

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ**  
**ФГБОУ ВО " БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ "**

Кафедра систем энергообеспечения

**Л.М. Маркарянц**  
**Д.В. Кирдищев**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Учебно-методическое пособие  
к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Электротехническое материаловедение»  
для студентов очной и заочной форм обучения

Направления 13.03.02- Электроэнергетика и электротехника  
35.03.06- Агроинженерия  
15.03.04- Автоматизация технологических  
процессов и производств

Квалификация бакалавр

Брянск 2015

УДК 621.319

ББК 31.2

М 25

**Маркарянц Л.М.** Электротехническое материаловедение: Учебно-методическое пособие для проведения лабораторных работ / Маркарянц Л.М., Кирдищев Д.В. - Брянск. Издательство Брянского ГАУ, 2015.-73с.

Содержание учебно-методического пособия позволяет студентам подготовиться к выполнению лабораторных работ, выполнять их, изучать свойства и характеристики электротехнических материалов.

Рецензент: д.т.н., профессор Погonyшев В.А.

Рекомендовано методической комиссией факультета энергетики и природопользования Брянского ГАУ, протокол №1 от 16.09.2015г.

© Брянский ГАУ, 2015  
© Маркарянц Л.М., 2015  
© Кирдищев Д. В., 2015

## Содержание

Введение	4
<b><i>Лабораторное оборудование используемое для проведения лабораторных работ</i></b>	<b>5</b>
1. Описание приборов входящих в лабораторную установку	7
1.1 Однофазный источник питания	7
1.2 Блок генераторов напряжений с наборным полем (БГНПП)	7
1.3. Измеритель параметров R, L, C	9
1.4. Мультиметр	12
1.5. Блок электронагревателя	14
1.6. Набор миниблоков	17
1.7. USB осциллограф DSO2090	21
<b><u>Проводниковые материалы</u></b>	
<b><i>Лабораторная работа №1</i></b> Определение температурного коэффициента сопротивления	22
<b><i>Лабораторная работа №2</i></b> Измерение сопротивлений <b><i>и</i></b> определение удельных сопротивлений проводников	30
<b><u>Изоляционные материалы</u></b>	
<b><i>Лабораторная работа №3</i></b> Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов	35
<b><i>Лабораторная работа №4</i></b> Снятие поляризационной характеристики диэлектрика и её зависимости от температуры.	42
<b><u>Магнитные материалы</u></b>	
<b><i>Лабораторная работа №5</i></b> Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания	48
<b><i>Лабораторная работа №6</i></b> Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри	58
<b><i>Лабораторная работа №7</i></b> Снятие начальной кривой намагничивания ферромагнитных материалов и определение магнитной проницаемости	65

### **Введение**

**Материал** - это объект, обладающий определенным составом, структурой и свойствами, предназначенный для выполнения определенных функций. Материалы могут иметь различное агрегатное состояние: твердое, жидкое, газообразное или плазменное. Функции, которые выполняют материалы - разнообразны. Это может быть обеспечение протекания тока - в проводниковых материалах, сохранение определенной формы при механических нагрузках - в конструкционных материалах, обеспечение непротекания тока, изоляция - в диэлектрических материалах, превращение электрической энергии в тепловую - в резистивных материалах. Обычно материал выполняет несколько функций, например диэлектрик обязательно испытывает какие-то механические нагрузки, а значит является конструкционным материалом.

**Материаловедение** - наука, занимающаяся изучением состава, структуры, свойств материалов, поведением материалов при различных воздействиях: тепловых, электрических, магнитных и т.д., а также при сочетании этих воздействий. Стихийными материалововедами были еще древние люди, например, научившиеся делать каменные наконечники или топоры из определенных камней со слоистой структурой. Технический прогресс человечества во многом основан на материаловедении. В свою очередь технический прогресс дает новые возможности, методы, приборы для материаловедения, позволяет создавать новые материалы.

**Электротехническое материаловедение** - это раздел материаловедения, который занимается материалами для электротехники и энергетики, т.е. материалами, обладающими специфическими свойствами, необходимыми для конструирования, производства и эксплуатации электротехнического оборудования. Ряд материалов традиционны для любого из разделов материаловедения, в первую очередь, это конструкционные материалы. Основные материалы, рассматриваемые здесь специфичны именно для электротехнического раздела материаловедения, это в первую очередь диэлектрические материалы, затем проводниковые материалы, магнитные материалы, материалы для резисторов.

## **Организация лабораторных работ**

Выполнение практических работ способствует лучшему усвоению студентами теоретических положений по электро материаловедению и технологии конструкционных материалов обеспечивает приобретение практических навыков и более глубокому освоению конструкционных материалов.

До начала лабораторных работ студенты знакомятся с правилами техники безопасности и расписываются в соответствующем журнале.

К выполнению каждой лабораторной работы студент должен подгото-

виться, то есть изучить соответствующий раздел курса по рекомендуемой литературе. До проведения работы студенты изучают описание лабораторной работы, составляют необходимые таблицы, заготавливают формы графиков. Выполняют в случае необходимости требуемые расчёты и т.д.

Проверка подготовленности студента и выполнение очередной лабораторной работы осуществляется преподавателем на коллоквиуме или индивидуальной беседе. Если студент не знает данного раздела курса, содержания. Методики проведения предстоящей лабораторной работы. То он не допускается к её выполнению.

Запуск установки в работу или подключение схем к источнику питания производится только с разрешения преподавателя или лаборанта.

Для выполнения практических работ учебная группа в зависимости от наличия оборудования и рабочих мест может разделиться на бригады не более чем по три человека.

В процессе проведения лабораторно-практической работы полученные результаты следует обработать, отстроить не обходимые графические зависимости ,сделать анализ, показать преподавателю и только после его разрешения отключить схему и все оборудование ,приборы сдать лаборанту ,привести рабочее место в надлежащее состояние .

По каждой лабораторной работе студент составляет индивидуальный отчет, для чего в процессе опытов их число должно быть не менее числа членов бригады. Отчет должен быть оформлен в соответствии со схемой, изложенной в каждой работе и содержать отчеты на контрольные вопросы, необходимые таблицы графики, пояснения, анализ выводы.

### **Правила безопасной работы в лаборатории**

Работающие в лаборатории электрооборудования и средств автоматизации подвергаются опасности поражения электрическим током, воздействия излучения источников электромагнитных полей и травмированию вращающимися частями установок с электрическими машинами.

Для снижения вероятности поражения электрическим током:

- включайте установку для проведения опыта только после разрешения преподавателя;
- не прикасайтесь к клеммам и проводам установки, находящейся под напряжением;
- перед каждым включением установки предупреждайте об этом своих товарищей по звену;
- запомните местоположение рубильников и выключателей, отключающих напряжение на установке и в лаборатории;
- не загромождайте рабочее место лабораторной установки одеждой и другими посторонними предметами.

Для уменьшения воздействия электромагнитного излучения:

- избегайте прямого попадания излучения в глаза;
- не оставляйте включенными установки без необходимости;

- по мере возможности экранируйте источники излучения.

Для исключения травмирования вращающимися деталями:

- не загромождайте рабочее место посторонними предметами;
- не работайте в одежде, допускающей возможность наматывания;
- не облакачивайтесь на оборудование и приборы лабораторной установки;
- предупреждайте коллег по звену о каждом включении установки.

## *Лабораторное оборудование, используемое для проведения лабораторных работ*

- Однофазный источник питания
- Блок генераторов напряжений с наборным полем
- Измеритель параметров R, L, C
- Мультиметр
- Электронагреватель
- Набор миниблоков
- Ноутбук
- USB осциллограф DSO2090

### Лабораторная установка

Общая компоновка типового лабораторного оборудования «Электротехнические материалы» показаны на рис. 1.

Аппаратная часть комплекта выполнена по блочному (модульному) принципу и включает в себя лабораторный стол с выдвижным ящиком и одноуровневой рамой, в которую устанавливаются источник питания, измерительные приборы и функциональные блоки, спроектированные для выполнения различных учебных задач. Блоки легко переставляются в раме с целью получения оптимального их расположения в каждой лабораторной работе.

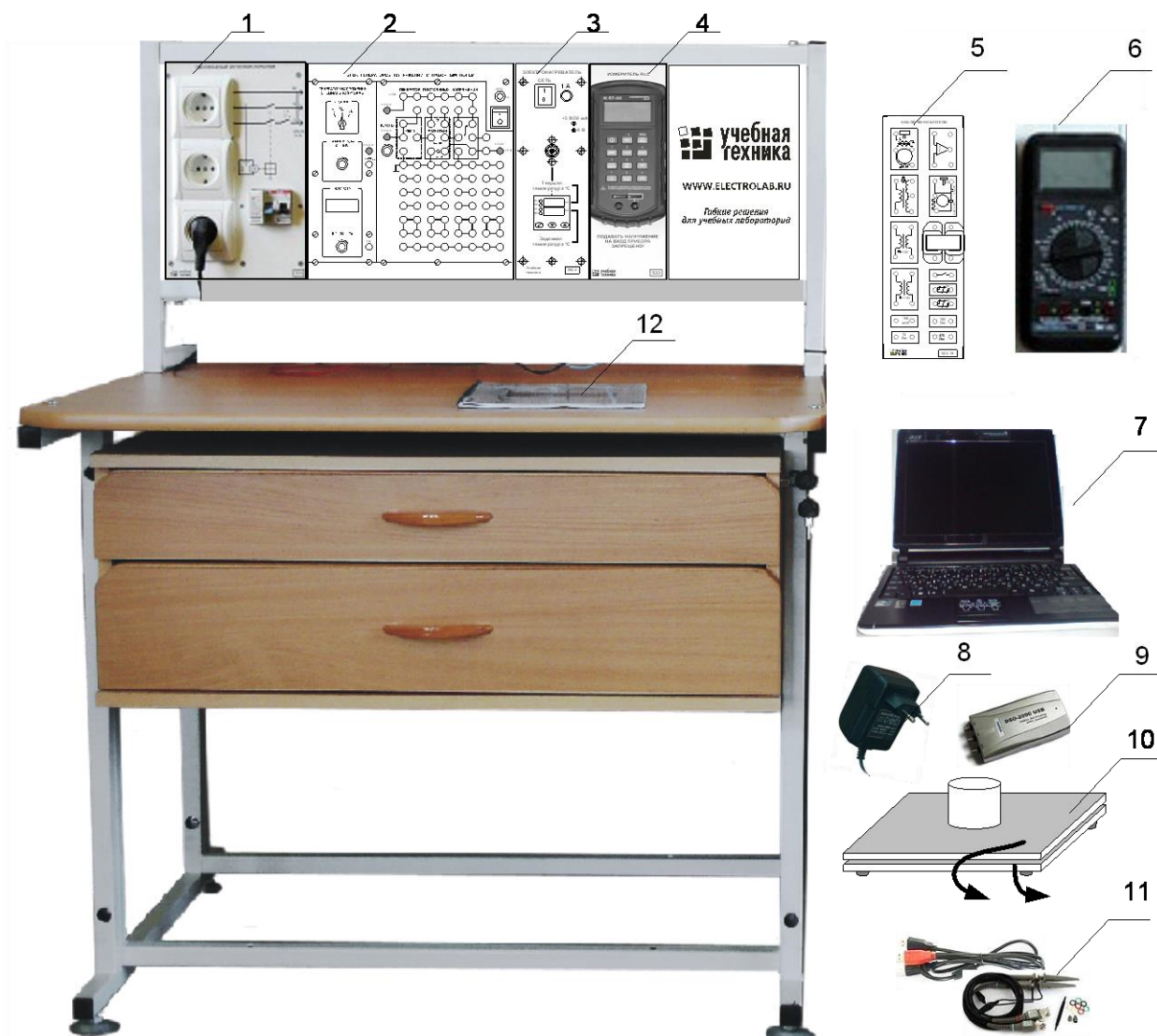


Рис. 1 Общая компоновка типового лабораторного оборудования «Электротехнические материалы»

В настольной раме установлены следующие блоки:

- однофазный источник питания; для присоединения всех блоков к сети  $\sim 220$  В;
- блок генераторов напряжений с наборным полем для питания отдельных блоков переменным и постоянным током пониженного напряжения и сборки электрических цепей;
- электронагреватель для нагрева испытываемых образцов;
- измеритель R L C;



В выдвижных ящиках стола, а, при использовании в лабораторной работе непосредственно на столе, находятся:

- набор миниблоков, содержащих испытываемые образцы и некоторые вспомогательные элементы;
- мультиметр для измерения тока, напряжения, сопротивления и температуры;
- ноутбук общего применения;
- блок питания 12 В
- USB осциллограф;
- блок конденсатора для изучения свойств диэлектриков;
- соединительные провода, кабели, испытываемые образцы проводников и диэлектриков и другие аксессуары;
- методические материалы.

