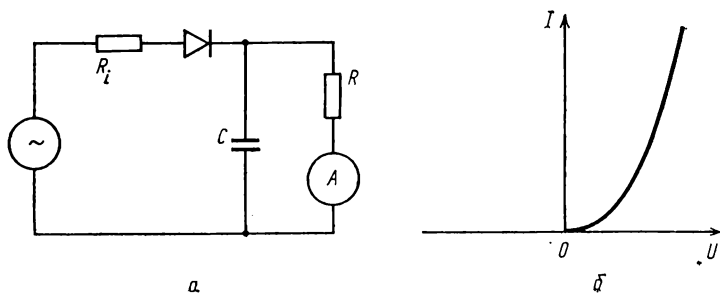


Рис. 2. Эквивалентная схема измерительного зонда (а); вольт-амперная характеристика детектора (б)

влиять на распределение измеряемого поля. Это требование накладывает ограничения на конструкцию самого прибора — индикатор должен быть мал по сравнению с длиной волны λ . Материал держателя, на котором крепится индикатор, должен иметь такую же диэлектрическую проницаемость ϵ , как и среда, в которой распространяется волна. Размеры детектора примерно в 8 раз меньше λ . В качестве держателя детектора-антенны взят пенопластовый стержень длиной 300 мм. Диэлектрическая проницаемость пенопласта $\epsilon=1,03$ мало отлична от ϵ воздуха. На конце стержня укреплен детектор-антенна, второй конец стержня крепится к подставке. Провода, соединяющие головки детектора-антенны с прибором постоянного тока, уложены в пазу, прорезанном в стержне. Провода, как правило, свивают и располагают так, чтобы они образовывали замкнутый контур наименьшей площади. Это делается для того, чтобы ЭДС, наведенная магнитным полем, была значительно меньше ЭДС, наведенной электрическим полем.

Детектор-антенна укреплен перпендикулярно к проводам: в этом случае электрическое поле, если вектор E параллелен антенне, наведет в ней максимальную ЭДС, а в соединительном проводе наводимая ЭДС практически будет равна нулю.

Зонд может вращаться вокруг вертикальной оси и перемещаться на лабораторном столе.

В комплект установки входит также металлическая пластина, укрепленная на специальной подставке. Эта пластина может служить отражателем электромагнитных волн.

Включение установки

Проверить расположение элементов установки на лабораторном столе и монтаж электрической схемы.

Включить источник питания клистрона в сеть и прогреть его 10 мин. Установить напряжения отражателя и резонатора клистрона, обеспечивающие максимальную мощность излучения, о чем можно судить по показанию микроамперметра, включенного в цепь СВЧ детектора.

Упражнение 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ

Определение длины волны λ производится измерением расстояния между максимумами или минимумами в системе стоячих волн.

Получить стоячие волны можно, отразив плоскую электромагнитную волну от металлической плоскости, на которую волна падает нормально. Для получения стоячих волн следует поставить на пути их распространения гладкую медную пластину, размером 300×400 мм. Пластину установить нормально к оси излучателя на расстоянии 400—450 мм от него.

Между пластиной и излучателем поместить зонд, и повернуть антенну зонда вокруг горизонтальной оси так, чтобы токоизмерительный прибор показал максимальное значение тока детектора.

Перемещая зонд вдоль оси излучателя, от пластины к излучателю, измерить распределение интенсивности $S=f(x)$. Координата зонда x отсчитывается от пластины. Перемещать зонд следует так, чтобы x менялось в пределах от 3 до 100 мм. Близко к излучателю проводить измерения не рекомендуется.

Построить график изменения интенсивности $S=f(x)$. Этот график иллюстрирует интерференцию двух волн — прямой и отраженной. Расстояние между точками, в которых амплитуда как функция x имеет одну и ту же фазу, равно половине длины бегущей волны. Это позволяет определить длину волны λ излучения рупора.

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Расположить излучатель и зонд по одной прямой линии так, чтобы ось одного была продолжением оси другого, и, поворачивая излучатель вокруг горизонтальной оси, измерить зависимость интенсивности волны от угла поворота $S(\beta)$.

При этом расстояние между излучателем и антенной должно быть 450 мм.

Повернуть излучатель вокруг его горизонтальной оси на 90° и вновь произвести измерения $S(\beta)$ в той же точке.

Результаты измерений представить в виде графиков $S_\beta/S_0 = f(\beta)$, где S_0 — максимальное значение интенсивности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен и работает отражательный клистрон?
2. Как возбуждается рупорный излучатель?
3. Какова ориентация вектора напряженности электрического поля E , излучаемого рупором?
4. Какой физической величине пропорциональны показания микроамперметра в приемнике излучения?
5. Что представляет собой плоская электромагнитная волна? Какими параметрами она характеризуется?
6. Как образуется стоячая волна и что она собой представляет?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983, § 62.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 229—243.

Лабораторная работа 31

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ В ОДНОПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

В лабораторной работе изучается явление распространения электромагнитной волны вдоль одиночного проводника. Выясняются условия получения бегущей волны в проводнике конечной длины, при этом измеряется распределение интенсивности волны вдоль линии, измеряется также распределение интенсивности в плоскости, перпендикулярной проводу, в зависимости от расстояния до провода. Наблюдаются стоячие волны в однопроводной линии и измеряется распределение интенсивности вдоль линии. По графику распределения интенсивности определяется длина стоячей волны λ .

Условия распространения волн в линии. В высокочастотной технике используются различные виды линий для передачи электромагнитной энергии от генератора к нагрузке (антенне, приемнику и т. п.). Это однопроводные, двухпроводные коаксиальные и волноводные линии. Каждая из них имеет свои особенности и область применения. В то же время основные черты процесса распространения электромагнитных волн вдоль этих линий могут рассматриваться с единой точки зрения аналогично двухпроводной линии.

Распространение волн вдоль одиночного провода имеет следующие особенности. Энергия, переносимая волной, локализуется вблизи поверхности провода и практически течет по трубке некоторого радиуса r_0 (r_0 отсчитывается от оси провода). Так, например, радиус трубки, по которой течет 75% энергии при длине волны $\lambda=3$ см, равен $\lambda_0=15$ мм (линия медного провода без диэлектрического покрытия, диаметр провода 1,7 мм). Скорость распространения такой бегущей поверхностной волны зависит от

диэлектрической проницаемости среды, окружающей провод. С увеличением диэлектрической проницаемости ϵ скорость распространения волны уменьшается.

Для получения бегущих волн на конце линии устанавливается поглотитель такой формы, чтобы электромагнитная энергия поглощалась им и превращалась в тепло. Однако полностью устранить отражение волны практически невозможно, и поэтому в линии всегда наряду с бегущей волной присутствует и слабая стоячая волна. Для характеристики степени отклонения от режима чисто бегущей волны вводится коэффициент стоячей волны (КСВ):

$$\text{КСВ} = \frac{E_{\text{макс}}}{E_{\text{мин}}},$$

где $E_{\text{макс}}$ и $E_{\text{мин}}$ — напряженности электрического поля в точках сечений с максимальной и минимальной интенсивностью. Для измерения коэффициента КСВ параллельно проводу перемещается кристаллический детектор, ток которого при слабых сигналах пропорционален квадрату напряженности электрического поля, т. е. пропорционален интенсивности волны. Поэтому, обозначая через $\alpha_{\text{макс}}$ и $\alpha_{\text{мин}}$ показания токового прибора в точках максимума и минимума интенсивности, получим для коэффициента стоячей волны

$$\text{КСВ} = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{макс}}}{\alpha_{\text{мин}}}}.$$

В линиях, используемых в технике, обычно считается удовлетворительным значение $\text{КСВ} = 1,1 - 1,2$.

Для получения в линии режима стоячих волн необходимо создать условия возможно более полного отражения энергии от ее концов. В этом случае в линии может быть получена значительно большая интенсивность электромагнитного поля по сравнению с режимом бегущей волны при одинаковой мощности генератора. Практически это может быть осуществлено разными методами. Простейшим примером такой линии может служить штыревая антенна, один конец которой связан с генератором, а другой свободен. Наибольшая интенсивность стоячей волны в ней будет, если длина антенны равна нечетному числу четвертей длины волны.

В работе используется металлический экран, который устанавливается на конце линии и обеспечивает хорошее отражение электромагнитных волн. В этом случае резонанс достигается при расстоянии экрана от генератора, кратном целому числу полуволн. Таким образом, однопроводная линия может быть использована не только для передачи энергии, но и как резонатор или антенна.

Описание экспериментальной установки. Источником электромагнитных колебаний с длиной волны 5—7 см является специальный генератор (Г4-81). Однопроводная линия представляет собой медный провод длиной 2 м, диаметром 1,7 мм. Измерение

распределения амплитуды напряжения вдоль линии производится индикатором, представляющим собой антенну (проводник длиной 8 мм), располагаемую параллельно линии вблизи нее. Антенна включена в цепь СВЧ диода и микроамперметра. Высокочастотное электрическое поле будет индуцировать в этой цепи ток, пропорциональный амплитуде напряженности поля. СВЧ диод имеет характеристику, соответствующую квадратичной зависимости силы тока от ЭДС, поэтому показания микроамперметра будут пропорциональны квадрату амплитуды напряженности электрического поля.

Упражнение 1. БЕГУЩИЕ ВОЛНЫ В ЛИНИИ

Включить генератор и прогреть его в течение 10 мин.

Снять зависимость интенсивности волны от расстояния по радиусу от оси провода $J(r)$ при постоянном расстоянии от генератора. Для этого установить индикатор на расстоянии, например, 500 мм от генератора и, перемещая его в плоскости, перпендикулярной к оси провода, произвести измерения. Результаты измерений оформить в виде таблицы и построить график $J(r)$.

Снять зависимость интенсивности волны вдоль линии $J(x)$ при $r = \text{const}$. Результаты измерений оформить в виде таблицы и построить график $J(x)$. Определить коэффициент стоячей волны линии КСВ.

Упражнение 2. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ В ЛИНИИ

На конце линии установить отражающий медный диск. Диск плавно при помощи салазок перемещается вдоль линии. Перемещая диск, настроить линию, т. е. подобрать ее длину так, чтобы на ней укладывалось целое число полуволн; при этом амплитуда стоячей волны будет максимальна. После настройки измерить распределение интенсивности $J = f(x)$ при $r = \text{const}$. Из полученного графика определить λ .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисовать электрическую схему установки.
2. Как возбуждается однопроводная линия?
3. Как устроен индикатор излучения?
4. Где локализуется энергия, «текущая» вдоль линии?
5. В каком случае энергия вдоль линии не движется? Как это показать на опыте?
6. Какие надо выполнить условия, чтобы волна распространялась вдоль линии?
7. Как измеряется длина волны λ излучения и будет ли она отлична от длины волны излучения, измеренной в вакууме?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 32

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ

В лабораторной работе измеряется распределение амплитуд напряжения и тока вдоль двухпроводной линии при различных режимах ее работы на ультравысоких частотах.

Условия распространения волны в двухпроводной линии. Система, состоящая из источника электромагнитных колебаний, двухпроводной линии и приемника электромагнитных волн (рис. 1), часто называется *лехеровой системой*, по имени ученого Лехера, впервые ее осуществившего. Электромагнитная энергия передается полностью от источника в нагрузку через двухпроводную линию только тогда, когда в линии нет потерь и отражений энергии, т. е. имеет место бегущая волна. В бегущей волне амплитуды напряжения и тока не зависят от координаты x . Чисто бегущая волна могла бы существовать в бесконечно длинной однородной линии без потерь. В ограниченной по длине линии тоже может иметь место бегущая волна, если на конце линии между проводами включить определенное сопротивление, равное входному сопротивлению аналогичной бесконечной линии и способное поглотить всю энергию, поступающую от источника. Это сопротивление, которое равно отношению амплитуды напряжения к амплитуде тока в бегущей волне, называют *волновым сопротивлением* линии. Волновое сопротивление линии зависит от ее геометрических и электрических свойств.

Если считать, что тепловые потери тока в линии малы, а утечка между проводами незначительна, то приближенно волновое сопротивление будет равно

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1)$$

где L — индуктивность единицы длины линии и C — емкость, приходящаяся на единицу длины линии. Индуктивность L и емкость C зависят от геометрических размеров проводов и их взаимного расположения.

Для того чтобы электромагнитную энергию полностью передать от источника через двухпроводную линию в приемник, необходимо сделать входное сопротивление приемника равным волновому сопротивлению линии Z_0 .

Если мы нагрузим линию на конце сопротивлением, большим или меньшим волнового, то появится отраженная волна, и наряду с бегущей волной в линии установится также и стоячая волна. Если линия *закорочена* ($R_n=0$) или *разомкнута* ($R_n=\infty$), на

конце линии происходит полное отражение энергии, и в полубесконечной линии установится полностью стоячая волна.

В том случае, когда частота колебаний источника близка к одной из собственных частот линии, имеет место резкое увеличение амплитуды колебаний тока и напряжения в линии (явление резонанса). Частоты собственных колебаний линии определяются из условия, что по длине линии укладывается целое число чет-

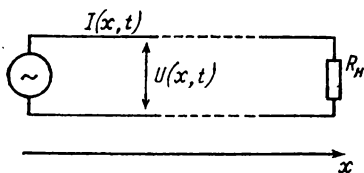


Рис. 1. Двухпроводная линия

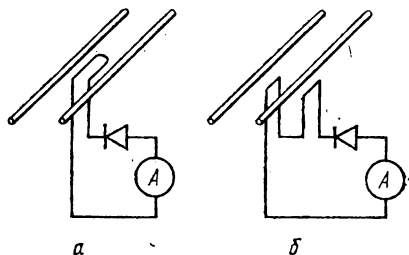


Рис. 2. Схемы индикатора тока (а) и индикатора напряжения (б)

вертей длины волны в соответствии с условиями на ее концах.

Если линия закорочена (или разомкнута) на обоих концах, то для каждого типа собственных колебаний на линии должно уложиться четное число четвертей волны. Если линия с одного конца закорочена, а с другого конца разомкнута, то для собственных колебаний в линии на ее длине должно укладываться нечетное число четвертей волны.

Необходимо иметь в виду, что в реальных двухпроводных линиях не могут быть практически осуществлены режимы чисто бегущих или чисто стоячих волн. Причины этого состоят в наличии во всякой реальной линии отражений и потерь, связанных с выделением джоулева тепла и излучением электромагнитной энергии в окружающее пространство.

Таким образом, в реальной двухпроводной линии всегда имеет место смешанный режим бегущих и стоячих волн. В настоящей работе, меняя сопротивление R_H на конце линии, можно добиться условий, при которых будут преобладать или бегущие волны ($R_H \approx Z_0$), или стоячие волны ($R_H \rightarrow 0$ или $R_H \rightarrow \infty$).

Описание экспериментальной установки

Источником электромагнитных колебаний с длиной волны $5 \div 7$ см является специальный генератор (Г4-81). Двухпроводная линия представляет собой два параллельных провода длиной 2 м, диаметром $d = 1,7$ мм, находящихся на расстоянии $a = 20$ мм друг от друга.

Волна, распространяющаяся от генератора по коаксиальному кабелю, переходит на двухпроводную линию через разветвитель, устроенный таким образом, что путь для волны в одном из разветвлений на $\lambda/2$ больше, чем в другом. В результате этого в про-

водах линии распространяются параллельно друг другу две волны, сдвинутые по фазе на π .

Электрическое поле E в плоскости, перпендикулярной проводам, для любого момента времени аналогично полю двух тонких разноименно заряженных длинных нитей. Картина силовых линий магнитного поля H будет примерно такой же, как картина поля двух тонких проводов, по которым ток протекает в противоположных направлениях.

Измерения распределения амплитуд тока и напряжения вдоль линии производятся индикаторами, схемы которых изображены на рис. 2. Виток связи прибора на рис. 2, а, который мы будем называть прибором тока, ориентируется перпендикулярно к направлению магнитного поля H . ЭДС индукции, наводимая в нем высокочастотным магнитным полем H , будет пропорциональна амплитуде тока в том сечении линии, напротив которого расположен виток связи. Токоизмерительный прибор в цепи измерительного витка включен через кристаллический детектор, вольт-амперная характеристика которого нелинейна. Используемый участок характеристики соответствует квадратичной зависимости силы тока от ЭДС, поэтому показания токоизмерительного прибора, регистрирующего значение знакопеременного высокочастотного тока, будут в свою очередь пропорциональны квадрату амплитуды напряженности магнитного поля, пронизывающего виток, и соответственно квадрату амплитуды силы тока в двухпроводной линии.

Приемная антенна индикатора напряжения располагается параллельно проводам линии вблизи них (рис. 2, б). Высокочастотное электрическое поле E будет индуцировать в цепи прибора высокочастотный ток, амплитуда которого пропорциональна амплитуде напряжения между проводами, в том сечении линии, около которого расположены витки связи. По причинам, изложенным выше, в этом случае показания токоизмерительного прибора будут тоже пропорциональны квадрату амплитуды переменного электрического поля, а не ее первой степени.

Необходимо учесть, что напряженность электрического и магнитного полей вблизи провода очень сильно убывает с расстоянием от провода: так, например, изменение расстояния на один-два миллиметра может привести к значительной ошибке, поэтому необходимо при измерении индикатор держать на одном и том же расстоянии от линии на всей ее длине. Рекомендуется во время измерений держаться по возможности дальше от линии, так как, находясь вблизи линии, экспериментатор будет влиять на распределение поля.

Упражнение 1. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ

Включить генератор в сеть и прогреть его в течение 10 мин. Для измерения длины волны с помощью двухпроводной линии удобно использовать условия, когда в линии установилось одно

из ее собственных колебаний (стоячая волна), т. е. имеет место резонанс линии с генератором. Для того чтобы настроить линию в резонанс, линию замыкают хорошо проводящим диском и при помощи индикаторов отыскивают положение диска, соответствующее этому режиму линии. Индикаторы напряжения и тока дают тем большие показания соответственно в пучностях напряжения или тока, чем точнее линия настроена в резонанс. Надо иметь в виду, однако, что при перемещениях диска смещаются и положения пучностей, в которые надо помещать индикаторы.

Расстояние между двумя максимумами напряжения или тока, найденное перемещающимися индикаторами $l = \lambda/2$.

Упражнение 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУД ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ ЛИНИИ

Эти измерения следует провести для двух нагрузок на конце линии: $R_n = 0$ — линия замкнута диском и $R_n = Z_0$ — на линии установлен поглотитель. В настоящей установке нет сосредоточенных сопротивлений, которые обычно употребляются в радиосхемах, а на конце линии стоит поглотитель высокочастотной энергии. Поглотитель изготовлен в виде конуса из войлока. Войлок пропитан раствором графита. Такой поглотитель на конце линии эквивалентен нагрузке линии волновым сопротивлением. Однако необходимо учесть, что даже при очень длинных линиях и хороших поглотителях невозможно получить только бегущую волну, поэтому здесь будут возникать одновременно бегущая и отраженная волны. Близко к генератору производить измерения не рекомендуется.

Перемещая индикаторы вдоль линии, снять зависимости амплитуды тока $I(x)$ и амплитуды напряжения $U(x)$ для случая стоячей волны ($R_n = 0$) и для случая бегущей волны ($R_n = Z_0$). Зависимости $I(x)$ и $U(x)$ для каждого случая представить графически. Проанализировать полученные результаты.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисовать электрическую схему установки.
2. Как возбуждается двухпроводная линия?
3. Как устроен индикатор? Какую величину он измеряет?
4. Как локализуется поле двухпроводной линии согласно теории и что наблюдается на опыте?
5. Каковы условия получения стоячей волны на линии?
6. Как измеряется длина волны λ и будет ли она отлична от измеренной длины волны λ_0 излучения в вакууме?
7. Как получить бегущую волну вдоль линии?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

ЛАБОРАТОРИЯ ОСНОВ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторная работа 33

ЭЛЕКТРОННОЕ АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В настоящей лабораторной работе изучается операционный усилитель постоянного тока, позволяющий выполнять с аналоговыми сигналами операции умножения на коэффициент, суммирования, дифференцирования, интегрирования. В заключение изучается работа электронной схемы из четырех операционных элементов, позволяющей «электронным образом» решать дифференциальное уравнение второго порядка.

Моделирование физических явлений. Построение моделей является неотъемлемой частью научного мышления человека. Создавая модель изучаемого объекта или явления, исследователь отвлекается от многочисленных его свойств, несущественных в данный момент. Модель должна быть достаточно проста по сравнению со своим оригиналом, чтобы сделать возможным его изучение. С другой стороны, она должна правильно воспроизводить основные свойства объекта с точки зрения проводимого исследования.

Аналоговое моделирование основывается на одинаковом математическом описании процессов, происходящих в объекте и в модели, т. е. поведение объекта и модели, имеющих различную физическую природу, описывается одними и теми же дифференциальными уравнениями. С помощью математической модели производится решение этих уравнений, тем самым исследуются процессы, происходящие в объекте.

Модели, в которых математические операции выполняются путем простого математического сложения, называются цифровыми вычислительными машинами. Результат их решения выдается дискретно.

Правильный выбор критерия, умение абстрагироваться от несущественных сторон явления при решении поставленной задачи являются главным искусством исследователя. Однако процесс решения получаемых уравнений часто оказывается трудоемким. В большинстве случаев решение дифференциальных уравнений (особенно нелинейных) не удается найти в явном виде. Тогда единственным средством проверки адекватности моделей является применение вычислительной техники.

В соответствии с различными принципами действия вычислительных машин различают устройства дискретного и непрерывного действия. Вычислительные машины дискретного действия позволяют получать решения в результате выполнения определенной последовательности арифметических операций по заранее уста-

новленной программе счета. Все преобразования в этих машинах сводятся к операции сложения.

Машины непрерывного действия работают по принципу математического моделирования. Математическое моделирование — это моделирование аналогиями, имеющими различную физическую природу, но описываемыми одинаковыми уравнениями.

При этом операции осуществляются на основе некоторых физических законов, которые дают необходимые математические зависимости между величинами. Результат решения представляется непрерывными функциями времени. Такие модели называются непрерывными или аналоговыми вычислительными машинами. Вычислительные машины чаще всего состоят из электронных или магнитных элементов, поскольку измерение величин и регулировка в цепях с такими элементами осуществляются наиболее просто и точно.

Целью настоящей работы является изучение простейшей электронной математической модели непрерывного действия.

Краткое описание устройства и принцип действия электронных моделей.

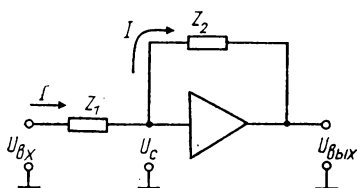


Рис. 1. Схема операционного элемента

Электронные моделирующие установки собираются из решающих элементов, с помощью которых могут выполняться различные математические операции. Операционный элемент состоит из усилителя постоянного тока, у которого в прямой цепи включено сопротивление Z_1 , а в обратной — Z_2 (рис. 1). На рисунке усилитель обозначен треугольником. Чтобы уста-

новить связь между напряжениями на входе и выходе элемента ($U_{вх}$ и $U_{вых}$), используют уравнение Кирхгофа. При этом полагают, что токи через сопротивления Z_1 и Z_2 равны (ток через операционный усилитель очень мал, так как его входное сопротивление очень велико).

Тогда

$$U_{вх} - U_c = IZ_1, \quad (1)$$

$$U_c - U_{вых} = IZ_2,$$

где U_c — напряжение на входной сетке операционного усилителя,

$$U_{вых} = -KU_c, \quad (2)$$

где K — коэффициент усиления разомкнутого усилителя. Если из полученной системы уравнений (1) и (2) исключить величины U_c и I , то получим

$$U_{вых} = - \frac{\frac{Z_2}{Z_1}}{1 + \frac{1}{K} \left(\frac{Z_2}{Z_1} + 1 \right)} U_{вх}. \quad (3)$$

Множитель, стоящий при $U_{\text{вх}}$, называется коэффициентом передачи элемента. Так как коэффициент усиления K разомкнутого усилителя очень велик (10^4 — 10^7), коэффициент передачи элемента с высокой степенью точности равен $-Z_2/Z_1$, т. е.

$$U_{\text{вых}} = -\frac{Z_2}{Z_1} U_{\text{вх}}. \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент передачи элемента зависит только от сопротивлений цепей прямой и обратной связи.

Цепь обратной связи может содержать омические сопротивления, конденсаторы и катушки индуктивности, поэтому Z_1 и Z_2 являются комплексными функциями частоты. Характер этих функций $Z_1(\omega)$ и $Z_2(\omega)$ определяет вид операции, выполняемой элементом.

Умножение на коэффициент. Когда в прямой и обратной цепях элемента включены омические сопротивления, т. е. $Z_1(\omega) = R_1$, $Z_2(\omega) = R_2$, то коэффициент передачи не зависит от частоты, и элемент производит умножение входного напряжения на постоянный множитель:

$$U_{\text{вых}} = -a U_{\text{вх}}, \text{ где } a = \frac{R_2}{R_1}. \quad (5)$$

Такой элемент называется масштабным множителем и обозначается, как показано на рис. 2, а.

Суммирование. При суммировании нескольких напряжений

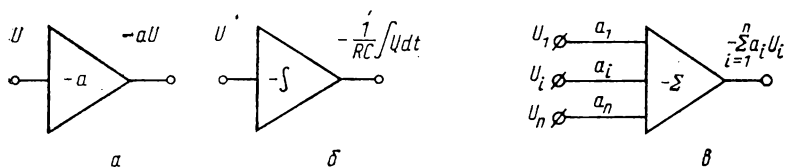


Рис. 2. Изображение масштабного множителя (а), интегратора (б) и сумматора (в)

каждое может быть при этом усилено. Напряжения, подлежащие суммированию и усилению U_1, U_2, \dots, U_n , подаются на вход усилителя через резисторы R_1, R_2, \dots, R_n (рис. 3). В цепь обратной связи включен резистор R_0 , через который течет ток, равный сумме токов, проходящих через резисторы входов, т. е. можно написать

$$\frac{U_{\text{вых}} - U_C}{R_0} = \frac{U_C - U_1}{R_1} + \frac{U_C - U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_C - U_n}{R_n}, \quad (6)$$

где U_C — напряжение в точке С. Очевидно, что $U_C \approx U_{\text{вых}}/K$. Так как коэффициент K достаточно велик, то величиной U_C можно пренебречь, так как она мала по сравнению с входным и выход-

ным напряжениями, которые суть величины одного порядка. Тогда

$$U_{\text{вых}} = -U_1 \frac{R_0}{R_2} - \dots - U_n \frac{R_0}{R_n} = -\sum_{i=1} U_i \frac{R_0}{R_i}. \quad (7)$$

Таким образом, с помощью схемы операционного усилителя, изображенного на рис. 3, можно производить операции сложения и умножения на постоянный множитель в соответствии с правилом

$$I = -\sum_{i=1}^n K_i x_i, \quad (8)$$

где $K_i = R_0/R_i$ — коэффициент передачи по i -му входу. Следовательно, коэффициент передачи операционного элемента зависит только от соотношения сопротивлений и не зависит от коэффициента усиления K , если усиление велико. Поэтому усилитель должен иметь высокий коэффициент усиления во всем диапазоне частот входных напряжений, включая низкие и инфранизкие частоты (порядка единиц и долей герц), так как модулируемое напряжение обычно является медленно меняющейся функцией времени.