## ***1. Описание приборов входящих в лабораторную установку***

### ***1.1 Однофазный источник питания***

Однофазный источник питания служит для присоединения лабораторной установки к сети  $\sim 220$  В. Источник питания имеет защиту от перегрузок и коротких замыканий, а также устройство защитного отключения. На лицевой панели нанесена электрическая мнемосхема соединений источника. На панели размещены: два однофазных автоматических выключателя и устройство защитного отключения, а также две розетки  $\sim 220$  В. На кожухе с тыльной стороны расположены одна приборная однофазная вилка и три розетки.

### ***1.2 Блок генераторов напряжений с наборным полем (БГННП)***

Блок генераторов напряжения с наборным полем БГННП7 (далее БГННП) предназначен для формирования однофазных регулируемых сигналов различной формы и постоянных напряжений для питания исследуемых схем. БГННП содержит наборное поле для сборки электрических схем с использованием набора миниблоков.

Общий вид БГННП показан на рис. 2. Он состоит из генератора напряжений специальной формы (синусоидальной, прямоугольной биполярной и прямоугольной однополярной) и генератора постоянных напряжений.

Синусоидальное, прямоугольное или импульсное напряжения на гнездах «0 В»- «ВЫХОД» задается переключателем «ФОРМА». Амплитуда выходного напряжения устанавливается ручкой «АМПЛИТУДА» в пределах от 0 до 12 В. Диапазон регулирования частоты генератора напряжений специ-

альной формы - от 0,2 Гц до 200 кГц. Частота устанавливается ручкой энкодера-потенциометра. При горящем состоянии светодиода частота меняется по декадам. При мигающем состоянии светодиода, частота меняется с минимально возможным шагом. Переключение между режимами производится путем нажатия кнопки энкодера-потенциометра.

Генератор постоянных напряжений предназначен для получения стабилизированных напряжений +15 В, -15 В и регулируемого напряжения от 0 до 13 В. Эти три источника напряжения и генератор напряжений специальной формы имеют общую точку «□».

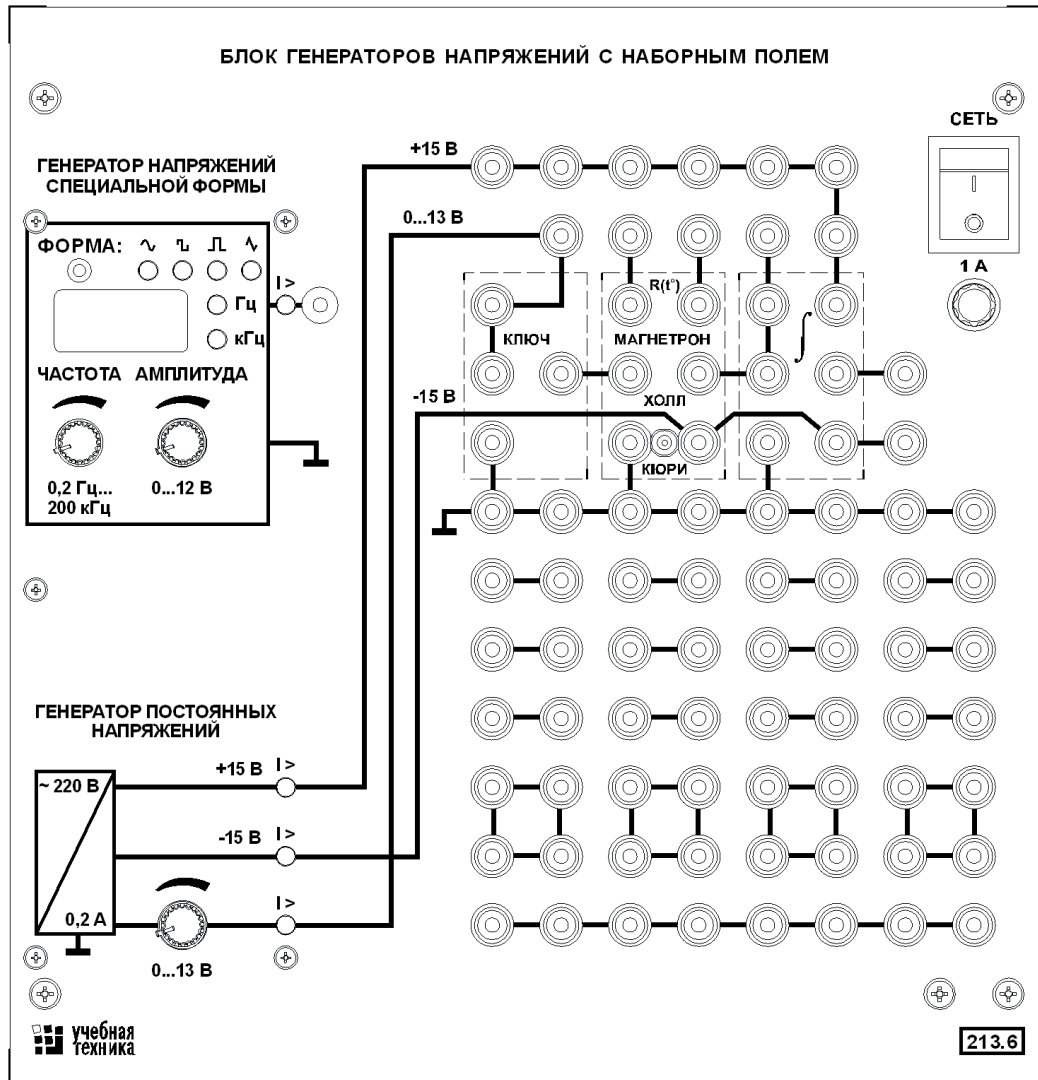


Рис.2. Блок генераторов напряжений с наборным полем

Выходные зажимы генератора постоянных напряжений подключены к гнездам наборного поля, которое предназначено для сборки электрических цепей. Сплошными линиями на наборном поле показаны соединения гнезд между собой и с выходными зажимами генератора. Тонкими пунктирными

линиями показаны места для установки некоторых специализированных миниблоков для упрощения сборки цепей. Остальная часть наборного поля служит для свободного размещения миниблоков и соединения их проводами и перемычками между собой, с измерительными приборами и источниками напряжения.

Максимальный допустимый ток (действующее значение) всех выходов БГННП – 0,2 А. При превышении этого значения, также как и при коротком замыкании, происходит отключение перегруженного выхода защитой и включается светодиод сигнализации перегрузки ( $I > 0,2$  А). Обратное включение происходит автоматически после устранения перегрузки.

БГННП подключается к однофазному источнику питания соединительным шнуром с тыльной стороны стенда.

Перед подключением любого из источников блока генераторов к испытываемой цепи необходимо убедиться, что выключатель питания «СЕТЬ» блока генераторов и всех других блоков, входящих в испытываемую цепь, отключены.

Ручки регулируемых источников («0...15 В», «АМПЛИТУДА») должны быть повернуты до упора против часовой стрелки – на выходе источников необходимо установить минимальное напряжение.

Включение питания блока генераторов и других блоков испытываемой цепи производится в соответствии с указаниями по выполнению эксперимента.

### ***1.3. Измеритель параметров R, L, C***

Прибор Е7-22 (блок 533) предназначен для измерения параметров элементов электрических цепей: электрического сопротивления, индуктивности и емкости.

Внешний вид лицевой панели прибора Е7-22 приведен на рис. 3.

Подробное описание порядка работы с прибором и расчета погрешности результата измерения приведены в руководстве по эксплуатации «Цифровой измеритель иммитанса Е7-22», входящем в комплект прибора. Ниже приведены лишь основные сведения, необходимые для выполнения измерений.

Включение прибора. Подключите блок питания 224.1 к разъему на верхней стороне корпуса прибора Е7-22. Вилку блока питания подключите к свободной розетке однофазного источника питания (218). Если прибор не включился, кратковременно нажмите левую верхнюю кнопку на лицевой па-


нели прибора - . Схема электрическая соединений приведена на рис. 4. В качестве примера на рисунке показано подключение конденсатора при измерении емкости.



Рис. 3. Лицевая панель блока 533 с прибором E7-22.

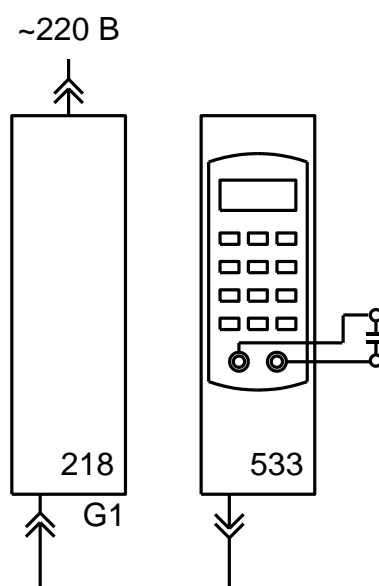


Рис. 4. Схема электрическая соединений для измерения параметров элементов электрических цепей прибором E7-22.

#### *Основные элементы управления прибором.*

1. Кнопка «ЧАСТ» («Frequency») задает частоту, на которой будут выполняться измерения. Последовательные нажатия на кнопку переключают частоту 120 Гц или 1 кГц. Выбранное значение отображается на дисплее.

2. Кнопка «ПАР/ПОСЛ» выбирает схему замещения элемента: параллельную (PAR) или последовательную (SER). Соответствующий индикатор переключается на дисплее.

3. Кнопка «ДИАП» («Range») используется для фиксации диапазона измерения. При включении прибора устанавливается режим автоматического выбора предела измерения («Auto» на индикаторе). Кратковременное нажатие на кнопку переключает предел измерения. Нажатие и удержание кнопки в течении более 2 с возвращает режим автоматического выбора пределов.

4. Кнопка «L/C/R» переключает основной измеряемый параметр элемента: индуктивность, емкость или сопротивление.

5. Кнопка «Q/D/R» последовательно переключает вспомогательный измеряемый параметр: Q – добротность, D – тангенс угла потерь, R – сопротивление. На индикаторе отображаются только те вспомогательные параметры, которые совместимы с выбранным основным параметром.

6. Кнопка «УДЕРЖ» («Hold»). Кратковременное нажатие этой кнопки блокирует обновление результата измерения на индикаторе, повторное кратковременное нажатие снимает блокировку. В режиме блокировки на индикаторе отображается символ «H». Нажатие и удержание этой кнопки более 2 с включает (или выключает) подсветку индикатора.

7. Кнопка «MIN/MAX» - включает режим фиксации экстремальных значений. Последовательные кратковременные нажатия переключают различные, доступные в этом режиме, параметры. Для выхода из режима эту кнопку необходимо нажать, и удерживать более 2 с.

8. Кнопка «УСТ» («Set») – задает программные установки прибора (здесь не рассматриваются).

9. Кнопка «Δ» («Relative») – задает режим относительных измерений. Для отключения режима необходимо нажать кнопку и удерживать её более 2 с.

10. Кнопка «Вер/Ниж ПРЕД» («HI/LO Limit») – включение верхнего и нижнего предела при контроле допуска.

11. Кнопка «ОТН» («TOL») – кнопка включения режима измерения относительных отклонений.

Выполнение измерений.

1. Если прибор включен, отключите и вновь включите его питание. Произойдет сброс некоторых установок в исходное состояние.

2. Выберите:

- вид измеряемого параметра (кнопка «L/C/R»);
- вспомогательный измеряемый параметр (кнопка «Q/D/R»);
- схему замещения элемента (кнопка «ПАР/ПОСЛ»);
- частоту измерения (кнопка «ЧАСТ»).

### 3. Измерьте параметры элемента.

Недопустима подача напряжения на вход прибора! Конденсаторы перед измерением необходимо разрядить, замкнув их выводы.

Подключите элемент к входу прибора и измерьте его параметры. Полярные конденсаторы необходимо подключать в соответствии с полярностью гнезд входа прибора.

Однофазный источник питания G1 предназначен для безопасного питания блока «Измеритель RLC» (533).

## ***1.4. Мультиметр***

Мультиметр предназначен для измерения напряжений, токов, сопротивлений, температуры, а также для проверки диодов и транзисторов. Его общий вид представлен на рис. 5. Подробная техническая информация о мультиметрах и правила эксплуатации приводится в руководстве по эксплуатации изготовителя. Здесь приведём лишь основные сведения.

Для включения мультиметра необходимо нажать кнопку «ON/OFF», расположенную слева под индикатором.

В верхней части мультиметра расположено отсчетное устройство - цифровой индикатор. Ниже расположен механический переключатель режимов работы и пределов измерения приборов. Под переключателем расположены гнезда подключения проводников:

- гнездо «СОМ» - общее гнездо подключения прибора при любых измерениях. При измерении постоянного напряжения или тока гнездо соответствует «-» (минусу) прибора. При измерении сопротивления на гнездо «СОМ» подается «-» (минус) от внутреннего источника. Полярность внутренних источников необходимо учитывать, например, при проверке диодов;

- гнездо «VΩ» используется для подключения к прибору второго проводника на пределах измерения напряжения и сопротивления. При измерении постоянных напряжений и токов это гнездо соответствует «+» прибора. При измерении сопротивления это гнездо «+» внутреннего источника.