Интегрирование. Когда в прямой цепи включено омическое сопротивление R , а в обратной — конденсатор C , т. е. $Z_1(\omega) = R$, $Z_2(\omega) = 1/j\omega C$, то

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{j\omega CR} U_{\text{вх}}. \quad (9)$$

Пусть на вход подается гармонический сигнал $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}^0 e^{j\omega t}$. Тогда выражение (9) можно переписать в виде

$$U_{\text{вых}} = -\frac{U_{\text{вх}}^0}{RC} \int e^{j\omega t} dt, \quad (10)$$

т. е. выходное напряжение элемента пропорционально интегралу от напряжения на его входе:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt. \quad (11)$$

Такой решающий элемент называется интегратором и обозначается, как показано на рис. 2, б.

Дифференцирование. Если в цепи обратной связи усилителя включен резистор R , а сигнал подается на вход через конденсатор C , то операционный элемент работает как дифференциатор (рис. 2, в):

$$U_{\text{вых}} = -j\omega RC U_{\text{вх}}, \quad U_{\text{вых}} = -RC U_{\text{вх}}^0 \frac{d}{dt} e^{j\omega t} = -RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}, \quad (12)$$

т. е. выходное напряжение элемента пропорционально производной от напряжения на его входе.

Модель линейной системы второго порядка. Рассмотрим реальный физический процесс — движение груза на пружине в среде с трением. Соответствующее уравнение движения имеет вид

$$m\ddot{y} = -ky - h\dot{y} + F_0 \cos pt \quad (13)$$

или

$$\ddot{y} = -\omega_0^2 y - 2\delta\dot{y} + F \cos pt, \quad (14)$$

где $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ — собственная круговая частота колебаний, $\delta = h/2m$ — коэффициент затухания, $F = F_0/m$ — амплитуда внешней

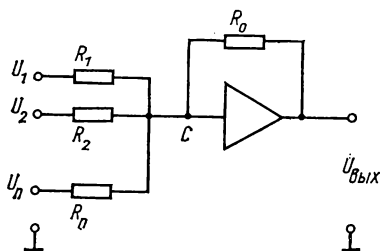


Рис. 3. Схема сумматора

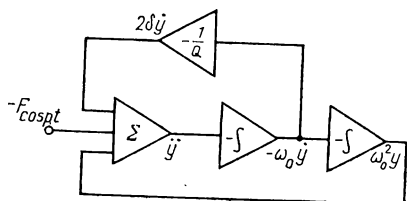


Рис. 4. Схема модели линейной системы второго порядка

силы, отнесенная к массе груза m . Структурная схема модели изображена на рис. 4.

Здесь на выходе сумматора образуется напряжение, пропорциональное ускорению груза, на выходе первого интегратора — скорости, умноженной на частоту. Напряжение на втором интеграторе, пропорциональное $\omega_0^2 y$, можно рассматривать как аналог упругой силы, отнесенной к массе и взятой с обратным знаком. Наконец, напряжение на выходе масштабного множителя — $1/Q$ является аналогом силы трения.

Сопоставляя уравнение (14) и схему (см. рис. 4), видим, что на вход сумматора подаются напряжения, соответствующие членам уравнения (10) в правой части его, а на выходе сумматора получается напряжение, соответствующее другой части уравнения. Таким образом, напряжения на выходах элементов модели связаны таким же уравнением, как смещение, скорость и ускорение груза, поэтому в модели можно наблюдать такие же закономерности, как и при колебании груза.

Аналитическое решение уравнения (14) имеет вид

$$y = Ae^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0) + B \sin(pt + \varphi), \quad (15)$$

где A , ω и φ_0 — амплитуда, частота и начальная фаза собственных колебаний грузика, B — амплитуда вынужденных колебаний, φ — разность фаз между фазой смещения при вынужденных колебаниях и фазой внешней силы.

В отсутствие внешней силы в модели можно наблюдать собственные колебания. Для этого достаточно, чтобы начальное смещение $y(0)$ или начальная скорость $\dot{y}(0)$ были отличны от нуля.

Частота колебаний определяется коэффициентом передачи интеграторов, быстрота затухания — коэффициентом передачи множителя « $-1/Q$ ». Регулируя эти коэффициенты передачи, можно менять ω_0 и δ и тем самым получать электронные модели грузов, колеблющихся с различными собственными частотами и затуханием. Когда коэффициент затухания равен нулю, что в модели эквивалентно размыканию цепи умножителя, колебания продолжают практически сколь угодно долго.

При подаче гармонического напряжения — $F \cos pt$ в модели, как и у груза на пружинке, возникают вынужденные колебания. На частоте внешнего воздействия p , совпадающей с собственной частотой ω_0 , в модели наступает явление резонанса с характерным для него увеличением амплитуды колебаний.

Таким образом, электронная модель, собранная по схеме рис. 4, является аналоговой моделью колебаний груза на пружинке.

Описание экспериментальной установки. Экспериментальная установка состоит из макета, источника питания ± 15 В, генератора сигналов (Г16-15), двухлучевого осциллографа (С1-70) и цифрового вольтметра (В7-16).

Макет — это электронная схема, основными элементами которой являются четыре операционных усилителя, представляющие собой интегральные микросхемы (типа К140УД8). Верхняя панель макета выполняет роль наборного поля. На него выведены входы и выходы усилителей, а также гнезда, соединенные с различными другими элементами. Соединение этих элементов между собой производится гибкими проводами со штекерами согласно структурной схеме.

Переключатель В1 имеет два положения: «контроль» и «работа». При выполнении упражнения он должен находиться в положении «работа». Переключатель В2 в положении «начальные условия» позволяет задавать начальные условия (начальное смещение, начальную скорость) с помощью ступенчатых регуляторов « y_0 » и « \dot{y}_0 ». Переводом этого переключателя в положение «работа» электронная схема запускается.

Регулятор В3 позволяет менять коэффициент передачи первого интегратора (при изучении модели колебаний грузика), что приводит к изменению частоты собственных колебаний.

Гнезда « ± 15 В» и « -15 В» служат для подключения к макету источника питания. При этом на гнездах « ± 2 В» и « ± 4 В» появляется соответствующее напряжение.

В установке используется генератор Г6-15, вырабатывающий сигналы синусоидальной и прямоугольной форм. Двухлучевой осциллограф позволяет одновременно наблюдать форму напряжений, действующих в двух различных точках схемы (например, $U_1 \sim y$, $U_2 \sim \dot{y}$), и сопоставить их друг с другом в различные моменты времени; цифровой вольтметр В7-16 используется для измерения постоянных напряжений на входе и выходе операционно-

го элемента в режиме умножения на коэффициент и суммирования.

Подготовка модели к работе. После предварительного знакомства с установкой собрать схему на макете, подключить к ней источник питания и другие приборы, необходимые для выполнения первого упражнения, включить приборы в сеть.

После прогрева приборов в течение 5—10 мин установить режим их работы, обеспечивающий выполнение упражнения.

Упражнение 1. УМНОЖЕНИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ

Собрать схему в соответствии с рис. 5. Выход операционного элемента ОЭ-1 подключить к входу X вольтметра. На вход опера-

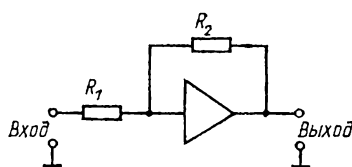


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для изучения операции умножения на коэффициент

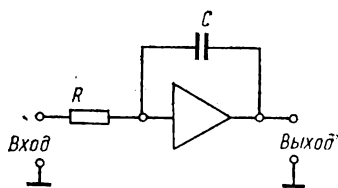


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для изучения операционного интегрирования

ционного элемента подать напряжение $+2$ В. Варьируя R_1 и R_0 , измерить величину выходного напряжения.

Необходимо помнить, что на выходе операционного усилителя сигнал не должен превышать примерно 12 В. В соответствии с этим при $U_{вх}=2$ В коэффициент передачи операционного усилителя не должен превышать 6. Результаты измерений занести в таблицу, указав соответствующие величины R_0 и R_1 . Проанализировать полученные результаты.

Упражнение 2. СУММИРОВАНИЕ

Используя наличие нескольких входов операционного элемента ОЭ-1, подать на них разные напряжения (от гнезд ± 2 В, ± 4 В). Варьируя подаваемые напряжения, измерить величину выходного напряжения с помощью вольтметра. Результаты измерений оформить в виде таблицы, где указать также величины R_0 , R_1 и ожидаемый результат суммирования.

Упражнение 3. ИНТЕГРИРОВАНИЕ

Собрать схему в соответствии с рис. 6. На вход ОЭ подать с генератора напряжение прямоугольной формы. С выхода ОЭ напряжение подать на вход Y_1 осциллографа, а на вход осциллографа Y_2 подать то же напряжение, какое подается на вход ОЭ.

Установить режим работы генератора и осциллографа и подобрать величины R и C таким образом, чтобы на экране осциллографа хорошо наблюдались бы входной сигнал и результат его интегрирования. Зарисовать наблюдаемые осциллограммы, сопоставляя их вид для одних и тех же моментов времени.

Подать на вход ОЭ напряжение пилообразной, а затем и синусоидальной формы и также зарисовать соответствующие осциллограммы.

Упражнение 4. ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ

Собрать схему для наблюдения электронного дифференцирования. Подать на вход ОЭ напряжение пилообразной, а затем и синусоидальной формы и зарисовать получающиеся осциллограммы.

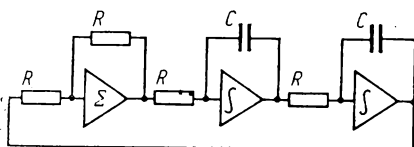


Рис. 7. Схема экспериментальной установки для изучения модели линейной системы второго порядка

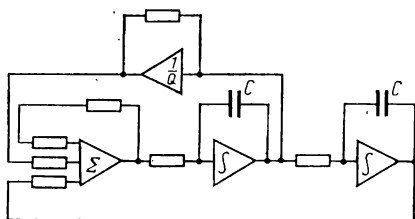


Рис. 8. Схема экспериментальной установки для изучения модели линейной системы второго порядка при наличии затухания

Упражнение 5. МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЯ ГРУЗИКА НА ПРУЖИНЕ

а) Собственные колебания. Собрать схему в соответствии с рис. 7. К выходу схемы подключить вход Y_1 осциллографа. Установить некоторые начальные условия. Запустить схему. Добиться на экране осциллографа наблюдения колебательного процесса. Убедиться в том, что при вращении потенциометра B_3 действительно меняется частота колебаний. Зарисовать наблюдаемую осциллограмму.

б) Затухающие колебания. Собрать схему в соответствии с рис. 8. Здесь к выходу первого интегратора подключен вход ОЭА, который работает в режиме умножения на коэффициент (умножает на 2δ). В качестве резистора обратной связи здесь используется потенциометр, смонтированный на панели макета. Результат умножения подать на один из входов сумматора. Запустить схему. Добиться наблюдения на экране осциллографа дуга затухающих колебаний. Измерить амплитуды 1-го и n -го

колебаний, вычислить логарифмический декремент затухания по формуле

$$\Psi = \frac{1}{n-1} \ln \frac{U_1}{U_n}, \quad (16)$$

где U_1 и U_n — амплитуды колебаний, отстоящих друг от друга на $n-1$ периодов.

в) Вынужденные колебания. К свободному входу сумматора подать напряжение гармонической формы с генератора. Запустить модель. Наблюдать на экране процесс установления вынужденных колебаний. Меняя частоту генератора вблизи частоты собственных колебаний модели и каждый раз запуская модель, наблюдать процесс установления вынужденных колебаний.

Зарисовать характерные осциллограммы. Проанализировать все зарисованные осциллограммы, сопоставить их вид с решением (15) уравнения (14).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое модель? Чем отличается математическое моделирование от физического? Какие примеры моделей вы знаете?
2. В чем состоит разница между вычислительными устройствами непрерывного действия (аналоговыми вычислительными машинами) и устройствами дискретного действия (цифровыми вычислительными машинами)?
3. Нарисовать схему операционного элемента и привести выражение для передаточной функции масштабного множителя, интегратора, дифференциатора, сумматора.
4. Записать уравнение движения грузика массы m , колеблющегося на пружинке жесткости K в вязкой среде с коэффициентом трения δ под действием вынуждающей силы $F_0 \cos pt$, а также вид общего решения этого уравнения.
5. Нарисовать структурную схему электронной модели, позволяющей аналоговым образом решать уравнение движения грузика.

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985.

Лабораторная работа 34

ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АЛГЕБРЫ ЛОГИКИ

В настоящей лабораторной работе изучаются способы создания электронных схем, выполняющих различные логические операции.

В современной технике особую группу радиоэлектронных уст-

роЙств образуют так называемые цифровые системы. Наиболее известным применением таких устройств являются цифровые вычислительные машины (ЦВМ).

Когда мы пишем программу для ЦВМ или выполняем на микрокалькуляторе, скажем, действия сложения или вычитания, мы не очень задумываемся над тем, как эти действия осуществляются. Заметим, что все вычислительные операции — от умножения и деления, возведения в степень и извлечения корня до дифференцирования, интегрирования и т. д. — могут быть сведены к самым простым — сложению и вычитанию, многократно повторенным (поэтому блок, в котором производятся вычисления, называется сумматором).

Но при выполнении машинным путем даже простейшей операции — сложения возникает проблема — как наиболее удобно представить, смоделировать цифры и числа, над которыми выполняется сложение, и результаты этого действия над числами?

Уже первые шаги в создании ЭВМ привели к выводу, что непосредственное использование десятичной системы счисления здесь неудобно, моделировать ее обеспечением десяти стабильных электрических, магнитных или электронных состояний слишком сложно и ненадежно. Наиболее удобной оказалась двоичная система счисления.

Целочисленная двоичная арифметика. В двоичной системе счисления любое число может быть представлено комбинацией всего двух символов, двух цифр, которым соответствуют два устойчивых электрических, электронных или магнитных состояния. К тому же выполнение арифметических действий в двоичной системе счисления очень просто, особенно в случае сложения и умножения.

Для изображения чисел в двоичной системе счисления употребляются всего две цифры — 0 и 1, моделирование которых в вычислительных устройствах гораздо проще, чем скажем, десяти цифр 0—9. При этом, как и в десятичной системе счисления, основание системы (число 2) изображается единицей во втором разряде слева, т. е. как 10; тройка получится прибавлением к этому числу единицы, т. е. $10 + 1 = 11$; четверка, равная 2^2 , изобразится как 100 (в десятичной системе $10^2 = 100$) и т. д. Таким образом, числам 0, 1, 2, ..., 9 в десятичной системе будут соответствовать следующие числа в двоичной системе:

Десятичная система	Двоичная система	Десятичная система	Двоичная система
0	0	5	101
1	1	6	110
2	10	7	111
3	11	8	1000
4	100	9	1001

Одну двоичную цифру часто называют бит (по-английски — bi(nary digi)t — двоичная цифра): бит может принимать значе-

ние 0 или 1. Используется также большая единица — байт (byte), равная 8 битам. Для оценки объема памяти или потока информации применяются килобайт $1 \text{ К} = 1024 \text{ байт}$ (т. е. 2^{10} байт) и мегабайт $1 \text{ М} = 1024 \text{ К}$ (т. е. 2^{20} байт).

Разберемся, как в двоичной системе счисления производятся арифметические операции с целыми числами. Для выполнения сложения нужно лишь знать простейшую таблицу, имеющую вид

- а) $0+0=0$;
- б) $0+1=1$;
- в) $1+1=10$.

Две единицы младшего разряда дают единицу в старший разряд. Рассмотрим пример сложения двух многозначных двоичных чисел:

$$\begin{array}{r}
 + 1101101 \text{ — 1-е слагаемое,} \\
 1001111 \text{ — 2-е слагаемое,} \\
 0100010 \text{ — поразрядная сумма без учета переносов,} \\
 1 \ 11 \ 1 \text{ — переносы,} \\
 10111100 \text{ — окончательная сумма.}
 \end{array}$$

Непосредственно под двумя слагаемыми записан результат поразрядного сложения без учета переносов. В тех разрядах, в которых оба слагаемых равны 1, поразрядная сумма равна 0. В этих разрядах образовался перенос в соседний старший разряд, который отмечен в следующей строке. В результате сложения строки поразрядных сумм со строкой переносов получается окончательная сумма.

Таблица вычитания двоичных чисел непосредственно вытекает из таблицы сложения и имеет следующий вид:

- а) $0-0=0$;
- б) $1-0=1$;
- в) $1-1=0$;
- г) $10-1=1$.

Кроме того, полезно знать, что $100 \dots 0 - 1 = 111 \dots 1$.
 n нулей n единиц

Если при поразрядном вычитании приходится вычитать из нуля в уменьшаемом единицу в вычитаемом, то делается заем в соседнем старшем разряде, т. е. единица старшего разряда представляется как две единицы данного разряда. Вычитание в этом случае выполняется по правилу г) таблицы вычитания.

Пример: —
$$\begin{array}{r}
 11100011 \\
 10110110 \\
 \hline
 00101101
 \end{array}$$

В двух младших разрядах не было необходимости производить заем. В третий разряд заем сделан из шестого разряда (ближайшая единица). В промежуточных разрядах вычитание производилось из единицы. В шестом разряде в результате заема из третьего разряда оказался нуль, поэтому делается заем из соседнего седьмого разряда.

Умножение двух двоичных чисел столбиком выполняется так же, как и умножение двух десятичных чисел, т. е. множимое последовательно умножается на каждую цифру множителя, начиная с младшей, и для учета веса соответствующей цифры множителя сдвигается влево на такое число разрядов, на какое соответствующий разряд множителя сдвинут относительно младшего.

$$\begin{array}{r} \text{Пример:} \quad \times \quad \begin{array}{r} 110101 \\ 1011 \end{array} \\ \hline \begin{array}{r} 110101 \\ 110101 \\ 110101 \end{array} \\ \hline 1001000111 \end{array}$$

Деление двух двоичных чисел выполняется аналогично делению двух десятичных чисел. Алгоритм деления, равно как и действия с дробными числами, в двоичной системе счисления не представляет принципиальных трудностей. Для наших целей достаточно ознакомление лишь с принципами двоичной арифметики.

Как уже указывалось, двоичная арифметика физически может быть реализована с помощью цифровых схем. Коренным отличием цифровых схем от других радиоэлектронных устройств является то, что информация в них представляется с помощью устройств, имеющих только два устойчивых состояния. Причем величина напряжения (или тока) в каждом из этих устойчивых состояний особого значения не имеет, главное, чтобы это напряжение лежало в определенных, заранее оговоренных, границах, и основное требование состоит в том, чтобы области напряжений, соответствующие этим двум состояниям, не пересекались. В этом и заключается основное отличие цифровых устройств от так называемых аналоговых, где информация представляется в виде величины напряжения (или тока). Простейшим примером цифрового устройства служит ключ, который может находиться только в замкнутом или разомкнутом состоянии.

Так как промежуточного состояния между двумя данными быть не может, то легко провести аналогию между такой системой и алгеброй логики (булевой алгеброй), которая, как известно, оперирует понятиями истинности или ложности высказываний. Поставив в соответствие замкнутому состоянию ключа истинное высказывание (или 1), а разомкнутому — ложное высказывание (или 0), можно применить весь аппарат алгебры логики для анализа поведения такого устройства. Именно поэтому цифровые устройства иногда еще называют логическими устройствами.

Кроме рассмотренного способа представления чисел в виде комбинации нулей и единиц в настоящее время разработано большое число отличных от двоичной системы счисления способов представления чисел. Обычно эти способы представления называют не системой счисления, а кодом. Однако большинство этих кодов имеет значительно более узкую область применения по сравнению с двоичным кодом, и рассмотрение их выходит далеко

за рамки данной работы. Коротко остановимся на двух относительно широко распространенных кодах — это двоично-десятичный код (ДДК) и позиционный код (ПК).

Для преобразования числа в ДДК необходимо преобразовать в двоичную систему счисления каждую цифру десятичного числа, сохранив при этом их порядок следования. Так, число 123 в ДДК имеет вид 000100100011, т. е. каждая цифра десятичного числа представляется четырехразрядным двоичным числом. Преимущество такого способа записи чисел состоит в том, что для преобразования чисел из одного представления в другое не требуются сложные расчеты. Данный код нашел широкое применение в электронно-цифровых приборах (вольтметры, частотомеры и т. п.).

В отличие от ДДК позиционный код (ПК) не имеет ничего общего с двоичной системой счисления. Так, число «Три» в ПК имеет вид 111011111 ... (т. е. ноль идет после трех единиц), число «Пять» — 111101111 ... и т. д. Ноль в этом представлении имеет вид 0111111 Этот способ представления числовой информации применяется наиболее часто в устройствах индикации цифровых приборов.

Элементы алгебры логики. В результате выполнения любой арифметической операции над числами мы получаем новое двоичное число. Устройство, реализующее арифметическое действие над двоичными числами, можно рассматривать как функциональный преобразователь, на входы которого подаются отдельные разряды, например, двух двоичных чисел, а с выхода в виде разрядов двоичного числа снимается результат арифметической операции. В этом случае на одном входе значение переменной величины может быть либо 0, либо 1.

Пусть мы имеем некоторое устройство, реализующее логическую функцию от n аргументов. Значение логической функции зависит от конкретного сочетания значений всех n аргументов. Можно доказать, что произвольная логическая функция от n аргументов может быть выражена через логические функции И, ИЛИ, НЕ (логические связи).

Познакомимся с этими функциями.

Логическую функцию И называют логическим умножением (или конъюнкцией), обозначается она знаками « \wedge » или « $\&$ », или « \bullet ». Эта функция обращается в 1, т. е. принимает значение «истина», только в том случае, если все аргументы равны 1, т. е. имеют значение «истина»; функция И обращается в ноль, т. е. принимает значение «ложь», во всех остальных случаях, т. е. когда хотя бы один аргумент равен 0. Простейшей физической моделью операции И с двумя входами может быть последовательное соединение двух выключателей в электрической цепи. Цепь будет замкнутой только в том случае, если будут включены оба выключателя. Логический переключательный элемент, реализующий функцию И, называется схемой совпадения, или вентилем.

Логическая функция ИЛИ (слабая дизъюнкция) принимает

вен 1, и обращается в нуль при равенстве нулю обоих аргументов. Аналогичные действия выполняет функция «сложение по модулю 2» (строгая дизъюнкция); отличие от ИЛИ заключается в том, что при сложении по модулю 2 двух единиц в результате получается нуль.

Слабую дизъюнкцию обозначают знаком « \vee », строгую — знаком « \oplus » (иногда знак « $+$ » используют для обозначения ИЛИ, при этом «сумму по модулю 2» обозначают « \oplus »).

Логический переключательный элемент, реализующий ИЛИ, называют собирательной схемой, или схемой разделения. Моделью функции ИЛИ может служить параллельное включение выключателей.

Сумматор по модулю 2, реализующий функцию « \oplus », является основным элементом арифметического устройства вычислительных машин.

Логическая функция НЕ (логическое отрицание) — функция одного аргумента; обозначается она либо как « \bar{A} », либо « $\neg A$ », читается «не A ». Элемент, реализующий НЕ, называется инвертором.

В таблице в конце описания приведены основные логические функции, их обозначения и так называемые таблицы истинности.

В алгебре логики справедливы:

1) сочетательный закон:

$$(A \vee B) \vee C = A \vee (B \vee C), \quad (A \& B) \& C = A \& (B \& C);$$

2) переместительный закон:

$$A \vee B = B \vee A, \quad A \& B = B \& A;$$

3) распределительный закон:

$$A \& (B \vee C) = (A \& B) \vee (A \& C);$$

$$A \vee (B \& C) = (A \vee B) \& (A \vee C);$$

4) закон отрицания:

$$\overline{\overline{A \vee B}} = A \& B, \quad \overline{\overline{A \& B}} = A \vee B.$$

Из основных законов можно получить ряд важных соотношений:

$$A \vee A = A, \quad A \vee \bar{A} = 1, \quad A \& A = A, \quad A \& \bar{A} = 0,$$

$$A \vee 1 = 1, \quad \bar{A} \vee 1 = 1, \quad A \& 1 = A, \quad \bar{\bar{A}} = A.$$

Операции над выражениями, содержащими логические функции, выполняются в определенном порядке, по старшинству: сначала операция НЕ, затем операция И, после этого ИЛИ. Для построения логических схем весьма часто используются элементы, реализующие функцию либо И—НЕ, либо ИЛИ—НЕ. Эти функции описаны в таблице в конце описания. Обозначения типа 2И—НЕ означают, что соответствующий элемент имеет два входа.

На рис. 1 приведены условные изображения некоторых логических элементов. Устройства, реализующие более сложные ло-

гические функции, могут быть построены из простых элементов.

Рассмотрим простой пример построения так называемого полусумматора из элементов НЕ, И, ИЛИ. Полусумматор имеет два входа и производит сложение двух одnorазрядных двоичных чисел. Мы уже знаем, что $0+0=0$, $0+1=1$, $1+0=1$, $1+1=10$.

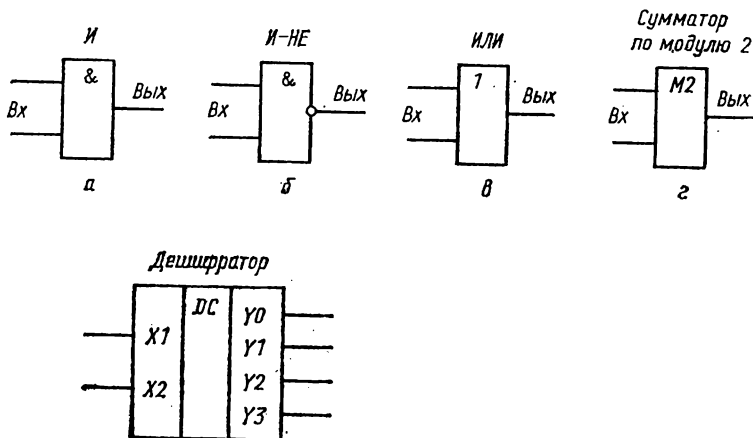


Рис. 1. Условные обозначения некоторых логических элементов

В первых трех случаях достаточно было бы использовать только логический элемент ИЛИ, однако при выполнении операций $1+1=10$ следует блокировать подачу импульса на выход «сумма» и перекинуть его в следующий разряд, осуществить перенос. Это достигается применением схемы, состоящей из одного элемента ИЛИ, двух И и одного НЕ, соединенных, как показано на рис. 2, а.

Если на обоих входах сигнал отсутствует, отсутствует он и

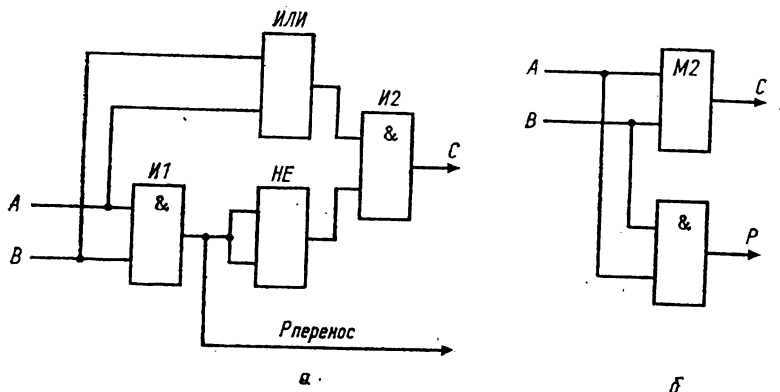


Рис. 2. Схема полусумматора: а) из элементов ИЛИ, НЕ и И
б) из элементов И и сумматора по модулю 2

на обоих выходах. Если импульс 1 появляется только на одном из выходов, он свободно проходит через ИЛИ, но блокируется И1. Но это означает, что на оба входа И2 подается 1, поэтому на выходе схемы будет 1. Если же 1 подается на оба входа, то она проходит через И1, на выходе НЕ формируется 0, И2 блокирует выход в младший разряд, одновременно в старший разряд с И1 поступает 1.