- гнездо «А» мультиметра МУ60 предназначено для подключения цепи измерения тока на всех пределах измерения тока, кроме 10 А. Гнездо соответствует «+» прибора.

- гнездо «10 А» предназначено для подключения цепи измерения тока на пределе 10 А. Гнездо соответствует «+» прибора.

При измерении постоянного напряжения показания прибора положительны, если напряжение направлено от гнезда «V» (т. е. «+») к гнезду «COM» (т. е. «-»). Аналогично, ток считается положительным, если он протекает через прибор в направлении от гнезда «+» (т.е. «mA», «A» или «10A») к гнезду «-» («COM»).

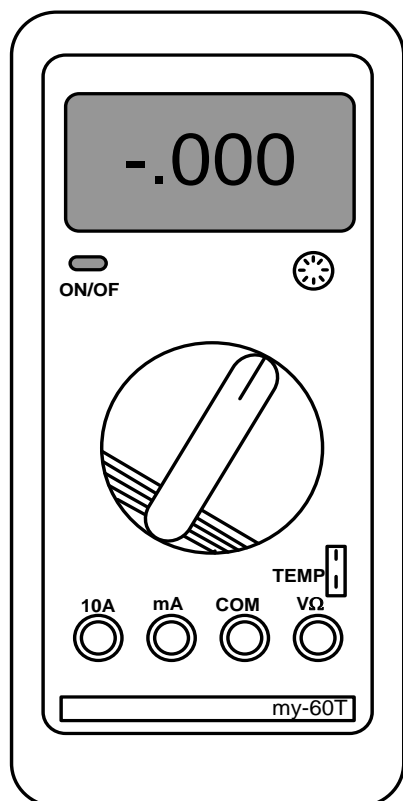


Рис. 5. Общий вид мультиметра

Пара гнёзд TEMP предназначена для подключения термопары, входящей в комплект прибора или специального кабеля, соединения этих гнёзд с термопарой, смонтированной внутри миниблока (о миниблоках см. дальше).

Последовательность работы с мультиметром:

1. В исходном состоянии прибор отключен от измеряемой цепи.

2. Установить переключателем род измеряемой величины и требуемый предел измерения. Если величина измеряемого напряжения или тока не известна заранее, необходимо установить наибольший предел измерения соответствующей величины, исключающий выход прибора из строя при подаче питания на испытываемую цепь.

3. Подключить прибор к обесточенной испытываемой цепи. Включить источники питания мультиметра и испытываемой цепи и выполнить измерения.

Допускается переход на меньший предел измерения измеряемой величины: переключатель пределов переводится в соседнее с исходным положение.

Недопустимо при переключении предела, даже кратковременно, устанавливать переключатель в положения, соответствующие иным измеряемым величинам.

5. Для переключения прибора к другому участку испытываемой цепи, необходимо отключить питание цепи, изменить подключение мультиметра, установить предел измерения, и вновь подать питание на испытываемую цепь.

6. При измерении параметров элементов электрических цепей: диодов, резисторов, конденсаторов недопустимо подавать на вход прибора напряжение от внешних источников (недопустимо измерять параметры элементов в цепи, находящейся под напряжением). Конденсатор перед измерением емкости необходимо разрядить, замкнув накоротко его выводы.

*Для обеспечения надёжной длительной работы мультиметра соблюдайте следующие правила:*

- *Когда порядок измеряемой величины неизвестен, устанавливайте переключатель пределов измерения на наибольшую величину.*
- *Недопустимо при переключении предела, даже кратковременно, устанавливать переключатель в положения, соответствующие иным измеряемым величинам.*
- *Перед тем, как повернуть переключатель для смены рода работы (не для изменения предела измерения!), отключайте щупы от проверяемой цепи.*

*Не измеряйте сопротивление в цепи, к которой подведено напряжение.*

### **1.5. Блок электронагревателя**

Блок электронагревателя (рис. 6) используется для определения температурного коэффициента сопротивления различных материалов. Блок позволяет задать и автоматически поддерживать температуру нагревателя. В блоке установлен маломощный источник +5 В, используемый как дополнительный источник питания в некоторых экспериментах.

Слева от индикаторов 3 и 4 (рис. 6) на лицевой панели регулятора температуры установлены 4 светодиода

K1 – включен при нагреве;

K2 – не используется;

AL – индикатор превышения предельных значений (не используется).

RS – индикатор режима автоматического регулирования. Должен быть включен для нормальной работы блока в режиме автоматического регулирования. При выключении автоматического регулирования (см. ниже) прибор работает только как индикатор температуры нагревателя.

Задание температуры электронагревателя.

1. Нажать одну из кнопок управления 5 или 6 регулятора температуры 2 (рис. 6).



Начинает мигать индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV, зеленый индикатор 4).  
(SV, зеленый индикатор 4).

2. Для изменения заданного значения температуры повторно нажать кнопки 5 (уменьшение) или 6 (увеличение температуры). Удержание кнопки в течение некоторого времени включает режим автоматического ускоренного изменения значения. В процессе установки индикатор продолжает мигать.

3. После установки требуемого значения температуры необходимо однократно нажать кнопку 7 (рис. 6.). Мигание индикатора 4 прекращается. Температура задана.

При выполнении экспериментов рекомендуется начинать с низких значений температуры (на 5...10° выше комнатной) и постепенно повышать её величину до 100° С, т. к. остывание электронагревателя происходит гораздо медленнее его нагрева.

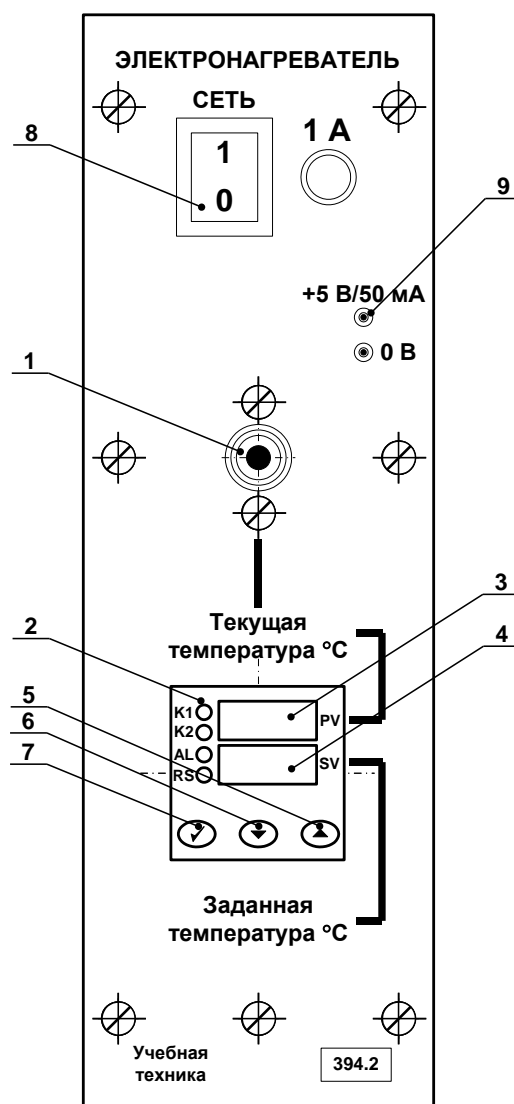


Рис. 6. Лицевая панель блока электронагревателя (394.2).

1 – отверстие нагревателя; 2 – измеритель-регулятор температуры; 3 – индикатор текущего значения температуры нагревателя (PV); 4 – индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV); 5,6,7 – кнопки управления регулятором температуры; 8 – выключатель питания; 9 – гнезда источника питания +5 В.

Включение (отключение) режима автоматического регулирования.

При включении питания электронагревателя режим автоматического регулирования выключен. При выполнении экспериментов целесообразно задать начальное значение температуры и, после этого, включить режим автоматического регулирования.

Переключение режима автоматического регулирования:

1. Однократно нажать кнопку 7 (рис. 6.) регулятора температуры. На индикаторе 3 (красный, PV) отобразится надпись «r-S». На индикаторе 4 (зеленый, SV) текущее состояние регулятора «StoP» (СТОП) или «rUn» (РАБОТА).

2. Для изменения состояния регулятора нажать любую из кнопок 5 или 6 – индикатор 4 начнет мигать. Повторное нажатие кнопки 5 или 6 переключит режим («StoP»↔«rUn»).

3. Нажатие кнопки 7 фиксирует выбранное значение (индикатор 4 не мигает). Повторное нажатие кнопки 7 возвращает регулятор температуры в исходное состояние – на индикаторе отображаются текущее и заданное значения температуры. Светодиод RS сигнализирует о состоянии регулятора: включен – режим «rUn» (РАБОТА), выключен – «StoP» (СТОП).

### ***1.6. Набор миниблоков «Электротехнические материалы»***

Миниблоки представляют собой отдельные элементы электрических цепей или функциональные блоки, из которых непосредственно в ходе лабораторной работы собирается исследуемая электрофизическая установка на наборном поле блока генераторов напряжений.

Все миниблоки хранятся в контейнере, общий вид которого представлен на рис. 7. На этикетках миниблоков изображены упрощённые электрические схемы соединения основных элементов, показано расположение выводов и приведены основные технические параметры.

1. *Миниблок «Сегнетоэлектрик»* предназначен для снятия поляризационной кривой сегнетоэлектрика и изучения её зависимости от температуры. Внутри миниатюрной печки помещён конденсатор 1 мкФ типа Y5V вместе с термпарой и сигнальной лампочкой. Поляризация сегнетоэлектрика в нём достигает насыщения при напряжении 25...30 В. Максимальная амплитуда, которую может дать генератор напряжений специальной формы составляет 10 В. Поэтому, при снятии поляризационной кривой необходимо использовать повышающий трансформатор. Сегнетоэлектрик, используемый в данном типе конденсаторов, имеет точку Кюри при отрицательных температурах, При положительных температурах он ведёт себя как параэлектрик. С увеличением температуры диэлектрическая проницаемость и нелинейность поляризационной кривой уменьшаются. При температуре 70...80оС конденсатор становится практически линейным.

2. *Миниблок «Трансформатор тороидальный»* предназначен для исследования магнитных свойств ферромагнитных сердечников (без нагрева). Он выполнен на двух сердечниках М2000НМ диаметром 20 мм и имеет три обмотки – 100, 100 и 200 витков. На миниблоке имеется двухполюсный переключатель, при переключении которого изменяется направление тока в первичной обмотке. Трансформатор может быть также использован для повышения или понижения переменного напряжения.

3, 4. *Миниблоки «ГМ14ДС» и «ГМ11ДС»* также представляют собой тороидальные трансформаторы, предназначенные для изучения магнитных свойств ферромагнитных материалов. Они выполнены на кольцевых сердечниках из аморфной ленты толщиной 20...25 мкм, полученной на основе сплавов железа или кобальта. Магнитопровод ГМ11ДС имеет очень высокую относительную магнитную проницаемость (до 30000) и низкую магнитную индукцию насыщения (порядка 0,28 Тл). Магнитная проницаемость сплава ГМ14ДС порядка 10000, а индукция насыщения более 1 Тл.

В магнитопроводах ГМ14ДС достигается относительная магнитная проницаемость 10000, а индукция насыщения 0,75 Тл. В обоих трансформаторах на сердечник диаметром 20 мм намотаны две обмотки по 100 витков.