Операция простейшая, но для ее реализации потребовались четыре логических элемента. Описанная схема называется одноразрядным двоичным сумматором на два входа или полусумматором и является составной частью многоразрядного двоичного сумматора — обязательного блока любой электронной вычислительной машины. Полусумматор может быть собран из сумматора по модулю 2 и элемента И (рис. 2, б), его действие можно описать следующим логическим выражением:

$$C = (A \vee B) \& \bar{P}; \quad P = A \& B,$$

где А и В — содержимое входов, С — содержимое выхода «сумма», Р — содержимое выхода «перенос».

Одноразрядный двоичный сумматор на два входа недостаточен для сложения двух многоразрядных двоичных чисел: за счет переноса в каждом разряде одновременно могут складываться три единицы. Нужен одноразрядный сумматор на три входа. Составьте для него таблицу истинности.

Как уже указывалось, кроме представления чисел в двоичном виде возможны и другие кодировки.

Для преобразования одного цифрового кода в другой служат дешифраторы. В случае преобразования многоразрядного кода дешифратор является весьма сложным устройством. Для того чтобы понять это, попытайтесь разработать относительно простой дешифратор двухразрядного двоичного кода в позиционный. Таблица истинности для такого дешифратора имеет вид

X1	X2	Y0	Y1	Y2	Y3
0	0	0	1	1	1
0	1	1	0	1	1
1	0	1	1	0	1
1	1	1	1	1	0

Уже на этих простейших примерах видно, насколько сложной является логическая, и особенно практическая, реализация элементов и блоков цифровых вычислительных машин.

Для реализации логических функций используют различные схемы; принято выделять следующие логические элементы ЦВМ: полупроводниковые (диодные, транзисторные), магнитополупроводниковые (феррит-транзисторные), электромеханические (реле, контакторы), оптические и др.

Рассмотрим кратко полупроводниковые логические элементы, выполненные в виде интегральных микросхем.

Реализация логических функций на интегральных микросхе-

мах. Под элементами ЦВМ будем понимать простейшие устройства, осуществляющие переработку информации на уровне операций над цифрами. Важной характеристикой элементной структуры ЦВМ является система связей между элементами. Как правило, различают три класса связей: потенциальная связь, импульсная связь, потенциально-импульсная связь.

В данной работе рассматриваются только потенциальные связи и потенциальные логические элементы со связью между входом и выходом по постоянному току с логическим управлением двигательностью выходных сигналов. В состав потенциальных логических элементов обычно не входят реактивные компоненты (индуктивности и емкости), что упрощает их изготовление. В общем случае потенциальные логические элементы могут содержать в незначительном количестве реактивные компоненты для вспомогательных целей.

В настоящее время логические функции, как правило, реализуются на интегральных микросхемах. Интегральные микросхемы — это схемы, содержащие в виде одного электронного микрораздела ряд основных элементов (резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы), изготовленных в едином технологическом цикле и образующих соответствующую электронную схему, выполняющую определенную функцию, например усилителя, генератора, триггера или логической схемы. Составляющие элементы электронной схемы и их соединения изготавливаются либо внутри (в объеме), либо на поверхности общей подложки и образуют неразъемное целое. В зависимости от технологии и назначения интегральная микросхема эквивалентна электронной схеме, содержащей обычно от единицы до нескольких сотен отдельных (дискретных) пассивных и активных элементов. Интегральные микросхемы, содержащие до 100 пассивных и активных элементов, принято называть схемами средней степени интеграции, а схемы, содержащие свыше 1000 элементов, — большой степени интеграции.

На рис. 3, а показан логический элемент 2И—НЕ. Его характерной особенностью является многоэмиттерный транзистор $\nabla T1$ (в данном случае — двухэмиттерный). Остановимся подробнее на физических основах работы такого транзистора. В простейшем случае транзистор $\nabla T1$ можно представить в виде трех диодов (рис. 3, б). Если на любой из эмиттеров $\nabla T1$ подать логический ноль (для определенности пусть это будет $BX\ 1$), то диод $\nabla D1$ откроется, через него и резистор $R1$ потечет ток. В результате этого напряжение в точке «а» (рис. 3) станет равным 0,6–0,7 В (напряжение на открытом кремниевом диоде) и транзистор $\nabla T2$ окажется закрытым (ток базы транзистора $\nabla T2$ будет равен нулю). Если же на все входы подать логическую 1, то диоды $\nabla D1$ и $\nabla D2$ закроются, при этом диод $\nabla D3$ окажется открытым, и ток потечет по цепи $R1-\nabla D3$ — переход база—эмиттер транзистора $\nabla T2$, поэтому $\nabla T2$ откроется и на выходе установится логический 0. На практике применяется более сложный выходной каскад, чтобы повысить как быстродействие, так и нагрузочную

способность выхода (характерная нагрузочная способность выхода стандартного элемента 8—10 входов других элементов).

Применение многоэмиттерных транзисторов (а не диодной схемы) обусловлено, во-первых, тем, что по соображениям технологического характера намного проще изготовить на кристалле

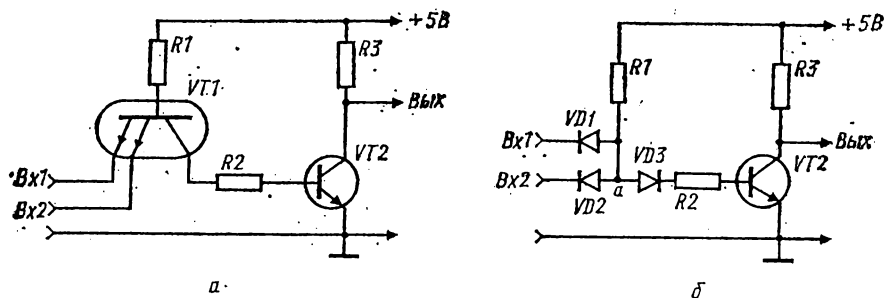


Рис. 3. Схема логического элемента 2И—НЕ (а); представление транзистора $VT1$ в виде трех диодов (б)

полупроводника один m -эмиттерный транзистор, чем $m+1$ диод. Во-вторых, благодаря применению многоэмиттерного транзистора удастся повысить быстродействие и помехоустойчивость элемента. Следует заметить, что транзистор $VT1$ включен по схеме с общей базой, а, как известно, такая схема включения дает только усиление по напряжению и не дает усиления по току, поэтому, чтобы не снижать уровень логической 1, транзистор $VT1$ должен иметь низкий коэффициент передачи тока базы (коэффициент усиления), что позволяет также сделать малым ток входов, когда они находятся в состоянии логической 1.

Из рассмотрения принципов работы базового элемента следует ряд важных выводов:

1) Когда на вход элемента подана логическая 1, то ток втекает в его вход (характерное значение тока логической единицы 40 мкА). Если же на вход подан логический 0, то ток вытекает из входа (т. е. сам вход является источником тока). Характерное значение входного тока логического нуля — $-1,6$ мА (знак «—» указывает на обратное направление тока).

2) Если вход элемента оставить неподключенным к источнику сигнала, то это эквивалентно подаче на него логической 1. Однако такой способ подачи постоянной логической 1 приводит к снижению помехоустойчивости и быстродействия логического элемента, и его на практике следует по возможности избегать.

Описание экспериментальной установки

Основным элементом установки является специальная монтажная панель, внутри которой размещены интегральные микросхемы, используемые для создания логических устройств. На верх-

ней плате панели имеются монтажные гнезда для различных соединений.

Логические операции осуществляются в отношении импульсов напряжения, вырабатываемых генераторами типа Г5-54. Прохождение импульсов по схеме и результат логических операций контролируются с помощью осциллографов типа С1-65 и С1-69. Для питания микросхем имеется источник постоянного напряжения.

Следует иметь в виду, что предельно допустимое входное напряжение логического элемента равно 5 В. Поэтому на выходах генераторов нельзя устанавливать такое и более высокое напряжение. В противном случае микросхемы выйдут из строя.

Упражнение 1. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТА 2И-НЕ

Собрать схему, приведенную на рис. 4. Генераторы Г1 и Г2 перевести в режим работы от внешнего запускаящего сигнала

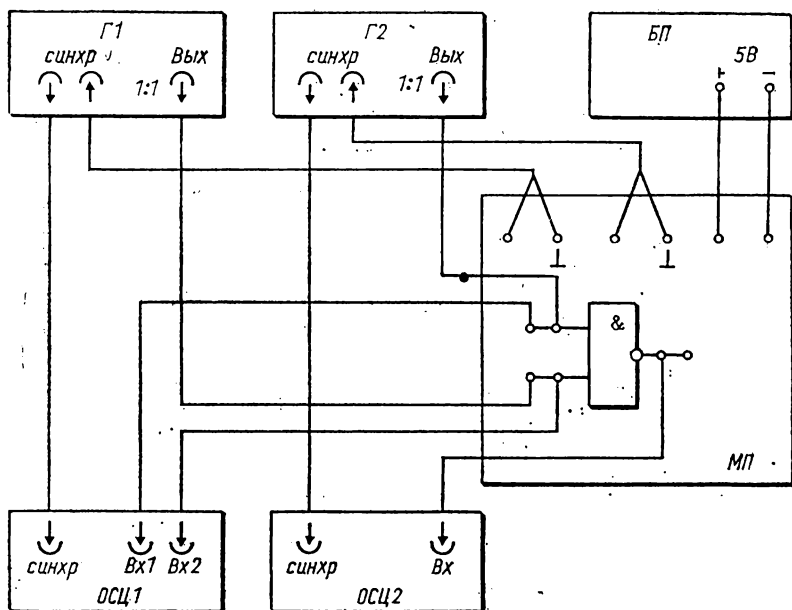


Рис. 4. Схема экспериментальной установки

(кнопка $\sim \Pi$ нажата). Переключатель полярности импульсов синхронизации генератора Г1 должен находиться в положении « \wedge », а регулировка амплитуды синхроимпульсов этого генератора — в крайнем правом положении. Установить на генераторе Г1 длительность импульса 10 мкс, задержку (временный сдвиг) 10 мкс, а на генераторе Г2—25 и 14 мкс соответственно. Установить выходное напряжение этих генераторов (вначале ручка регулировки выходного напряжения должна быть установлена в край-

нее левое положение) равным 4 В (кнопка установки пределов 0,1 нажата).

Установить синхронизацию осциллографов ОСЦ1 и ОСЦ2 в положение, обеспечивающее работу в ждущем режиме.

После проверки преподавателем собранной схемы включить питание приборов и после их прогрева в течение 5 мин подать напряжение питания на учебную плату. С помощью регулировок синхронизации осциллографов получить устойчивое изображение прямоугольных импульсов (установка переключателя пределов развертки — в положении 10 мкс/дел; регулировкой «частота плавно», если такая имеется, не пользоваться!). Вращением регулировки «временной сдвиг» генератора Г2 получить перемещение второго импульса относительно первого и добиться того, чтобы эти импульсы частично перекрывались, наблюдая при этом за изменением выходного напряжения логического элемента по осциллографу ОСЦ2. Зарисовать входные и выходные сигналы для трех случаев: а) входные импульсы не перекрываются; б) входные импульсы перекрываются полностью; в) входные импульсы перекрываются частично. На основании полученных результатов построить таблицу истинности для элемента 2И—НЕ.

Отсоединить генераторы Г1, Г2 и осциллограф ОСЦ1 от входа логического элемента 2И—НЕ.

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТА НЕ

Легко видеть, что, для того чтобы получить элемент НЕ из элемента 2И—НЕ, достаточно соединить вместе оба его входа или подать на один из входов логическую единицу.

1. Соединить вместе входы элемента 2И—НЕ, подключить к ним генератор Г1 и вход 1 осциллографа ОСЦ1. Подать от генератора Г1 входной сигнал (амплитудой не более 4 В!), контролируя его по осциллографу ОСЦ1.

Вывести ручку «ампл.» генератора Г1 влево до упора, переключить диапазон выходного напряжения 0,03. Снять зависимость уровня сигнала на выходе элемента НЕ от сигнала Г1 с шагом 0,3 В.

Ввести ручку «ампл.» генератора Г1 снова влево до упора, перейти на диапазон «0,1». Убедиться, что в этом диапазоне вплоть до $U=4$ В амплитуда выходного сигнала (с элемента НЕ) не зависит от амплитуды входного сигнала.

Нарисовать характерные виды выходного напряжения.

2. Повторить п. 1, но подав на один (любой) из входов напряжение логической единицы с соответствующего гнезда учебной платы.

Упражнение 3. СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТА 2 ИЛИ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ 2И—НЕ И ИЗУЧЕНИЕ ЕГО РАБОТЫ

При подготовке к лабораторной работе следует в соответствии с таблицей истинности для логической функции ИЛИ син-

тезировать с использованием соотношений алгебры логики элемент ИЛИ.

Собрать по предварительно нарисованной в рабочей тетради схеме элемент 2 ИЛИ. Регулируя временную задержку генерирования прямоугольных импульсов генераторов Г1 и Г2, проследить за изменением выходного сигнала синтезированного элемента 2 ИЛИ. Установить длительность выходного импульса генератора Г1 — 10 мкс, а Г2 — 20 мкс. Зарисовать выходные сигналы, когда: а) входные импульсы не перекрываются, причем импульс от генератора Г1 опережает импульс от генератора Г2; б) входные импульсы перекрываются частично; в) входные импульсы перекрываются полностью, но на этот раз импульс от генератора Г1 следует за импульсом от генератора Г2. На основании полученных результатов построить таблицу истинности для элемента 2 ИЛИ и сопоставить ее с логической функцией ИЛИ. В случае расхождения найти ошибку и устранить ее.