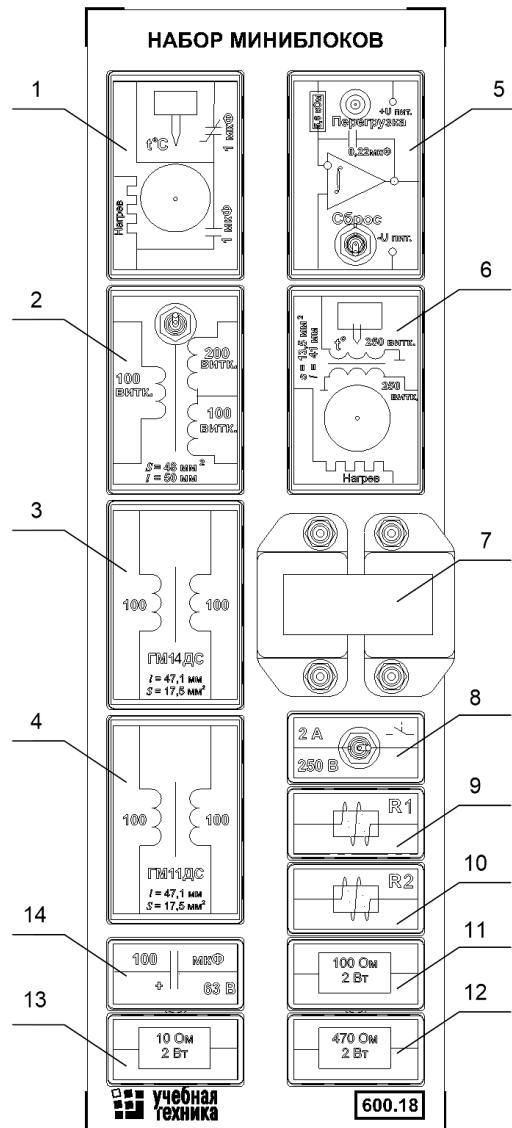


Рис. 7. Набор миниблоков

5. Миниблок «Интегратор» предназначен для интегрирования входного сигнала  $u_{вх}(t)$  или  $i_{вх}$  по времени:

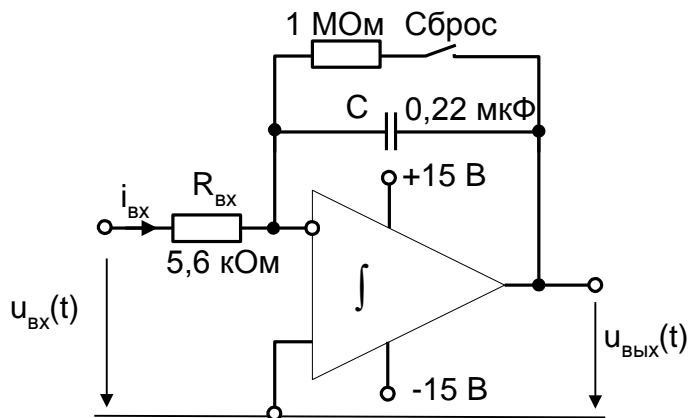


Рис. 8. Принципиальная схема интегратора

$$u_{вых} = \frac{1}{R_{вх}C} \int u_{вх}(t) dt = \frac{1}{C} \int i_{вх} dt.$$

Параметры  $R_{вх}$  и  $C$  указаны на упрощенной принципиальной схеме интегратора (рис.8).

Интегратор имеет два режима работы. При разомкнутом состоянии выключателя «Сброс» (нижнее положение

тумблера на миниблоке) происходит интегрирование входного сигнала. Напряжение на выходе в этом режиме медленно изменяется даже при отсутствии входного сигнала, поскольку всегда есть внутренние утечки схемы и помехи. Этот режим используется для интегрирования кратковременных одиночных импульсов тока или напряжения, например, для измерения заряда при включении конденсатора на постоянное напряжение или для измерения потокосцепления при включении и отключении катушки индуктивности. Перед началом интегрирования необходимо «обнулить» интегратор включив на 2...3 с выключатель «Сброс».

При включённом выключателе «Сброс» (верхнее положение тумблера на миниблоке) медленно изменяющаяся составляющая входного сигнала не интегрируется. Этот режим используется для возвращения интегратора в нулевое положение и для интегрирования периодических быстро протекающих процессов, например, при снятии петли гистерезиса.

Напряжение на выходе интегратора не может быть больше напряжения питания, поэтому, когда оно приближается к напряжению питания +15 В или -15 В, включается светодиод «Перегрузка».

Для удобства подключения интегратора к источникам питания, к входным и выходным цепям, он устанавливается на наборном поле всегда в отведённом для него месте. При этом к нему подводится напряжение питания +15В относительно средней точки, обозначенной на наборном поле символом

6. *Миниблок «Точка Кюри»* предназначен для исследования магнитных свойств ферромагнетика. На кольцевой сердечник из феррита марки М6000НМ размещены две обмотки по 250 витков. Размеры сердечника: наружный диаметр – 16 мм, внутренний – 10 мм, толщина – 4,5 мм. На этикетке миниблока указаны сечение сердечника и длина средней линии. Сердечник с обмотками помещён в миниатюрную печь, вместе с термопарой и сигнальной лампочкой.

На нагревательный элемент подаётся напряжение от источников постоянного напряжения. Оно регулируется от 15 до 30 В. При напряжении 30 В нагрев до точки Кюри (паспортное значение 110оС) происходит примерно за 20 – 25 минут. Запрещается нагревать миниблок до температуры более 120о и оставлять его нагретым выше 70о на длительное время.

7. *Миниблок «Трансформатор с разъёмным сердечником»* может использоваться как собственно трансформатор для повышения или понижения напряжения, как регулируемая индуктивность, если между подковами разъёмного сердечника вставлять неферромагнитные прокладки различной толщины (полоски бумаги или картона), как установка для изучения явления

взаимной индукции (коэффициент связи можно изменять удаляя из катушек половинку или весь сердечник), как установку для изучения закона электромагнитной индукции (если при питании постоянным током из катушки быстро удалить сердечник, то с помощью интегратора можно зафиксировать изменение потокосцепления и возникновение ЭДС). Возможны и другие применения этого миниблока.

8. *Миниблок «Выключатель»* представляет собой тумблер, служащий для включения и выключения какой либо цепи при выполнении эксперимента.

9, 10. *Два одинаковых по конструкции миниблока «R1» и «R2»*, в каждом из которых помещён отрезок проводника, известной длины и диаметра (проводник выполнен в виде катушки). Миниблок служит для измерения сопротивления с помощью измерителя параметров R, L, C, определения удельного сопротивления проводника и определения материала, из которого он может быть выполнен.

11, 12, 13. *Одноэлементные миниблоки «Резистор»*, в каждый из которых помещён резистор, сопротивление которого указано на этикетке.

14. *Одноэлементный миниблок «Конденсатор»*, в котором смонтирован электролитический конденсатор ёмкостью 100 мкФ.

### **1.7. USB осциллограф DSO2090**

Перед первым использованием осциллографа необходимо установить на компьютер его драйвер и программное обеспечение. Установка программного обеспечения осциллографа и драйвера устройства подробно описана в «Руководстве по эксплуатации цифрового USB осциллографа DSO -2090» (файл DSO2090-manual.pdf на диске с программным обеспечением типового комплекта оборудования). При установке программы и драйверов на ноутбук без привода компакт дисков необходимо содержимое компакт диска из комплекта осциллографа перенести на жесткий диск ноутбука, например, использовать компьютер с приводом компакт дисков и накопитель USB flash.

Порядок работы с осциллографом при выполнении базовых экспериментов


1. Ознакомьтесь и строго следуйте рекомендациям по безопасному использованию осциллографа, изложенным в «Руководстве по эксплуатации цифрового USB осциллографа DSO -2090» .

2. Подключение осциллографа и запуск программного обеспечения.

Исходное состояние:

- блок осциллографа отключен от испытываемых установок – на входах осциллографа CH1 и CH2 нет напряжения;

- кабель USB подключен к осциллографу и к компьютеру (ноутбуку). При подключении к работающему компьютеру кабель USB подключите сначала к осциллографу, а затем – к компьютеру;

- запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows .

или выберите пункт меню «ПУСК» → «Все программы» → «DSO -2090 USB» → «DSO -2090 USB» (для Windows XP).

Подробно работа программы описана в «Руководстве по эксплуатации цифрового USB осциллографа DSO -2090».

### 3. Работа с осциллографом.

- убедиться, что отключены источники питания всех блоков испытываемой цепи. Допустимость подачи напряжения на некоторые блоки может быть указана в руководстве по выполнению экспериментов.

- подключите щупы осциллографа к исследуемой цепи строго в соответствии с указаниями руководства по выполнению эксперимента. При использовании щупов с делителями напряжения установите переключатель делителя напряжения (x1-x10) в соответствии с требованиями руководства. Превышение допустимого напряжения на входе может вывести осциллограф (и компьютер) из строя.

- после проверки правильности сборки испытываемой цепи и подключения осциллографа включите питание экспериментальной установки и выполните необходимые измерения.

- по окончании эксперимента отключите питание испытываемой цепи и компьютера.

## Проводниковые материалы

### *Лабораторная работа №1*

#### *Определение температурного коэффициента сопротивления*

**Цель работы:** Определение температурных коэффициентов сопротивления различных проводников и полупроводников, а также прямого напряжения *p-n* перехода кремниевого диода.

При выполнении эксперимента определяются температурные коэффициенты:

1. Полупроводникового резистора с положительным температурным коэффициентом (РТС). Используются резисторы КТ110, КТУ81 или аналогичные. Маркировка: «600.13-1; РТС».

2. Металлической пленки резисторов типа MF, С2-33Н или аналогичных. Маркировка: «600.19-1; MF».

3. Углеродной пленки резисторов типа CF, С2-14 или аналогичных. Маркировка: «600.19-2; С».

4. Полупроводникового резистора с отрицательным температурным коэффициентом (NТС). Используются резисторы В57861S, В57891М или аналогичные. Маркировка: «600.19-3; NТС».

5. Медного провода (термопреобразователь сопротивления медный типа дТС014-50М.В3.20/0,2. Номинальное сопротивление при 0°С – 50 Ом). Маркировка: «600.19-4; Си».

6. Прямого напряжения *p-n* перехода кремниевого диода при постоянном токе. Используются диоды КД522, 1N4148 или аналогичные. Маркировка: «600.19-5; диод Si».

#### *Лабораторная установка и электрическая схема соединений*

При выполнении работы используется электронагреватель (394.2). В блок встроен нагреватель с измерителем-регулятором температуры. Испытуемый образец вставляется в отверстие на лицевой панели нагревателя и с помощью мультиметра измеряется его выходное сопротивление или напряжение.

Блок электронагревателя (рис. 1.1) используется для определения температурного коэффициента сопротивления различных материалов. Блок позволяет задать и автоматически поддерживать температуру нагревателя. В блоке установлен маломощный источник +5 В, используемый как дополни-



тельный источник питания в некоторых экспериментах.

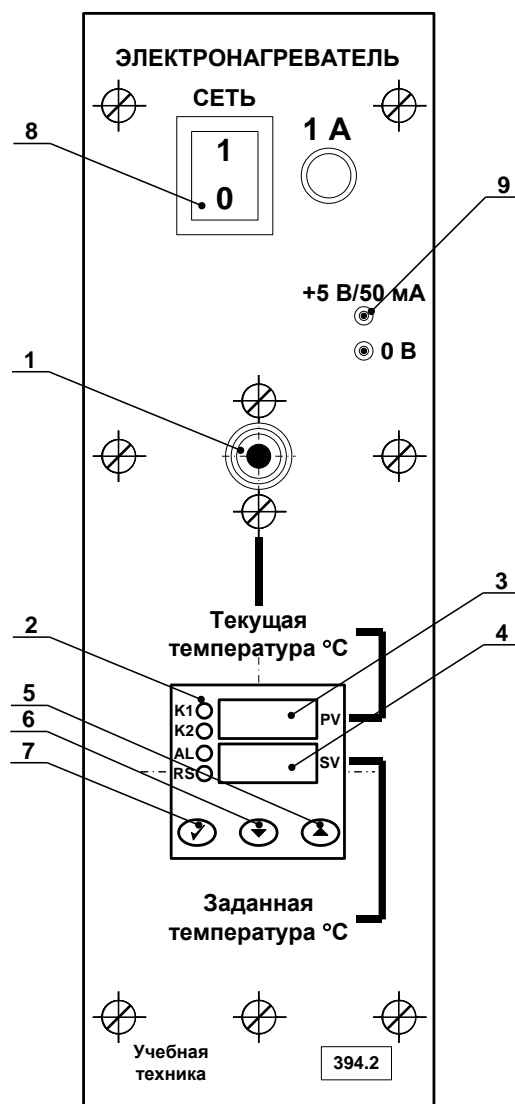


Рис. 1.1. Лицевая панель блока электронагревателя (394.2).

1 – отверстие нагревателя; 2 – измеритель-регулятор температуры; 3 – индикатор текущего значения температуры нагревателя (PV); 4 – индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV); 5,6,7 – кнопки управления регулятором температуры; 8 – выключатель питания; 9 – гнезда источника питания +5 В.

Слева от индикаторов 3 и 4 (рис.1.1) на лицевой панели регулятора температуры установлены 4 светодиода

K1 – включен при нагреве;

K2 – не используется;

AL – индикатор превышения предельных значений (не используется).

RS – индикатор режима автоматического регулирования. Должен быть включен для нормальной работы блока в режиме автоматического регулирования. При выключении автоматического регулирования (см. ниже) прибор работает только как индикатор температуры нагревателя.

#### *Управление температурой электронагревателя.*

1. Нажать одну из кнопок управления 5 или 6 регулятора температуры 2 (рис. 1.1).

Начинает мигать индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV, зеленый индикатор 4).

2. Для изменения заданного значения температуры повторно нажать кнопки 5 (уменьшение) или 6 (увеличение температуры). Удержание кнопки в течение некоторого времени включает режим автоматического ускоренного изменения значения. В процессе установки индикатор продолжает мигать.

3. После установки требуемого значения температуры необходимо однократно нажать кнопку 7 (рис.1.1). Мигание индикатора 4 прекращается. Температура задана.

При выполнении экспериментов рекомендуется начинать с низких значений температуры (на 5...10° выше комнатной) и постепенно повышать её величину до 100° С, т. к. остывание электронагревателя происходит гораздо медленнее его нагрева.

#### *Включение (отключение) режима автоматического регулирования.*

При включении питания электронагревателя режим автоматического регулирования выключен. При выполнении экспериментов целесообразно задать начальное значение температуры и, после этого, включить режим автоматического регулирования.

#### *Переключение режима автоматического регулирования:*

1. Однократно нажать кнопку 7 (рис.1.1) регулятора температуры. На индикаторе 3 (красный, PV) отобразиться надпись «r-S». На индикаторе 4 (зеленый, SV) текущее состояние регулятора «StoP» (СТОП) или «rUn» (РАБОТА).

2. Для изменения состояния регулятора нажать любую из кнопок 5 или 6 – индикатор 4 начнет мигать. Повторное нажатие кнопки 5 или 6 переключит режим («StoP»↔«rUn»).

3. Нажатие кнопки 7 фиксирует выбранное значение (индикатор 4 не мигает). Повторное нажатие кнопки 7 возвращает регулятор температуры в исходное состояние – на индикаторе отображаются текущее и заданное значения температуры. Светодиод RS сигнализирует о состоянии регулятора: включен – режим «rUn» (РАБОТА), выключен - «StoP» (СТОП).

### *Перечень аппаратуры*

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
A1	Электронагреватель	394.2	30...100°C, источник +5 В,
	Набор образцов резисторов	600.19	6 образцов.
PP1	Мультиметр	1416	МУ60Т

### *Порядок выполнения лабораторной работы*

- Проверьте схему электропитания блоков электронагревателя (394.2) и источника питания G1 (218). Убедитесь, что выключатели «СЕТЬ» этих блоков отключены.
- Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений рис. 1.2.
- Выберите значения температуры, при которых Вы хотите измерить сопротивления образцов. Из-за инерционности нагревателя целесообразно выбрать не более 5...7 точек в диапазоне температур до 100°C. Начальное значение – комнатная температура.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока электронагревателя (394.2).
- При включении питания автоматический режим регулятора температуры электронагревателя выключен. Установите требуемую температуру (см. раздел «Блок электронагревателя»). Включите автоматический режим регулятора температуры. Начнется разогрев нагревателя (включены светодиоды индикаторов K1 и RS).

- Измерьте сопротивление образцов при комнатной температуре. Для исключения нагрева образцов от рук их необходимо брать за корпус вблизи выводов.
- После стабилизации температуры нагревателя вблизи заданного значения поочередно вставьте каждый из образцов в отверстие нагревателя до упора. Выждите 2..3 минуты для стабилизации температуры и измерьте сопротивление образца.
- Задайте следующее значение температуры, дождитесь её стабилизации и повторите измерения сопротивления образцов. При высоких температурах образцов будьте осторожны: не касайтесь рабочей части образца, извлеченного из нагревателя.
- По результатам измерений постройте графики зависимостей сопротивления образцов (или напряжения для диода) от температуры.
- По завершении измерений отключите питание всех блоков.
- По результатам испытания отберите образцы, имеющих линейную зависимость сопротивления от температуры, и вычислите их температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{R(t_2) - R(t_1)}{R(t_1) \cdot t_2 - R(t_2) \cdot t_1}, \quad (1.1)$$

где  $R(t_2)$ ,  $R(t_1)$  - сопротивление образца, соответственно при температуре  $t_2$  и  $t_1$ .

$\alpha$  [град<sup>-1</sup>] - температурный коэффициент сопротивления образца.

Сопротивление образца при произвольной температуре  $t$  вычисляется по формуле

$$R(t) = R(t_1) \cdot \frac{1 + \alpha \cdot t}{1 + \alpha \cdot t_1}, \quad (1.2)$$

## Схема электрических соединений

Схема электрических соединений при определении температурных коэффициентов сопротивления показана на рис. 1.2.

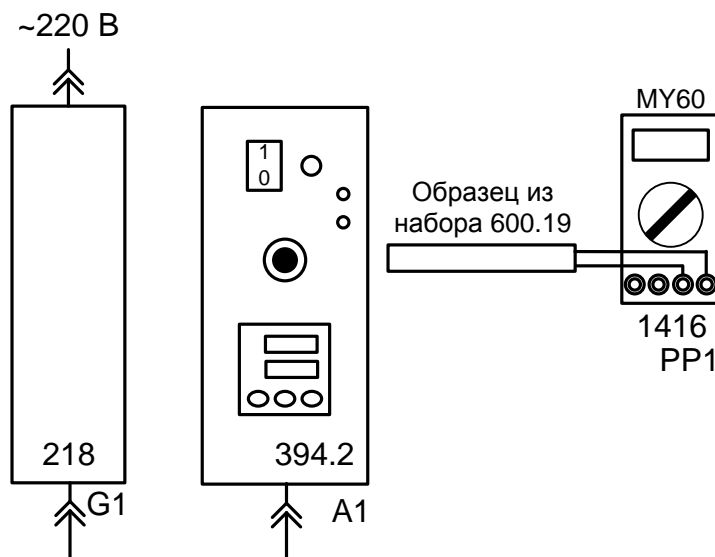


Рис. 1.2. Схема для определения температурного коэффициента сопротивления.

Все образцы подключаются к гнездам « $V\Omega$ » и «COM» мультиметра MY60T (блок 1416) и устанавливается один из пределов измерения сопротивления, соответствующий сопротивлению образца. При подключении кремниевого диода (образец 600.19-5, диод Si) необходимо соблюдать полярность: анод (красный провод) подключается к гнезду « $V\Omega$ », а катод (черный или синий провод) – к гнезду «COM». Для определения прямого напряжения на диоде в милливольтках используется предел измерения « $\rightarrow$ ». В этом случае через диод протекает постоянный прямой ток в диапазоне 1...1,5 мА. Точное значение тока можно измерить дополнительным мультиметром, включенным последовательно с испытываемым диодом.

Однофазный источник питания G1 предназначен для безопасного питания блока электронагревателя 394.2.



Таблица 1.3 Углеродная пленка резисторов типа CF, C2-14

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t$									
$R$									
$\alpha$									

Таблица 1.4 Полупроводниковый резистор с отрицательным температурным коэффициентом.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t$									
$R$									
$\alpha$									

Таблица 1.5 Медный провод

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t$									
$R$									
$\alpha$									

Таблица 1.6 Кремниевый диод прямого напряжения  $p-n$  перехода

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t$									
$R$									
$\alpha$									

**Контрольные вопросы**

1. На какие группы делят проводниковые материалы?.
2. Какие материалы относятся к проводникам, а какие к полупроводникам?
3. Область применения полупроводниковых материалов?
4. Перечислите характерные свойства полупроводников?
5. Что представляет собой собственная и примесная электропроводность полупроводников?
6. Что такое  $p-n$  переход?
7. Описать характер изменения электропроводности в собственном полупроводнике при изменении температуры?

## Лабораторная работа №2

### Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников

**Цель работы:** Определить материал проводника путём измерения его сопротивления и вычисления удельного сопротивления

#### Краткие теоретические сведения

С позиции классической электронной теории металлы рассматриваются как система, состоящая из положительных ионов, образующих узлы кристаллической решетки, и свободных (коллективизированных) электронов — электронов проводимости, заполняющих остальное пространство решетки. В отсутствие электрического поля электроны проводимости под действием теплового поля хаотически перемещаются по металлу. Если к металлическому проводнику приложить электрическое поле, то у каждого электрона проводимости, кроме хаотического (теплового) движения, возникает упорядоченное движение — дрейф: в металле потечет электрический ток.

Таким образом, электрический ток в металлических проводниках обусловлен упорядоченным движением — дрейфом электронов проводимости под действием внешнего электрического поля.

Количественно это явление описывается законом Ома. Согласно закону Ома в дифференциальной форме плотность тока пропорциональна напряженности поля:

$$j = \gamma E \quad (2.1)$$

где  $j$  — плотность электрического тока,  $A/m^2$ ;  $E$  — напряженность поля,  $V/m$ ;  $\gamma$  — коэффициент пропорциональности, представляющий удельную электропроводность,  $Cm/m$ .

На основании классической электронной теории удельная электропроводность  $\gamma$  металлов определяется выражением:

$$\gamma = ena = \frac{e2n\lambda}{2mv} \quad (2.2)$$



где  $e$  — заряд электрона, Кл;  $n$  — концентрация электронов проводимости;  $a$  — подвижность;  $\lambda$  — средняя длина свободного пробега электрона между двумя столкновениями с решеткой в ускоряющем поле напряженностью  $E$ , м;  $v$  — средняя скорость теплового движения электронов в металле, м/с/

У всех металлов величину средней скорости  $v$  теплового движения можно считать постоянной. Концентрация  $n$  электронов проводимости, как и скорость  $v$ , мало зависит от природы металла. Поэтому удельная электропроводность  $\gamma$  металлических проводников зависит в основном от средней длины свободного пробега электрона  $\lambda$ , величина которой существенно влияет на подвижность  $a$  электронов: чем меньше  $\lambda$ , тем меньше  $a$ . Величина  $\lambda$  в свою очередь зависит от степени деформации кристаллической решетки металлического проводника. У идеального металлического проводника при температуре, равной 0 К, электроны проводимости не будут сталкиваться с узлами кристаллической решетки, поэтому длина свободного пробега электрона  $\lambda$  и, следовательно, электропроводность  $\gamma$  должны быть бесконечно большими, а удельное сопротивление  $\rho$  равно нулю.

С позиции волновой механики движущиеся в металле электроны проводимости обладают не только корпускулярными свойствами, но и волновыми. Следовательно, основными их параметрами являются не только масса, скорость и энергия, но и частота и длина волны. Движение электрона в металле с позиции волновой механики — это распространение электронной волны в твердом теле, а сопротивление металла возникает в результате рассеяния электронной волны на тепловых колебаниях решетки и ее дефектах, размеры которых соизмеримы с расстоянием порядка четверти длины волны электрона. В металлах длина волны электрона равна примерно 5 А. Поэтому дефекты размерами больше  $\sim 5/4$  А производят значительное рассеяние электронов и уменьшают тем самым их подвижность  $a$ ; в результате удельное электрическое сопротивление увеличивается. Дефекты меньше  $\sim 5/4$  А не вызывают заметного рассеяния электронных волн. В идеальных кристаллах, т. е. при отсутствии дефектов и тепловых колебаний узлов решетки, электронные волны распространялись бы без рассеяния, и величина  $\lambda$  ограничивалась бы только геометрическими размерами кристаллов, а  $\rho$  было бы равно нулю.

Таким образом, с позиции как классической электронной теории, так и волновой механики удельная электропроводность  $\gamma$  металлических проводников непосредственно зависит от средней длины свободного пробега электрона  $\lambda$ , т. е. от степени деформации кристаллической решетки.

В реальных металлических проводниках рассеяние электронов проводимости происходит на дефектах кристаллической решетки, вызывающих ее искажение (деформацию); в результате уменьшается  $\lambda$  и, следовательно, уменьшается  $\gamma$ . Деформация кристаллической решетки происходит под действием различного рода нарушений периодичности электрического поля, создаваемого положительными ионами решетки.

Электроны проводимости рассеиваются на дефектах решетки, и чем больше таких дефектов, тем выше сопротивление проводника.