Упражнение 4. СИНТЕЗ СУММАТОРА ПО МОДУЛЮ ДВА ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ 2И—НЕ И ПРОВЕРКА ЕГО РАБОТЫ

Как известно, любое число можно представить в двоичной системе счисления, т. е. в виде комбинации нулей и единиц. Следовательно, используя логические элементы, можно построить арифметические устройства различной степени сложности. Самым простым примером такого рода устройства является сумматор по модулю два, который в случае двух входных переменных и отсутствии выхода «перенос» часто называют «или с исключением», так как таблица истинности для такого устройства очень похожа на таблицу для элемента ИЛИ, с той лишь разницей, что когда на входе две единицы, то на выходе получается логический ноль (отсюда и название «или с исключением»).

Используя рис. 2 при подготовке к лабораторной работе, синтезировать сумматор по модулю 2 (без выхода переноса, т. е. ИЛИ С ИСКЛЮЧЕНИЕМ), для чего необходимо преобразовать схему, приведенную на рис. 1 к такому виду, чтобы она содержала только элементы 2 И—НЕ. Для этого необходимо воспользоваться основными законами алгебры логики.

Собрать по предварительно нарисованной в рабочей тетради схеме (ее необходимо предварительно согласовать с преподавателем) ИЛИ С ИСКЛЮЧЕНИЕМ (сумматор по модулю два) и выполнить те же задания, что и при выполнении упражнения 3. Сопоставить полученную таблицу истинности с логической функцией ИЛИ С ИСКЛЮЧЕНИЕМ. По указанию преподавателя попытаться синтезировать этот логический элемент несколько другим способом, используя меньшее число элементов 2 И—НЕ и проверить ее функционирование.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как записываются числа в двоичной системе счисления?
2. Как производятся арифметические операции с числами в двоичной системе счисления?
3. Как записываются числа в двоично-десятичном коде и позиционном коде?
4. В чем состоят логические функции И, ИЛИ, НЕ и др.?
5. В чем состоят основные законы алгебры логики?
6. Как реализуется «полусумматор», «одноразрядный сумматор на три входа»?
7. Что представляет собой интегральная микросхема?
8. Как работает двухэмиттерный транзистор?
9. Как работают логические элементы 2 И—НЕ, НЕ, 2 ИЛИ, «сумматор по модулю 2»?

Таблица основных логических связей

Обозначение	Другие обозначения	Таблица истинности					Название связи	Как читать
		X	0	0	1	1		
		Y	0	1	0	1		
$X \& Y$	$X \wedge Y$ $X \cdot Y$ XY		0	0	0	1	конъюнкция, логическое произведение, логическое И, функция совпадения	X и Y
$X \vee Y$			0	1	1	1	дизъюнкция, логическая сумма, логическое ИЛИ, функция разделения	X или Y; либо X, либо Y; либо X и Y
$X + Y$	$X \dot{\vee} Y$ $\neg(X \leftrightarrow Y)$ $\neg(X \equiv Y)$		0	1	1	0	сумма по модулю 2, разделительная дизъюнкция, отрицание эквивалентности, функция неравнозначности	либо X, либо Y; X не эквивалентно Y
X/Y	$\neg(X \& Y)$ $\overline{X \wedge Y}$		1	1	1	0	штрих Шеффера, отрицание конъюнкции	X и Y несовместны; неверно, что X и Y
$X \rightarrow Y$	$X \supset Y$		1	1	0	1	материальная импликация	если X, то Y; X влечет Y
$X \leftrightarrow Y$	$X \sim Y$ $X \equiv Y$		1	0	0	1	эквивалентность, функция равнозначности	X тогда и только тогда, когда Y
$X \downarrow Y$	$\neg(X \vee Y)$ $\overline{X \vee Y}$		1	0	0	0	стрелка Пирса, отрицание дизъюнкции, функция Вебба	ни X, ни Y

Лабораторная работа 35

ТРИГГЕРЫ

В настоящей работе изучается один из цифровых запоминающих элементов — триггер.

Введение

Для приема, хранения и выдачи информации в вычислительных машинах и системах используются *запоминающие устройства* (ЗУ). По функциональному назначению различают оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), внешнее запоминающее устройство (ВЗУ), буферное запоминающее устройство, магазинное запоминающее устройство и др. Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) предназначено для записи, хранения и выдачи информации. В качестве ОЗУ используется самое быстродействующее из ЗУ ЦВМ, поскольку запись и считывание информации, как правило, производится в темпе работы ЦВМ. Для приема и выдачи числа, а также кратковременного хранения кода числа, в ОЗУ используются *регистры*. Регистры также используются и в других типах ЗУ, в том числе в автоматизированных измерительных системах.

Регистр обычно состоит из набора запоминающих элементов и средств приема и выдачи слов. *Цифровой запоминающий элемент* — элемент автоматических и вычислительных устройств, принимающий фиксированное число устойчивых состояний (чаще всего два), каждое из которых соответствует определенной цифре.

Для построения ЗУ используют запоминающие элементы с различными принципами работы от электромеханических и пневматических до электромагнитных и оптических.

Простейшим примером запоминающего элемента может служить электромагнитное реле с самоблокирующимся контактом (рис. 1, а). Если на короткий промежуток времени нажать кнопку S_1 , то через обмотку реле K_1 потечет ток, контакты этого реле $K_{1,1}$ замкнутся, обеспечив питание обмотки реле независимо от того, нажата кнопка S_1 или нет, т. е. можно сказать, что в этом состоянии реле помнит, была ли нажата кнопка S_1 . В указанном состоянии реле может находиться сколь угодно долго при условии, что на такую ячейку памяти подается напряжение питания. Если теперь нажать кнопку S_2 (или просто отключить питание), то ток через обмотку прекратится и контакты $K_{1,1}$ разомкнутся, и если затем кнопку S_2 отпустить, то обмотка реле так и останется в обесточенном состоянии. Можно, например, считать, что состоянию, когда через обмотку реле течет ток, соответствует логическая единица, а когда реле обесточено — логический ноль. Используя набор из N таких реле можно сделать запоминающее устройство, способное запомнить N -разрядное двоичное число. На реле можно сравнительно легко реализовать логические функ-

ции И, ИЛИ, НЕ и т. д. Однако логические устройства на реле имеют очень низкое быстродействие (время срабатывания не менее 1 мс), механические контакты недолговечны.

Примером другой физической системы с двумя устойчивыми состояниями являются многие магнитные вещества. Если взять магнетик (желательно с петлей гистерезиса, максимально близ-

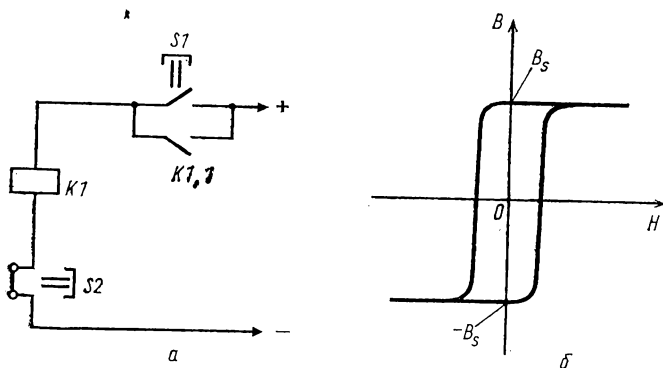


Рис. 1. а) Электромагнитное реле с самоблокирующимся контактом; б) петля гистерезиса ферромагнетика

кой к прямоугольной, рис. 1, б), то направление вектора магнитной индукции при нулевом внешнем магнитном поле у такого вещества может иметь два значения: B_s и $-B_s$, причем магнетик в каждом из этих двух состояний может находиться неограниченно долго. Таким образом, если на таком магнитном материале сделать запоминающее устройство (ЗУ), то для хранения в нем информации не требуется источника питания, что является большим преимуществом магнитных ЗУ перед другими типами ЗУ. Магнитные устройства памяти нашли широкое применение в качестве оперативных ЗУ ЭВМ первого и второго поколений. Однако как оперативное ЗУ устройства такого типа имеют сравнительно низкое быстродействие и относительно трудоемки в изготовлении и впоследствии были вытеснены полупроводниковыми ЗУ.

В качестве ЗУ можно использовать и конденсатор, однако такое устройство будет обладать ограниченным временем хранения информации из-за саморазряда емкости, и, для того чтобы увеличить это время, необходимо производить перезапись информации в таком ЗУ (проводить так называемую регенерацию). По такому принципу строятся ЗУ динамического типа (в отличие от статических ЗУ, в которых не требуется регенерации), регенерация в них проводится автоматически.

В настоящее время в качестве элементов памяти ЭВМ получили распространение полупроводниковые ЗУ как динамического, так и статического типа. При этом существует несколько технологий, по которым изготавливаются эти ЗУ, однако все они практически одинаково описываются алгеброй логики.

Схемы с памятью относятся к классу *последовательностных схем*. Логическое состояние последовательностных схем зависит не только от комбинации входных сигналов в данный момент времени, но и от комбинации сигналов в предшествующие моменты. Например, простейший триггер — бистабильная ячейка — обладает памятью и относится к классу последовательностных схем.

Комбинационными называют схемы, не обладающие памятью. Логическое состояние выходов комбинационных схем однозначно определяется комбинацией логических сигналов на их входах в данный момент времени и не зависит от логических сигналов, которые подавались ранее. Простейшие логические схемы И, НЕ, ИЛИ, И—НЕ, ИЛИ—НЕ являются примерами комбинационных схем.

Триггер — бистабильная ячейка

Триггером называется устройство с двумя устойчивыми состояниями, переходящее из одного состояния в другое под действием внешних напряжений. Триггер способен сохранять сколь угодно долго устойчивое состояние и после снятия внешнего воздействия, поэтому он используется в качестве элемента памяти.

Простейший триггер (рис. 2) — бистабильная ячейка — является двухкаскадным усилителем с непосредственной связью между каскадами, в котором осуществлена положительная обратная связь благодаря соединению выхода усилителя с его входом. Несмотря на полную симметрию, при одинаковых транзисторах и сопротивлении R_K состояние схемы, когда оба транзистора открыты, является неустойчивым. Малейшее повышение коллекторного тока одного из транзисторов, например VT_1 , вызывает уменьшение его коллекторного напряжения. Уменьшение напряжения передается на базу другого транзистора, уменьшает его коллекторный ток и повышает его коллекторное напряжение. В результате напряжение на базе VT_1 увеличивается и коллекторный ток VT_1 станет еще большим. Этот регенеративный процесс протекает очень быстро, лавинообразно и приводит к тому, что транзистор VT_1 становится полностью открытым и входит в режим насыщения. Другой транзистор при этом запирается, так как напряжение коллектора — эмиттер транзистора VT_1 , являющееся напряжением база—эмиттер транзистора VT_2 , очень мало (0—0,3 В) и недостаточно для его отпирания.

Перевод бистабильной ячейки из одного устойчивого состояния в другое осуществляется подачей положительных или отрицательных импульсов на коллекторы, а следовательно, и на базы транзисторов, поскольку база одного транзистора соединена с коллектором другого.

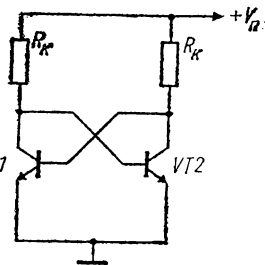


Рис. 2. Схема простейшего триггера

На практике применяются более сложные схемы триггеров, используемых в качестве элементов памяти. Наибольшее распространение получили триггеры, создаваемые на базе простейших логических устройств комбинационного типа И—НЕ, ИЛИ—НЕ.

Описание работы цифровых запоминающих элементов на языке алгебры логики

Рассмотрим логическое устройство, которое имеет два входа, обозначенные R и S (смысл этих обозначений станет ясен в дальнейшем), и два выхода, P и Q , причем потребуем, чтобы $P = \bar{Q}$. Пусть таблица истинности этого устройства имеет вид

Таблица 1

S_n	R_n	Q_n	Q_{n+1}	Режим
0	0	0	0	Хранение
0	0	1	1	
0	1	0	0	Установка 0
0	1	1	0	
1	0	0	1	Установка 1
1	0	1	1	
1	1	0	H	
1	1	1	H	

Здесь Q_n — состояние устройства в момент появления сигналов на входах R_n и S_n , а Q_{n+1} (или соответственно P_{n+1}) — состояние устройства после воздействия входных сигналов. Буквой H обозначено состояние устройства, требующее дальнейшего уточнения.

Логическое устройство, имеющее такую таблицу истинности, является триггером (от английского слова trigger — спусковой крючок ружья).

Рассмотрим теперь способы дополнения последних двух строк этой таблицы. Пусть эти две строки будут иметь вид

$$\begin{array}{cccc} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

В этом случае можно записать логическую функцию, описывающую такую таблицу истинности:

$$Q_{n+1} = S_n + \bar{R}_n \cdot Q_n.$$

Теперь преобразуем это логическое выражение к виду, пригодному для реализации на логических элементах И—НЕ:

$$Q_{n+1} = \overline{\bar{S}_n \cdot \bar{Q}_n \cdot \bar{R}_n} \quad (1)$$

(напомним, что $a + b = \overline{\bar{a} \cdot \bar{b}}$). Теперь реализуем это устройство. Очевидно, что выражению (1) соответствует устройство, приведенное на рис. 3, а.

Проанализируем более подробно работу такого логического устройства, которое является триггером. Пусть $\bar{S}=1$, $\bar{R}=0$, тогда на выходе логического элемента № 2 будет логическая 1, а на выходе логического элемента № 1 будет логический 0, т. е. $Q=0$, а $P=1$. Аналогично при $\bar{S}=0$, $\bar{R}=1$ $Q=1$, $P=0$. Если теперь реализовать $\bar{R}=1$, $\bar{S}=1$, то состояние $Q=0$, $P=1$, равно как $Q=1$, $P=0$, сохранится. Таким образом, при $\bar{R}=1$ и $\bar{S}=1$ триггер может находиться в одном из двух устойчивых состояний, при $\bar{S}=1$, $\bar{R}=0$ происходит принудительная установка триггера в состояние $Q=0$ (говорят, что триггер сбрасывается), а при $\bar{S}=0$, $\bar{R}=1$ — $Q=1$ (говорят, что триггер установлен, поэтому и принято обозначать входы этого триггера R и S — от английских слов reset и set — сброс и установка). Состояние же $\bar{R}=1$, $\bar{S}=1$ соответствует хранению информации в триггере. Такой триггер называют RS-триггером. Его условное обозначение на схемах приведено на рис. 3, б.

Рассмотрим теперь $\bar{R}=0$, $\bar{S}=0$. В этом случае $P=Q=1$, что не соответствует ранее принятому условию $P=\bar{Q}$. Поэтому говорят, что это состояние триггера является неопределенным (иногда это состояние называют запрещенным), так как невозможно сказать, что же записано в триггере: 0 или 1. С другой стороны, из этого состояния физически невозможно перейти, минуя другие состояния, в состояние $\bar{R}=\bar{S}=1$, так как реально всегда какой-либо входной сигнал достигает логической 1 раньше, чем это

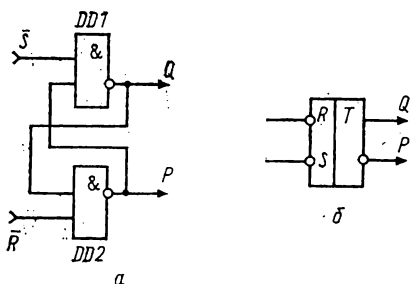


Рис. 3. а) RS-триггер на логических элементах 2И—НЕ; б) условное обозначение RS-триггера

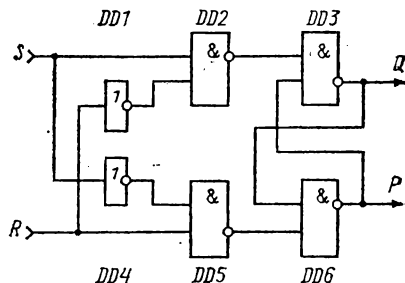


Рис. 4. E-триггер

сделает другой, следовательно, на короткий промежуток времени будет реализовано состояние сброса или установки, и триггер установится в одно из своих устойчивых состояний, а в какое именно — неизвестно.

Состояние $P=Q=0$ является абсолютно неустойчивым. Действительно, если $Q=0$, то из этого следует, что оба входных сигнала элемента DD1 имеют значение 1, что находится в противоречии с тем, что $P=0$. Аналогичное рассуждение справедливо для логического элемента DD2. Заметим, что из сказанного выше следует, что при включении питания триггера его состояние, вообще

говоря, предсказать невозможно, так как оно определяется внутренними процессами, происходящими внутри логических элементов и не описываемых соотношениями алгебры логики.

Попытаемся теперь сконструировать триггер, который не имеет неопределенного состояния при $\bar{R}=\bar{S}=0$. Для этого надо дополнить последние две строки табл. 1 так:

1	1	0	0
1	1	1	1

т. е. потребовать, чтобы при $\bar{R}=\bar{S}=0$ триггер находился в режиме хранения. Тогда можно описать таблицу истинности такого триггера:

$$Q_{n+1} = Q_n \cdot \bar{S}_n \cdot R_n + Q_n \cdot R_n \cdot S_n + Q_n \cdot S_n \cdot \bar{R}_n + \bar{Q}_n \cdot S_n \cdot \bar{R}_n.$$

Проведя упрощения этого логического выражения, аналогично тому как это было сделано ранее (проверьте!), получим

$$Q_{n+1} = S_n \cdot \bar{R}_n + Q_n \cdot S_n + Q_n \cdot \bar{R}_n.$$

После приведения к виду, удобному для реализации на логических элементах И—НЕ:

$$Q_{n+1} = \overline{\bar{S}_n \cdot \bar{R}_n \cdot Q_n \cdot \bar{S}_n \cdot R_n}, \quad (2)$$

легко видеть, что триггер, удовлетворяющий (2), соответствует приведенному на рис. 4. Это так называемый *E*-триггер.

Возникает вопрос, как, используя *RS*-триггер, сделать ячейку ЗУ? Рассмотрим логическое устройство, схема которого приведена на рис. 5, а. Подадим на вход *D* логическую 1. Тогда при поступ-

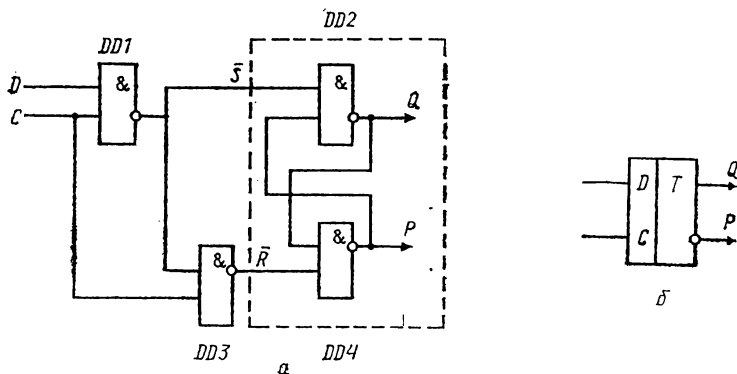


Рис. 5. а) *D*-триггер; б) условное обозначение *D*-триггера

лении на вход *C* логической единицы на входе \bar{S} *RS*-триггера появится логический 0, а на входе \bar{R} останется логическая 1, т. е. в триггер будет записана логическая 1. При подаче на вход *D* логического 0 в триггер будет записан логический 0. Если же на входе *C* — логический 0, то $\bar{R}=\bar{S}=1$, и *RS*-триггер сохраняет записанную в него ранее информацию. Логические устройства

такого типа принято называть *D*-триггерами (от английского слова Delay — задержка). Вход *C* называют входом синхронизации, так как информация записывается в триггер, только когда $C=1$.

Условное обозначение *D*-триггера на схемах приведено на рис. 5, б. *D*-триггер является представителем довольно широкого класса триггеров, называемых синхронными триггерами. Характерная черта синхронных триггеров — это наличие входа синхронизации, т. е. входа, подача логической единицы на который разрешает запись информации в триггер.

Вернемся теперь к таблице. Случай, когда последние две строки имеют вид

$$\begin{array}{cccc} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0, \end{array}$$

аналогичен случаю *RS*-триггера, который был рассмотрен вначале.

Значительно более интересен случай, когда последние две строки таблицы имеют вид

$$\begin{array}{cccc} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{array}$$

Такое дополнение таблицы подразумевает, что, когда $R=S=1$, триггер меняет свое состояние на противоположное. Легко показать, что в этом случае упрощенное (минимизированное) логическое выражение, описывающее этот триггер, имеет вид

$$Q_{n+1} = \bar{Q}_n \cdot S_n + Q_n \cdot \bar{R}_n. \quad (3)$$

Однако реализовать на практике такой триггер оказывается совсем не просто. Так как при $R=S=1$ триггер меняет свое состояние на противоположное, это будет приводить к тому, что выходное состояние такого устройства будет непрерывно изменяться, пока $R=S=1$ с периодом, равным удвоенному времени переключения логического элемента. Для того чтобы избежать этого и реализовать логическое устройство, описываемое логическим выражением (3), применяют так называемые двухступенчатые триггеры. Рассмотрим устройство, схема которого приведена на рис. 6, а.

В его состав входят два *RS*-триггера *DD2* и *DD4*. Триггер *DD2* называют ведущим (или основным), а *DD4* — ведомым (или вспомогательным). Очень часто такие двухступенчатые триггеры называют триггерами со структурой *MC* (от английских слов master — хозяин и slave — раб). В таком устройстве принято входы *S* и *R* обозначать как *J* и *K* соответственно (от английских слов Jump и Keep), а сам триггер называют *JK*-триггером. Условное обозначение *JK*-триггера на схемах приведено на рис. 6, б. Две буквы «Т» на обозначении триггера указывают на то, что триггер является двухступенчатым.

Свойство *JK*-триггера менять свое состояние на противоположное при $J=K=1$ является весьма важным. На основе такого устройства можно построить счетчик числа импульсов, т. е. логическое устройство, которое будет считать (обычно в двоичной

системе счисления), сколько импульсов (т. е. переходов $0 \rightarrow 1$ или $1 \rightarrow 0$) поступило на его вход. Для того чтобы сделать n -разрядный двоичный счетчик, необходимо как минимум n триггеров. Заметим, что для перевода JK -триггера в счетный режим (т. е. для счета числа импульсов) достаточно соединить вместе его входы J и K . Тогда JK -триггер будет менять свое состояние на противополож-

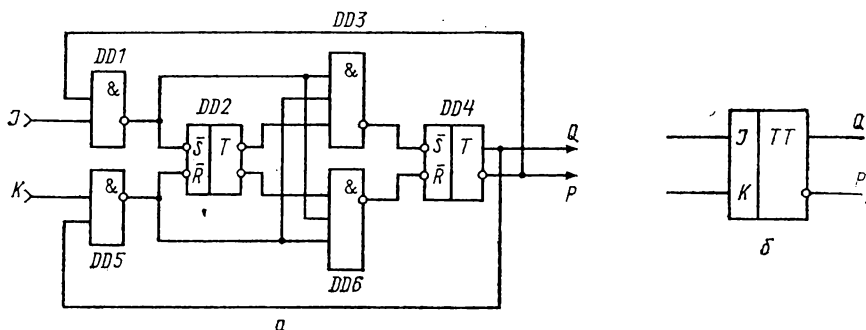


Рис. 6. а) JK -триггер; б) условное обозначение JK -триггера

ное каждый раз, когда входной сигнал переходит из 1 в 0. При обратном же переходе ($0 \rightarrow 1$) состояние триггера не изменится. Последовательным объединением n таких триггеров мы и получим n -разрядный двоичный счетчик числа импульсов.

Описание экспериментальной установки

Установка состоит из двух учебных плат с наборными полями, позволяющими собирать необходимые схемы, двух генераторов импульсов (15-54) и двух осциллографов (С1-69, С1-68).

Упражнение 1. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ RS -ТРИГГЕРА НА ЭЛЕМЕНТАХ И-НЕ

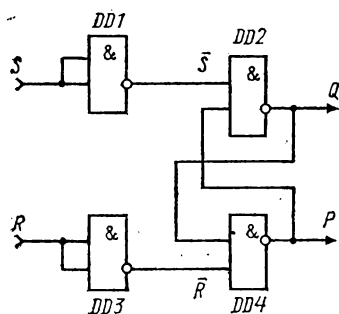
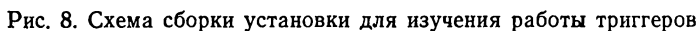


Рис. 7. RS -триггер с инверторами на входе

Собрать на учебной плате № 1 RS -триггер. Так как применяемые при выполнении работы генераторы Г1 и Г2 дают прямоугольные импульсы только с нулевым уровнем, то на входы \bar{R} и \bar{S} необходимо подключить по инвертору (рис. 7). Собрать установку для изучения работы триггеров (рис. 8).

Подать на входы R и S триггера прямоугольные импульсы длительностью 0,2 мкс от генераторов Г1 и Г2. Установить временной сдвиг на генераторах 10 и 15 мкс соответственно. Установить выходное напряжение этих генераторов (вначале регулировка

Установить синхронизацию осциллографов ОСЦ1 и ОСЦ2 в положение, обеспечивающее работу в ждущем режиме. Генераторы Г1 и Г2 перевести в режим работы от внешнего запускаю-



После проверки преподавателем собранной схемы включить питание приборов и после их прогрева в течение 5 мин подать напряжение питания на учебную плату. С помощью регулировок синхронизации осциллографов получить устойчивое изображение прямоугольных импульсов (установка переключателей пределов развертки — в положении 10 мкс/дел), регулировками «частота плавно» и «усиление плавно», если таковые имеются, не пользо-

263

проследить за изменением выходного сигнала. Зарисовать полученные осциллограммы и объяснить результаты.

Увеличить длительность импульсов R и S до 10 мкс, установить временной сдвиг на генераторах Г1 и Г2 так, чтобы эти прямоугольные импульсы частично перекрывались, при этом реализуется так называемое неопределенное состояние триггера. Зарисовать и проанализировать выходные сигналы триггера как с выхода Q , так и с выхода P в двух случаях: когда сигнал R опережает сигнал S и когда сигнал S опережает R . На основании проведенных исследований составить таблицу истинности RS -триггера.

Упражнение 2. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ E -ТРИГГЕРА

Собрать на учебной плате схему E -триггера (рис. 4). Подать на входы R и S E -триггера прямоугольные импульсы длительностью 10 мкс от генераторов Г1 и Г2. Зарисовать сигналы на выходах P и Q такого триггера, когда:

- а) входные импульсы не перекрываются, причем импульс на входе R опережает импульс на входе S ;
- б) входные импульсы частично перекрываются, причем их взаимное расположение соответствует случаю а);
- в) входные импульсы не перекрываются, причем на этот раз импульс на входе S опережает импульс на входе R ;
- г) входные импульсы опять частично перекрываются и их взаимное расположение соответствует случаю в).

На основании полученных результатов построить таблицу истинности E -триггера.

Упражнение 3. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ D -ТРИГГЕРА

Собрать на учебной плате схему D -триггера (см. рис. 5). Подать на входы D и C триггера сигналы такой же длительности, как и при выполнении упражнения 2, и повторить то же задание, что и в упражнении 2, только наблюдая сигнал с выхода Q . Уменьшить длительность импульса, подаваемого на вход C , до 0,1 мкс и зарисовать выходное напряжение D -триггера, когда:

- а) сигнал на входе C идет раньше сигнала на входе D , сигналы не перекрываются;
- б) сигналы на входах C и D перекрываются;
- в) сигнал на входе C идет позже сигнала на входе D , и они не перекрываются. Сделать вывод о влиянии длительности сигнала на входе C на запись информации в D -триггер.