При движении электронов проводимости под действием приложенного поля они приобретают дополнительную кинетическую энергию, которую при столкновении с узлами и дефектами кристаллической решетки передают ей; в результате металл нагревается. Мощность удельных тепловых потерь  $P$ , Вт/м<sup>3</sup>, выделяющихся в металлических проводниках, подчиняется закону Джоуля—Ленца:

$$P = \gamma E^2 \quad (2.3)$$

#### *Лабораторная установка и электрическая схема соединений*

Сопротивление проводника с известным сечением и длиной измеряется прибором Е7-22 и затем вычисляется удельное сопротивление по формуле:

$$\rho = R \frac{S}{l} \left[ \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right] \quad (2.4)$$

Схема электрическая соединений приведена на рис. 2.1. Для удобства присоединения миниблока с испытываемым проводником к измерителю Е7-22 используется наборное поле блока генераторов напряжений (код 213.2)

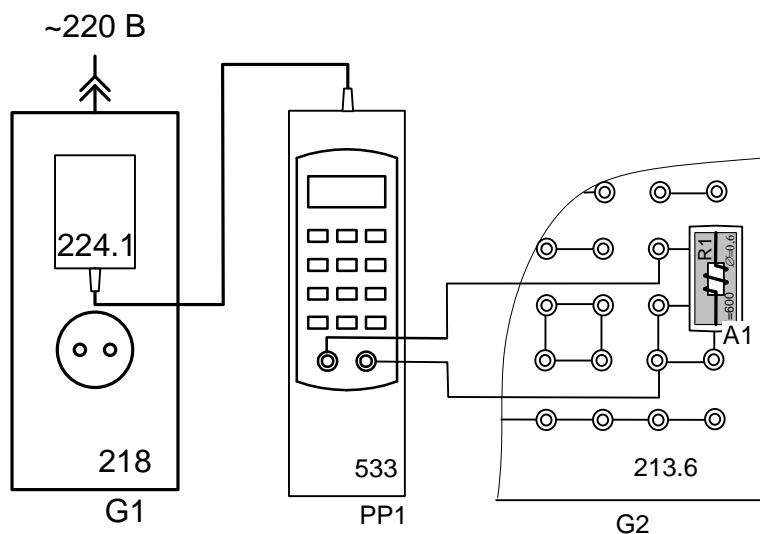


Рис. 2.1. Схема электрическая соединений для измерения сопротивлений образцов

### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
П2	Блок генераторов напряжений с наборным полем	213.6	$\pm 15$ В, 0...+13 В, ~0...12 В, Л 12В. 0,2 Гц...200 кГц
A3	Измеритель R, L, C	534	Цифровой мультиметр E7-22
A4	Набор миниблоков «Электро-технические материалы»	600.18	Миниблоки «R1» и «R2»

### Порядок выполнения лабораторной работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис.2.1). При этом миниблок «R1» установите в наборную панель и подключите его к измерителю R, L, C. Подключите блок питания 224.1 к разъему на верхней стороне корпуса прибора E7-22. Вилку блока питания подключите к свободной розетке однофазного источника питания (218).
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Если прибор E7-22 (измеритель R, L, C) не включился, временно нажмите левую верхнюю кнопку на лицевой панели прибора - **ⓘ**.
- Выберите вид измеряемого параметра, нажимая кнопку «L/C/R» пока на дисплее слева не появится символ R. Запишите значение сопротивления, которое показывает прибор в табл.2.1.
- Измените частоту, нажимая кнопку «ЧАСТ», и убедитесь, что на обеих частотах прибор показывает одно и то же значение сопротивления.
- Замените миниблок «R1» миниблоком «R2» и аналогично измерьте сопротивление установленного в нём резистора.
- Вычислите удельные сопротивления испытываемых проводников по формуле 2.4.
- Расчеты свести в таблицу 2.1

Таблица 2.1

Миниблок	R, Ом	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Материал (предположительно по справочнику)
«R1»			
«R2»			

### ***Контрольные вопросы***

1. Какие факторы влияют на удельное сопротивление проводника?
2. Что представляют собой проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением?
3. Область применения проводниковых материалов?
4. Требования, предъявляемые к контактными материалам?
5. Требования, предъявляемые к резистивным материалам?
6. Что такое термопара? Принцип ее действия?

## Изоляционные материалы

### *Лабораторная работа №3*

#### *Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов*

**Цель работы:** Определение основных характеристик изоляционных материалов: относительной диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ). Приобретение навыков измерения параметров электрических цепей с помощью прибора Е7-22

#### *Краткие теоретические сведения*

Относительная диэлектрическая проницаемость, или диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$ , — один из важнейших макроскопических электрических параметров диэлектрика.

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  количественно характеризует способность диэлектрика поляризоваться, а также оценивает степень его полярности;  $\varepsilon$  является константой диэлектрического материала при определенной температуре и частоте электрического напряжения и показывает, во сколько раз заряд конденсатора с данным диэлектриком больше заряда конденсатора тех же размеров с вакуумом.

Диэлектрическая проницаемость определяет величину электрической емкости изделия (конденсатора, изоляции кабеля и т. п.). Для плоского конденсатора электрическая емкость  $C$ , Ф, выражается формулой

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S / h, \quad (3.1)$$

где  $S$  — площадь измерительного электрода,  $\text{м}^2$ ;  $h$  — толщина диэлектрика, м.

Из формулы (3.1) видно, что чем больше величина  $\varepsilon$  используемого диэлектрика, тем больше электрическая емкость конденсатора при тех же габаритах.

В свою очередь, электрическая емкость  $C$  является коэффициентом пропорциональности между зарядом  $Q_k$ , накопленным конденсатором, и приложенным к нему электрическим напряжением  $U$ :

$$Q_k = CU = U\varepsilon_0 \varepsilon S / h. \quad (3.2)$$

Из формулы (3.2) следует, что электрический заряд  $Q_k$ , накопленный конденсатором, пропорционален величине  $\varepsilon$  диэлектрика. Зная  $Q_k$  и геомет-

рические размеры конденсатора, можно определить  $\varepsilon$  диэлектрического материала.

Рассмотрим механизм образования заряда  $Q_k$  на электродах конденсатора с диэлектриком и из каких составляющих складывается этот заряд. Для этого возьмем два плоских конденсатора одинаковых геометрических размеров: один — с вакуумом, другой — с диэлектриком, и подадим на них одинаковое электрическое напряжение  $U$ . На электродах первого конденсатора образуется заряд

$Q_0$ , на электродах второго —  $Q_k$ . В свою очередь, заряд  $Q_k$  является суммой зарядов  $Q_0$  и  $Q_d$ :

$$Q_k = Q_0 + Q_d. \quad (3.3)$$

Заряд  $Q_0$  образован внешним полем  $E_0$  путем накопления на электродах конденсатора сторонних зарядов с поверхностной плотностью  $Q_0$ ,  $Q_d$  — это дополнительный сторонний заряд на электродах конденсатора, создаваемый источником электрического тока для компенсации поверхностных связанных зарядов диэлектрика.

Формирование на электродах зарядов  $+Q_d$  и  $-Q_d$  связано с возникновением в цепи тока абсорбции.

Диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$  рассматриваемого диэлектрика можно представить как отношение заряда  $Q_k$  конденсатора с диэлектриком, к заряду  $Q_0$  такого же конденсатора с вакуумом:

$$\varepsilon = \frac{Q_k}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0} \quad (3.4)$$

Из формулы следует, что диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  — величина безразмерная, и у любого диэлектрика она больше единицы; в случае вакуума  $\varepsilon=1$ . Из рассмотренного примера также видно, что плотность заряда на электродах конденсатора с диэлектриком в  $\varepsilon$  раз больше плотности заряда на электродах конденсатора с вакуумом, а напряженности электрического поля при одинаковых напряжениях для обоих конденсаторов одинаковы и зависят только от величины напряжения  $U$  и расстояния между электродами ( $E=U/h$ ).

Кроме относительной диэлектрической проницаемости в различают абсолютную диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_a$ , Ф/м,

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon, \quad (3.5)$$

которая не имеет физического смысла и используется в электротехнике.

### Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Для определения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь различных изоляционных материалов измеряются параметры последовательной схемы замещения конденсатора (С и R) с диэлектриком из испытываемого материала. Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора приведена на рис. 3.1. Плоский конденсатор (блок 2355), между пластинами которого помещен испытываемый диэлектрик, подключается к измерителю параметров RLC E7-22 (блок 533). Блоки питания 218 и 224.1 обеспечивают напряжение питания +12В для E7-22.

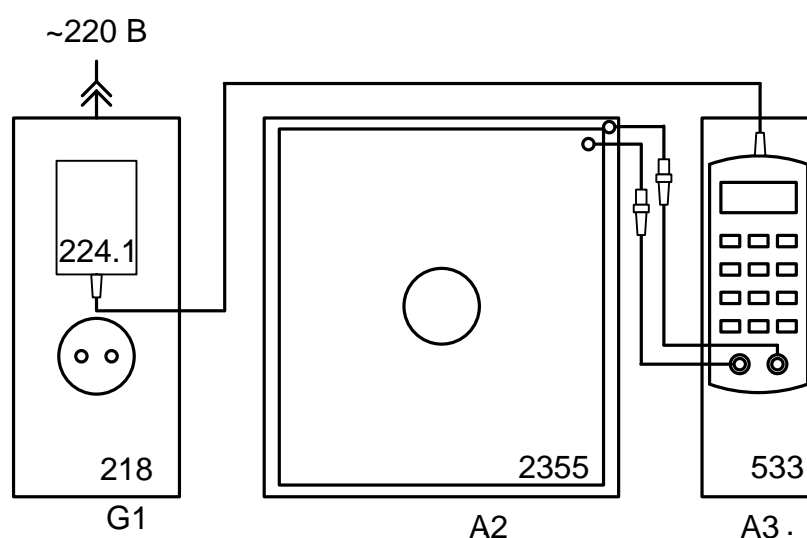


Рис.3.1 Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора с испытываемым диэлектриком.

Емкость конденсатора с испытываемым диэлектриком определяется соотношением

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (3.6)$$

где  $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$  - электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума);

$\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость испытываемого диэлектрика;

$S$  - площадь пластин конденсатора в кв. метрах. В эксперименте учитывается площадь верхней пластины конденсатора. Влиянием краевого эффекта пренебрегаем;

$d$  - расстояние между пластинами конденсатора в метрах, равное толщине испытываемого диэлектрика.

Для вычисления относительной диэлектрической проницаемости испытываемого диэлектрика измеренная емкость  $C$  сравнивается с расчетной емкостью конденсатора  $C_0$  с теми же геометрическими размерами, но без диэлектрика (среда между пластинами – вакуум с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_0$ ). Величина  $C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ . Отношение емкостей

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S/d}{\varepsilon_0 S/d} = \varepsilon, \quad (3.7)$$

т. е. равно относительной диэлектрической проницаемости испытываемого диэлектрика.

Тангенс угла диэлектрических потерь определяется для последовательной схемы замещения конденсатора, состоящей из идеального конденсатора с емкостью  $C$  и, включенного последовательно с ним, сопротивления  $R$ . При измерении на частоте  $\omega$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{1/\omega C}, \quad (3.8)$$

т. е. тангенс диэлектрических потерь равен отношению активного ( $R$ ) и емкостного ( $1/\omega C$ ) сопротивлений цепи. Отсюда можно определить сопротивление  $R$  последовательной схемы замещения конденсатора:


$$R = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C}. \quad (3.9)$$



### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
A3	Измеритель R-L-C	533	Измерение R, L, C при частоте 120 Гц и 1 кГц
A2	Блок конденсатора	2355	Площадь пластин 790 кв. см
	Набор образцов диэлектриков	600.20	Образцы диэлектриков размером 285x297 мм

### Порядок выполнения лабораторной работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Подключите блок питания 224.1 к блоку «Измеритель R-L-C» (533) и к розетке «220 В» однофазного источника питания G1 (блок 218) в соответствии со схемой 3.1.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатель  «Измерителя R-L-C» (533).
- Выберите:
  - вид измеряемого параметра – емкость C (кнопка «L/C/R»);
  - вспомогательный измеряемый параметр – тангенс дельта D (кнопка «Q/D/R»);
  - схему замещения элемента – последовательную (кнопка «ПАР/ПОСЛ», «SER» на индикаторе);
  - частоту измерения – 120 Гц (кнопка «ЧАСТ»).
- Вложите испытываемый образец диэлектрика между пластинами конденсатора и подключите конденсатор к измерителю RLC, как показано на рис. 3.1. Верхнюю пластину блока конденсатора 2355 необходимо установить примерно по центру нижней пластины с равномерным отступом от краев по всему периметру пластины.

- На расстоянии менее 10...15 см от блока конденсаторов 2355 не должно быть посторонних и электропроводных предметов. Недопустима подача напряжения от внешних источников на вход прибора и пластины блока конденсатора!

- Измерьте емкость  $C$  и  $tg\delta$  (D) конденсатора 2355 с диэлектриком.

- Вычислите емкость конденсатора без диэлектрика  $C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ .

Площадь  $S$  указана на верхней пластине конденсатора 2355, а расстояние между пластинами  $d$  равно толщине диэлектрика, указанной на испытываемом образце.

- Вычислите относительную диэлектрическую проницаемость испытываемого диэлектрика и сопротивление последовательной схемы замещения

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, R = \frac{tg\delta}{\omega C}$$

- Занесите результаты измерений в табл. 3.1 и повторите измерения для других образцов диэлектриков.

- Выключите питание блока G1 (218).

Таблица 3.1

Образец	$C$ , пФ	$tg\delta(D)$	$\varepsilon$	$R$ , Ом

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое диэлектрические потери?
2. Какие виды потерь существуют в электроизоляционных материалах?
3. Описать характер изменения  $tg\delta$  неполярного диэлектрика при изменении температуры?
4. Описать характер изменения  $tg\delta$  неполярного диэлектрика при изменении частоты приложенного электрического поля?
5. Описать характер изменения  $tg\delta$  полярного диэлектрика при изменении температуры?
6. Описать характер изменения  $tg\delta$  полярного диэлектрика при изменении частоты приложенного электрического поля?
7. Понятие объемной и поверхностной проводимостей. Единицы измерения. Каков порядок этих величин для диэлектриков?
9. Зависимость электропроводности диэлектрика от температуры.

## *Лабораторная работа №4*

### *Снятие поляризационной характеристики диэлектрика и её зависимости от температуры.*

**Цель работы:** Снять экспериментально кулон-вольтовую характеристику нелинейного конденсатора  $q(u)$  при различных температурах. При одном из значений температуры рассчитать и построить поляризационную характеристику диэлектрика  $P(E)$ , и зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля  $\varepsilon(E)$ , приняв площадь поверхности обкладки конденсатора  $S = 300\text{мм}^2$  и толщину изоляции  $d = 0,01\text{ мм}$

#### *Краткие теоретические сведения*

Поляризация — это такое явление, когда под действием внешнего электрического поля происходит ограниченное смещение связанных заряженных частиц и некоторое упорядочение в расположении диполей, совершающих хаотическое тепловое движение, в результате чего в диэлектрике образуется результирующий электрический дипольный момент.

В поляризованном диэлектрике связанные разноименно заряженные частицы после смещения из своих равновесных положений на ограниченные расстояния остаются в поле взаимодействия друг с другом. Возникающие при этом в каждой единице объема заряды называют связанными зарядами; это заряды самого диэлектрика, они являются неотъемлемой его частью.

Рассмотрим подробнее образование результирующего дипольного момента в поляризованном диэлектрике, а также основные его электрические параметры. При поляризации диэлектрика каждая поляризуемая частица приобретает индуцированный электрический дипольный момент  $p_0$ . Линейные размеры этих частиц малы и составляют несколько ангстрем  $\text{Å}$ . Индуцированный дипольный момент  $p_0$  (измеряется в Кл\*м) каждой частицы диэлектрика пропорционален напряженности электрического поля  $E$ , действующего на эту частицу (его называют локальным полем).

Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 4.1.

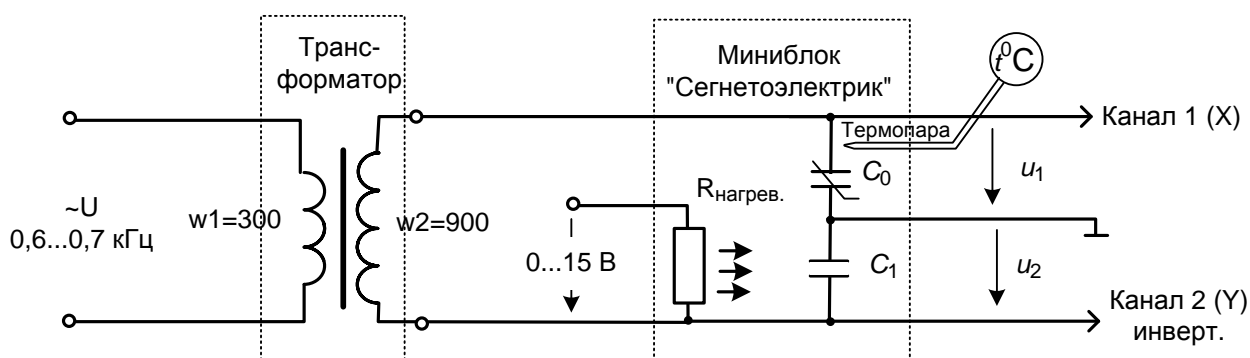


Рис. 4.1. Принципиальная схема для снятия кулон-вольтовой характеристики конденсатора

Синусоидальное напряжение подаётся через повышающий трансформатор на цепь, состоящую из последовательно соединённых линейного конденсатора  $C_1$  и нелинейного конденсатора  $C_0$  типа К10-17 с изоляцией из сегнетоэлектрика. (Повышающий трансформатор необходим для достижения насыщения диэлектрика.) Заряды на этих конденсаторах одинаковы и пропорциональны напряжению  $u_1$ :

$$q = C_1 u_1 \quad (.4.1)$$

Напряжение  $u_1$  подаётся на вертикальный вход осциллографа, а  $u_2$  - на горизонтальный. Сигнал  $u_1$  на осциллографе необходимо инвертировать, чтобы положительному напряжению соответствовало отклонение луча на дисплее вверх. На экране осциллографа появляется зависимость  $q(u)$  для нелинейного конденсатора, примерный вид которой для разных температур показан на рис. 4.2. По ней можно рассчитать поляризационную характеристику  $P(E)$ .

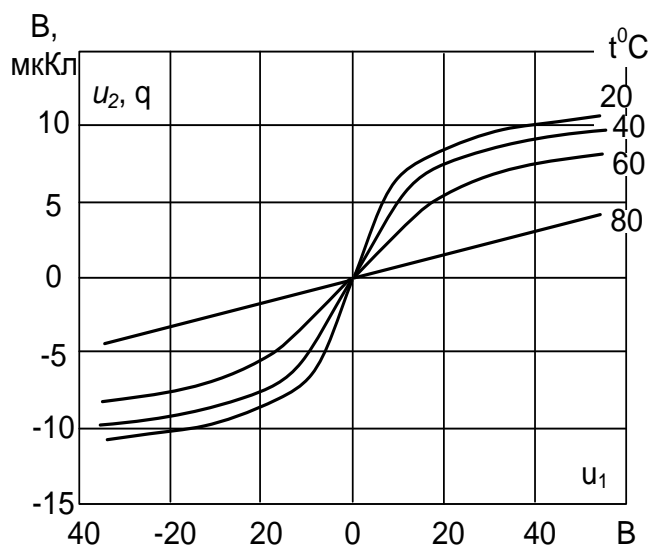


Рис. 4.2. Примерный вид кулон-вольтовой характеристики нелинейного конденсатора при разных температурах

Напряжённость электрического поля:

$$E = \frac{u_1}{d}, \quad (4.2)$$

где  $d$  – толщина диэлектрика.

Вектор электрического смещения:

$$D = \frac{C_1 u_2}{S}, \quad (4.3)$$

где  $S$  – площадь обкладок конденсатора.

Поляризованность:

$P = D - \varepsilon_0 E$ , где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость пустоты.

Нагревание конденсатора осуществляется специальным резистором  $R_{\text{нагрев}}$  от регулируемого источника постоянного напряжения. Измерение температуры производится с помощью термопары мультиметром МУ60Т.

Точка Кюри диэлектрика конденсатора К10-17 лежит в области отрицательных температур, поэтому в данной работе она не определяется.

Для сборки схемы используется наборная панель блока генераторов напряжений, как показано на монтажной схеме (рис. 4.3).

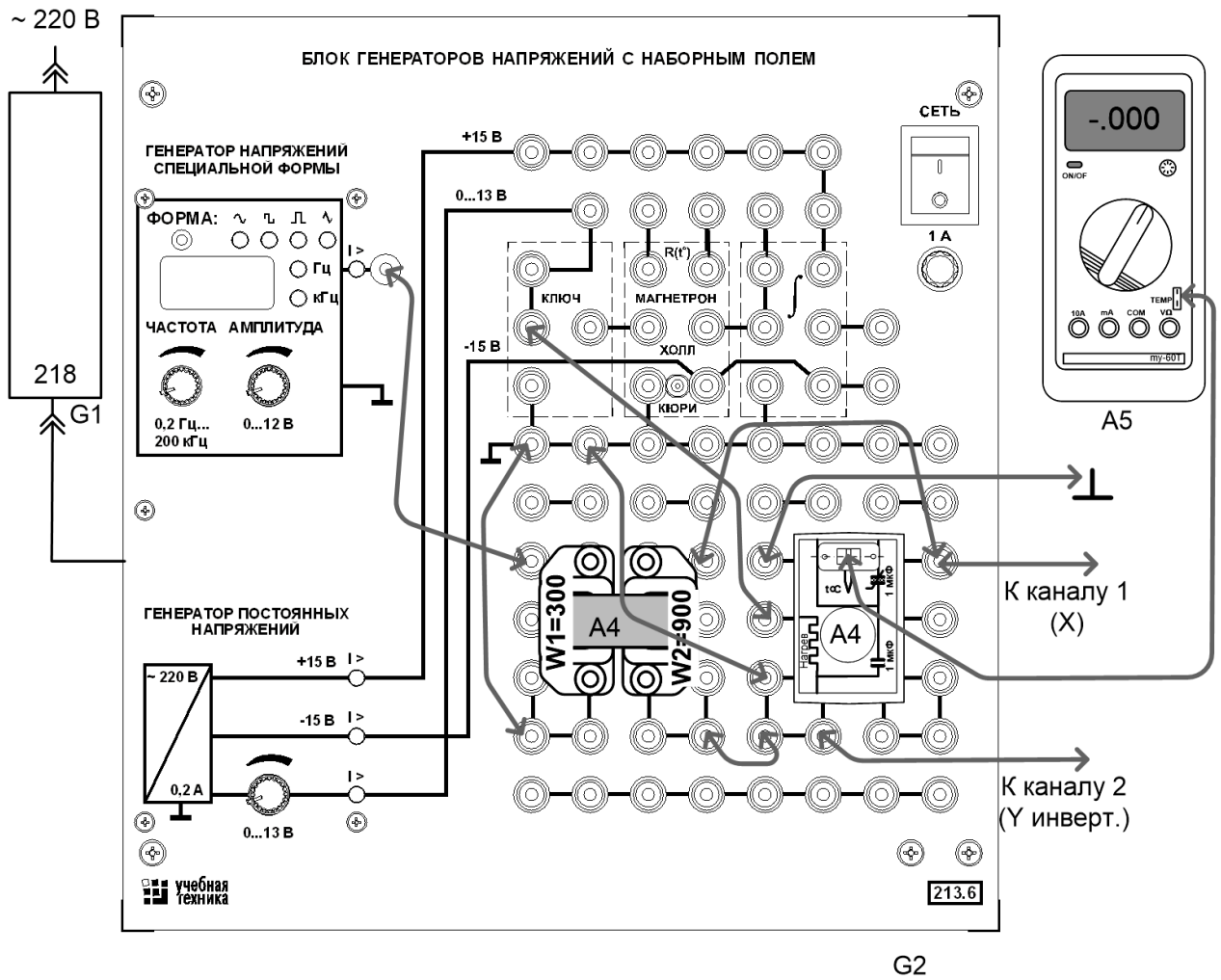





Рис.4.3 Монтажная схема для снятия кулон-вольтовых характеристик нелинейного конденсатора при разных температурах

### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжений	213.6	$\pm 15$ В, 0...+13 В, ~0...12 В, л 12В. 0,2 Гц...200 кГц
A4	Набор миниблоков «Электро-технические материалы»	600.18	Миниблоки «Сегнетоэлектрик» и «Трансформатор с разъемным сердечником»
A5	Мультиметр	1416	Цифровой мультиметр МУ60Т
	USB осциллограф		
	Ноутбук		

#### Порядок выполнения лабораторной работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 3.2.3). При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение  $\square 10$ . Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные штыри из комплекта аксессуаров.
- Ручку регулирования выходного напряжения 0...15В генератора постоянного напряжения G2 (213.2) поверните против часовой стрелки до упора.
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку. Включите ноутбук и активизируйте программу осциллограф. (Ярлык  DSO-2090USB на рабочем столе).
- Установите на дисплее по каждому каналу осциллографа множители  $\times 10$  и чувствительность 20 В/дел по первому каналу и 5 В/дел. – по второму.
- Активизируйте полный комплект инструментов настройки осциллографа, используя пункты меню: Wiew – Complete Tools и уберите верхние дополнительные линейки инструментов, щёлкнув на пунктах меню: Wiew –Top Toolbar 1 и Top Toolbar 2. (*Top Toolbar Left оставьте*).