Упражнение 4. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ JK -ТРИГГЕРА

Подключить к приборам учебную плату № 2 так же, как и учебную плату № 1 (см. рис. 8). Подать питание на учебную плату. Подать на входы JK -триггера сигналы с генераторов Г1 и Г2. Зарисовать выходные сигналы на выходах P и Q JK -триггера

в тех же комбинациях, как это указано в упражнении 2, обратив особое внимание на случай, когда $J=K=1$. Соединить вместе входы J и K , подать на них сигнал с генератора Г1 длительностью 10 мкс. Установить развертку осциллографов ОСЦ1 и ОСЦ2 в положение «50 мкс/дел» так, чтобы на экране наблюдалось не менее четырех периодов входного сигнала. Зарисовать входные и выходные (на выходе Q) сигналы JK-триггера в счетном режиме.

Упражнение 5. ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЧЕТЫРЕХРАЗЯДНОГО ДВОИЧНОГО СЧЕТЧИКА НА ТРИГГЕРАХ

Подключить выход генератора Г1 к входу счетчика, предварительно отключив кабель, соединяющий гнездо внешнего запуска генератора Г1 с учебной платой № 2. При этом генератор Г1 переводится в режим генерации одиночного импульса при нажатии кнопки «ручной запуск». Нажать кнопку «сброс», расположенную на учебной плате № 2, при этом все триггеры счетчика установятся в нулевое состояние, что контролируется по погасанию индикаторов состояния триггеров (светящийся индикатор свидетельствует о том, что триггер находится в единичном состоянии). Нажимая кнопку «ручной запуск» генератора Г1, подать один импульс на вход счетчика. Записать состояние индикаторов после каждого из 20 нажатий кнопки «ручной запуск». Перевести двоичное число, отображаемое счетчиком в десятичное.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой запоминающие устройства?
2. Как электромагнитное реле с самоблокирующимся контактом работает в качестве запоминающего элемента?
3. Как устроен и работает простейший триггер?
4. Как работают RS-, E-, D-, JK-триггеры?
5. Как работает четырехразрядный двоичный счетчик на триггерах?

Лабораторная работа 36

ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА ИЗ ШУМА

В настоящей работе наблюдается слабый сигнал электронного парамагнитного резонанса, выделяемый из шума методом накопления с помощью ЭВМ.

Описание экспериментальной установки и метода выделения сигнала из шума

Блок-схема установки представлена на рис. 1. Образец помещается в волноводный тракт, по которому от генератора СВЧ распространяется электромагнитная волна. Ларморова частота парамагнетика определяется величиной индукции магнитного по-

ля, создаваемого электромагнитом NS. Электромагнитная волна после взаимодействия с образцом, в результате чего ее амплитуда уменьшилась, попадает на детектор, сигнал с которого поступает в регистрирующее устройство.

Выходным элементом этого устройства является электронный самопишущий потенциометр, на ленте которого, движущейся

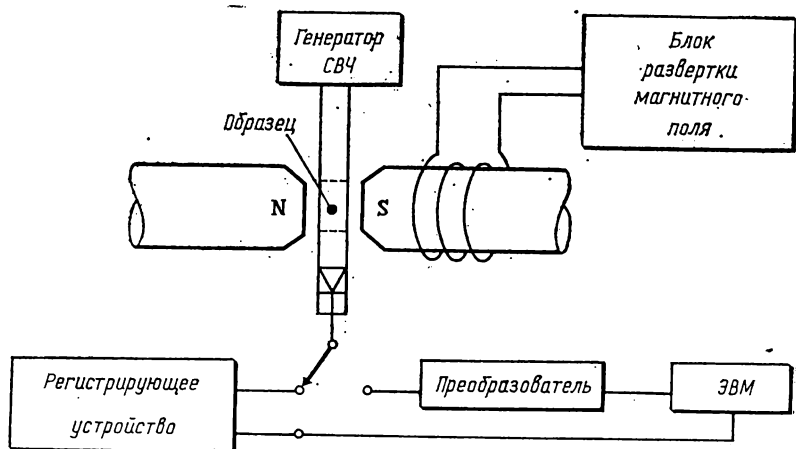


Рис. 1. Схема установки для наблюдения ЭПР методом накопления сигнала

с постоянной скоростью, и регистрируется сигнал ЭПР. Величина индукции магнитного поля изменяется также с постоянной скоростью, поэтому на ленте получается графическое изображение сигнала ЭПР в функции индукции магнитного поля.

Когда сигнал практически не превышает уровня шумов, его следует подать на преобразователь аналогового сигнала в цифровой. Этот преобразователь несколько десятков раз в секунду (например, 150) вырабатывает пары импульсов. Амплитуда первого из них пропорциональна мгновенному значению индукции магнитного поля, а амплитуда второго — соответствующему значению сигнала. Импульсы преобразуются в числа, величина которых пропорциональна амплитуде импульса. Число, связанное с величиной индукции магнитного поля, является адресом ячейки памяти ЭВМ, в которой записывается число, выражающее величину сигнала при данном значении индукции магнитного поля.

При прохождении резонансной области, например от $B_1 < B_{рез}$ до $B_2 > B_{рез}$, в течение, например, трех минут при линейном изменении магнитного поля от B_1 до B_2 преобразователь вырабатывает 150 пар чисел. Таким образом, интервал изменения поля от B_1 до B_2 делится на 150 участков, в каждом из которых измеряется величина сигнала ЭПР. При многократном прохождении резонансной области в ячейках памяти накапливается информация о вели-

чине сигнала при каждом из 150 значений индукции магнитного поля. В ЭВМ заложена программа, в соответствии с которой производится усреднение сигнала для каждого из 150 значений индукции магнитного поля. В результате этой операции шумы, имеющие случайный характер, усредняются практически до нулевого уровня, а сигнал ЭПР, одинаковым образом присутствующий в регистрируемом спектре при каждом проходе резонансной области, сохраняет свою величину. Таким образом, отношение сигнал/шум значительно улучшается. После усреднения очищенный от шума спектр можно вывести из ЭВМ на электронный потенциометр и записать его на ленте.

Упражнение 1. ВЫДЕЛЕНИЕ СИГНАЛА ИЗ ШУМА

Включить установку. Установить рекомендуемый режим работы элементов установки. Ввести в волноводный тракт образец с высокой концентрацией исследуемого вещества. Записать спектр образца на ленте потенциометра. Ввести в волноводный тракт образец с низкой концентрацией исследуемого вещества. Убедиться в том, что сигнал ЭПР есть, но трудно различим на фоне шумов. Подать сигнал на преобразователь. Включить установку в режим многократного прохождения резонансной области. После 20-кратного прохождения резонансной области подать усредненный спектр с ЭВМ на потенциометр и записать его. Сопоставить полученный спектр со спектром при однократном прохождении.

Упражнение 2. ИНТЕГРИРОВАНИЕ СПЕКТРА

Установка сконструирована таким образом, что регистрируется первая производная мощности, отбираемой образцом от электромагнитной волны, по магнитному полю ($\partial P / \partial B$). Сигнал в таком виде содержит всю необходимую информацию, но иногда бывает необходимо знать вид сигнала в первообразной форме. Операцию интегрирования спектра легко выполняет ЭВМ.

Подать в ЭВМ команду, обеспечивающую выполнение этой операции.

Подать проинтегрированный спектр на электронный потенциометр и записать его. Сопоставить спектр ЭПР в первообразном и дифференциальном видах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой парамагнетики?
2. В чем заключается электронный парамагнитный резонанс?
3. В чем состоит теорема Лармора?
4. В чем заключается метод накопления сигнала?
5. Как работает экспериментальная установка?
6. Какой вид имеет сигнал ЭПР?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Пул Ч. Техника ЭПР-спектроскопии. М.: Мир, 1970, с. 531.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Величина	Обозначение	Численное значение
Постоянная Больцмана	k	$1,38066 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Скорость света в вакууме	c	$2,99792458 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Планка	h	$6,6261 \cdot 10^{-34}$ Дж с
Постоянная Авогадро	N_A	$6,0220943 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Гравитационная постоянная	γ	$6,6720 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
Постоянная Фарадея	F	$9,648456 \cdot 10^4$ Кл/моль
Заряд электрона	e	$1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	m_e	$0,9109534 \cdot 10^{-30}$ кг
Удельный заряд электрона	e/m_e	$1,758804 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$1,25663706144 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Радиус электрона	r_e	$2,8179380 \cdot 10^{-15}$ м
Магнетон Бора	μ_B	$9,274078 \cdot 10^{-24}$ А·м ²
Магнитный момент электрона	μ_e	$9,284832 \cdot 10^{-24}$ А·м ²
Электрон-вольт	эВ	$1,60202 \cdot 10^{-19}$ Дж

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Таблица 1

Удельное сопротивление некоторых металлов и сплавов

Вещество	$\rho, 10^{-8}$ Ом·см	Вещество	$\rho, 10^{-8}$ Ом·см
Алюминий	2,9	Манганин	43
Вольфрам	5,5	Медь 1,7	
Железо	8,6	Никель	7,0
Золото	2,3	Нихром	110
Кобальт	0,090	Олово	11,3
Константан	50	Платина	10,7
Латунь	8,0	Свинец	21
		Серебро 1,6	
		Цинк	6,0

Таблица 2

**Удельное сопротивление и относительная диэлектрическая проницаемость
некоторых диэлектриков**

Вещество	ρ , Ом·см	ϵ	Вещество	ρ , Ом·см	ϵ
Бумага	10^{13}	2	Стекло	10^{13}	6
Гетинакс	10^{10}	5	Текстолит	10^9	
Кварц	10^{14}	4	Фарфор	10^{15}	6
Керамика	10^{11}	10	Эбонит	10^{15}	2,7
Парафин	$3 \cdot 10^{18}$	2	Бензин	10^{12}	2
Плексиглас	10^{13}	3,5	Вода дистиллированная	10^6	81
Полистирол	10^{18}	3,5	Масло трансформаторное	10^{12}	2,2
Полиэтилен	10^{18}	2,3	Воздух	10^{16}	1
Слюда	10^{16}	6			

Таблица 3

Работа выхода электронов из металла

Металл	W , эВ	Металл	W , эВ
Алюминий	4,3	Медь	4,4
Вольфрам	4,6	Никель	4,5
Железо	4,3	Платина	5,3

Таблица 4

**Удельная магнитная восприимчивость элементов
и соединений**

Вещество	χ , 10^{-9} м ³ /кг	Вещество	χ , 10^{-9} м ³ /кг
Алюминий	7,5	Парафин	-7,5
Висмут	-17,3	Платина	12,3
Вода	-9,0	Серебро	-2,5
Вольфрам	3,8	Стекло	-12,6
Золото	-1,9	Цинк	-1,8
Медь	-1,1		

Таблица 5

Точка Кюри некоторых веществ

Вещество	Точка Кюри, °С	Вещество	Точка Кюри, °С
Титанат бария	+120	Никель	+358
Железо	+770	Пермаллой	+550
Кобальт	+1130	Гадолиний	+16

Таблица 6

Свойства ферромагнитных материалов

Материал	Состав (%), остальное железо и примеси	Относительная начальная проницаемость	Относитель- ная макси- мальная про- ницаемость	Коэрцитив- ная сила, А/м	Индукция насыщения, Тл
Железо чистое	0,05	10 000	200 000	4	2,15
Железо техническое	0,2	150	5 000	80	2,15
Сталь мягкая	0,2С	120	2 000	140	2,12
Пермаллой	78,5 Ni	8 000	100 000	4	1,08
Пермендюр	50 Co	800	5 000	160	2,45
Кобальт	99 Co	70	250	800	1,79
Никель	99 Ni	110	600	56	0,61
Феррит	Ni — Zn	1 000	2 000	8	0,25
Армко		2 500	5 200	120	2,15
Платина-кобальт	77Pt, 23Co			320 000	

Таблица 7

Значения термоЭДС термодпары медь — константан

t°C	мВ	t°C	мВ
—200	—5,54	20	0,74
—150	—4,60	50	2,03
—100	—3,35	100	4,28
—50	—1,81	150	6,70
0	0	200	9,29

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Владимир Иванович Козлов

**ОБЩИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Зав. редакцией *С. И. Зеленский*

Редактор *Р. А. Бунатян*

Художественный редактор *Ю. М. Добрянская*

Переплет художника *Н. Н. Сенько*

Технический редактор *Г. Д. Колоскова*

Корректоры *И. А. Мушникова,*

Л. А. Кузнецова

ИБ № 2625

Сдано в набор 27.01.87.

Подписано в печать 17.08.87.

Л-62276 Формат 60×90/16 Бумага тип. № 3

Гарнитура литературная. Высокая печать

Усл. печ. л. 17,0 Уч.-изд. л. 17,59.

Тираж 9800 экз. Заказ 36. Изд. № 4334

Цена 80 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство

Московского университета.

103009, Москва, ул. Герцена, 5/7.

Типография ордена «Знак Почета» изд-ва МГУ.

119899, Москва, Ленинские горы

**Магазины — опорные пункты
по изучению спроса и распространению
книг Издательства МГУ**

117296, Москва, Ломоносовский проспект, 18,
магазин № 110

«Университетская книжная лавка»
(для москвичей)

252001, Киев, ул. Крещатик, 44,
магазин № 12 «Книги»

630090, Новосибирск, ул. Ильича, 6,
магазин № 2

Магазин № 93 «Книга — почтой» принимает предварительные заказы на книги Издательства МГУ и высылает литературу иногородним покупателям.
Адрес магазина: 117168, ул. Кржижановского, 14,
магазин № 93 «Книга — почтой».

30к

В.И. Козлов ОБЩИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