- С помощью левой вертикальной линейки инструментов настройки «включите» измерение амплитуд напряжения по первому и второму каналам (пункты меню: Ch1 -- , Ch2 -- ). Результат отображается в окне «Measurement» в виде надписей CH1: Top=\*\*\*\* и CH2: Top=\*\*\*\*. Появившиеся лишние позиции в этом окне сотрите. (*Top – положительная средне-взвешенная амплитуда периодического сигнала*).
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока генераторов напряжений G2
- Установите частоту синусоидального сигнала 0,6...0,7 кГц и, регулируя амплитуду сигнала, убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух кривых.
- Отрегулируйте развёртку так, чтобы на дисплее было изображение одного – двух периодов кривых. (Чувствительность по горизонтали 0,2 мс/дел.). Выведите кривые в центр экрана, сделайте инвертирование второго канала (пункты меню: Channel – CH2 Setting – Invert Off).
- Убедитесь, что сигналы совпадают по фазе, что при регулировании подаваемого синусоидального напряжения они не выходят за пределы экрана, что измеряются «CH1 Top» и «CH2 Top».
- Включите режим X – Y и убедитесь, что на экране появилось изображение кулон-вольтовой характеристики конденсатора (узкой петли гистерезиса).
- Уменьшите синусоидальное напряжение до нуля и, увеличивая его шаг за шагом до максимально возможного напряжения генератора, записывайте в табл. 3.2.1 амплитуды напряжений на нелинейном конденсаторе -  $U_1$  (CH1) и на линейном -  $U_2$  (CH2).
- Рассчитайте поляризационную характеристику диэлектрика  $P(E)$  и дифференциальную зависимость  $\varepsilon(E)$ . Выберите масштабы и постройте графики.
- При максимальном значении амплитуды приложенного напряжения сохраните изображение в желаемом формате (пункт меню File), или перерисуйте её в отчёт.
- Выберите значения температуры, при которых Вы хотите снять кулон-вольтовую характеристику. Рекомендуется, кроме комнатной температуры, снять характеристику при 40, 60, и 80°C.
- Включите на мультиметре режим измерения температуры и, подайте напряжение нагрева 15 В на миниблок, повернув ручку регулятора 0...15 В вправо до упора. Убедитесь, что в миниблоке загорелась сигнальная лампочка и температура начала увеличиваться. Скорость нагрева можно регулировать, увеличивая и уменьшая напряжение нагрева.
- По мере нагревания миниблока сохраняйте или перерисовывайте кривую в отчёт при выбранных значениях температуры.



- После достижения температуры 80°C отключите нагрев и выключите все используемые блоки.
- Закройте окно виртуального осциллографа.
- Закройте все окна и выключите ноутбук, используя кнопку «ПУСК».
- Разберите цепь

Таблица 4.1

$U_1, \text{В}$ (горизонтальный канал)	$U_2, \text{В}$ (вертикальный канал)	$E, \text{В/м}$	$D = \frac{C_1 u_1}{S}$ $\text{Кл/м}^2$	$P = D - \epsilon_0 E$ $\text{Кл/м}^2$	$\epsilon = D / (\epsilon_0 E)$	$E_{\text{ср}}, \text{В/м}$
0						
10						
20						
30						
40						
50						
60						

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое поляризация и какими параметрами она характеризуется?
2. Описать процесс электронной поляризации в диэлектриках.
3. Описать процесс ионной поляризации в диэлектриках.
4. Описать процесс дипольно-релаксационной поляризации в диэлектриках.
5. Описать процесс ионно-релаксационной поляризации в диэлектриках.
6. Описать процесс миграционной поляризации в диэлектриках.
7. Описать процесс спонтанной поляризации в диэлектриках.

## Магнитные материалы

### *Лабораторная работа №5*

#### *Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания*

*Цель работы: Получить на осциллографе петлю гистерезиса ферромагнетика, снять экспериментально основную кривую намагничивания, рассчитать и построить зависимость относительной магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля.*

#### *Краткие теоретические сведения*

Ферромагнетики- особый класс магнетиков образуют вещества, способные обладать намагниченностью в отсутствии внешнего магнитного поля. По своему наиболее распространенному представлению (железу) их называют ферромагнетиками.

Ферромагнетиками называются твердые вещества, обладающие при не слишком высоких температурах самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, изменения температуры. Ферромагнетики в отличие от слабомагнитных диа- и парамагнетиков являются сильномагнитными средами: внутреннее магнитное поле в них может в сотни и тысячи раз превосходить внешнее поле. Большой вклад в экспериментальное изучение свойств ферромагнетиков внес А. Г. Столетов. В своей докторской диссертации он исследовал зависимость намагниченности мягкого железа от напряженности магнитного поля. Предложенный им способ заключался в измерении магнитного потока в ферромагнитных кольцах при помощи баллистического гальванометра. Ферромагнитные материалы в большой или меньшей степени обладают магнитной анизотропией, т.е. свойством намагничиваться с различной степенью трудности в различных направлениях.

Магнитные свойства ферромагнитных материалов сохраняются до тех пор, пока их температура не достигнет значения, называемого точкой Кюри. При температурах выше точки Кюри ферромагнетик ведет себя во внешнем магнитном поле как парамагнитное вещество. Он не только теряет свои ферромагнитные свойства, но у него изменяется теплоемкость, электропроводимость и некоторые другие физические характеристики.

Точка Кюри для различных материалов различна:  
для железа +7700 С;

для никеля +3650 С;  
 для кобальта +11300 С.

При намагничивании ферромагнетиков происходит небольшое изменение их линейных размеров, т.е. увеличение или уменьшение их длины с одновременным уменьшением или увеличением поперечного сечения. Это явление называется магнитоотрицательностью, оно зависит от строения кристаллической решетки ферромагнетика.

В чем же заключается природа ферромагнетизма?

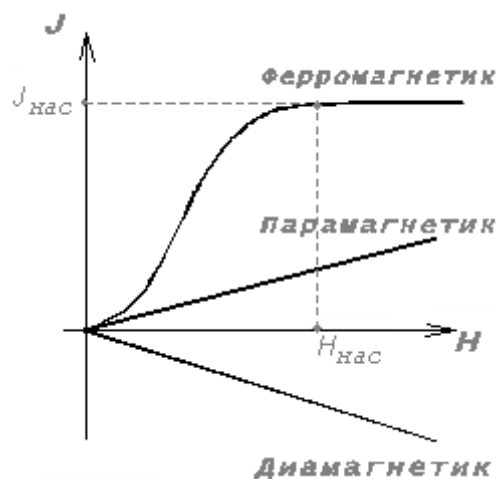


рис. 1 Намагничивание образца

Согласно представлениям Вейсса (1865-1940), его описательной теории ферромагнетизма, ферромагнетики при температурах ниже точки Кюри обладают спонтанной намагниченностью независимо от наличия внешнего намагничивающего поля. Однако это вносило некое противоречие, т.к. многие ферромагнитные материалы при температурах ниже точки Кюри не намагничены. Для устранения этого противоречия Вейсс ввел гипотезу, согласно которой ферромагнетик ниже точки Кюри разбивается на большое число малых микроскопических (порядка  $10^{-3} - 10^{-2}$  см.) областей — доменов, самопроизвольно намагниченных до насыщения. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты отдельных атомов ориентированы хаотически и компенсируют друг друга, поэтому результирующий магнитный момент ферромагнетика равен нулю, т.е. ферромагнетик не намагничен. Внешнее магнитное поле ориентирует по полю магнитные моменты не отдельных атомов, как в парамагнетике, а целых областей спонтанной намагниченности. Поэтому с ростом  $H$  намагниченность  $J$  (рис. 1) и магнитная индукция  $B$  уже в слабых полях растет довольно быстро.

Показанное на рис.1 намагничивание такого образца (ферромагнетик) в магнитном поле, напряженность  $H$  которого медленно увеличивается, происходит за счет двух процессов: смещения границ доменов и вращения магнитных моментов доменов.

Процесс смещения границ доменов приводит к росту размеров тех доменов, которые самопроизвольно намагничены в направлениях, близких к направлению вектора  $H$ .

Процесс вращения магнитных моментов доменов по направлению  $H$  играет основную роль только в области, близкой к насыщению (т.е. при  $H$  близких к  $H_s$ ).

Существование доменов в ферромагнетиках доказано экспериментально. Прямым экспериментальным методом их наблюдения является метод порошковых фигур.

На тщательно отполированную поверхность ферромагнетика наносятся водная суспензия мелкого ферромагнитного порошка (магнетит). Частицы оседают преимущественно в местах максимальной неоднородности магнитного поля, т.е. на границах между доменами. Поэтому осевший порошок очерчивает границы доменов.

Дальнейшее развитие теории ферромагнетизма Френкелем и Гейзенбергом, а также ряд экспериментальных фактов позволили выяснить природу элементарных носителей ферромагнетизма.

В настоящий момент установлено, что магнитные свойства ферромагнетиков определяются спиновыми магнитными моментами электронов. Установлено также, что ферромагнитными свойствами могут обладать только кристаллические вещества, в атомах которых имеются нестроенные внутренние электронные оболочки с некомпенсированными спинами. В подобных кристаллах могут возникать силы, которые вынуждают спиновые магнитные моменты электронов ориентироваться параллельно друг другу, что и приводит к возникновению областей спонтанного намагничивания. Эти силы, называемые обменными, имеют квантовую природу – они обусловлены волновыми свойствами электронов.

#### *Лабораторная установка и электрическая схема соединений*

Зависимость  $B(H)$  - кривая намагничивания ферромагнитного материала при циклическом перемагничивании имеет вид петли. Она может быть снята с помощью осциллографа.

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 5.1.

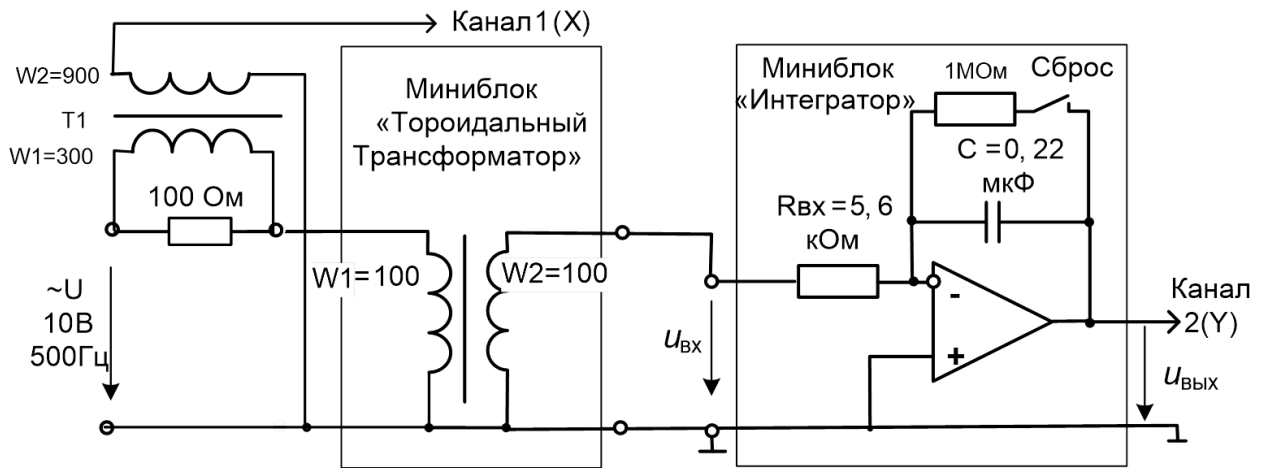


Рис. 5.1. Принципиальная схема для снятия петли гистерезиса

Исследуемые образцы ферромагнетиков представляют собой кольцевые сердечники, на которые намотаны по 2 обмотки 100 витков каждая. Они заключены в миниблоки: «Трансформатор торроидальный» (феррит М2000НМ), «ГМ14ДС» и «ГМ11ДС» (по обозначению марки ферромагетика). Аналогично может сниматься петля гистерезиса кольцевого сердечника из феррита М6000НМ, который помещён в миниблок «Точка Кюри». Этот опыт с дополнительным определением точки Кюри описан в разделе 7. Сечение магнитопровода и длина средней линии указаны на этикетках миниблоков. Первичная обмотка подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. К вторичной обмотке подключён интегратор для измерения магнитного потока.

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}}C} \int u_{\text{ex}}(t) dt = \frac{1}{R_{\text{ex}}C} \int w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{w_2}{R_{\text{ex}}C} \Phi = \frac{w_2}{R_{\text{ex}}C} BS, \quad (5.1)$$

где  $R_{\text{ex}}$  и  $C$  – параметры интегратора,  $S$  – сечение сердечника а  $B$  – магнитная индукция.

Для исключения интегрирования постоянной составляющей входного сигнала переключатель «Сброс» интегратора должен находиться в замкнутом состоянии.

Из рассмотренного выражения магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{ex}}C}{w_2S} u_{\text{вых}}. \quad (5.2)$$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = \frac{iW}{l} \quad , (5.3)$$

где  $l$  – длина средней линии сердечника.

Напряжение с шунта 100 Ом через трансформатор гальванической развязки Т1 подаётся на горизонтальный вход осциллографа, а напряжение  $u_{\text{вых}}$  с выхода интегратора подаётся на вертикальный вход. Поскольку первое пропорционально напряжённости магнитного поля, а второе - магнитной индукции, экране осциллографа отображается в определённом масштабе зависимость  $B(H)$ . Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений как показано на монтажной схеме (рис.5.2). Причём, интегратор устанавливается в наборную панель точно на отведённое для него место. Тогда к нему автоматически подводятся напряжения питания «+» и «-» 15В.

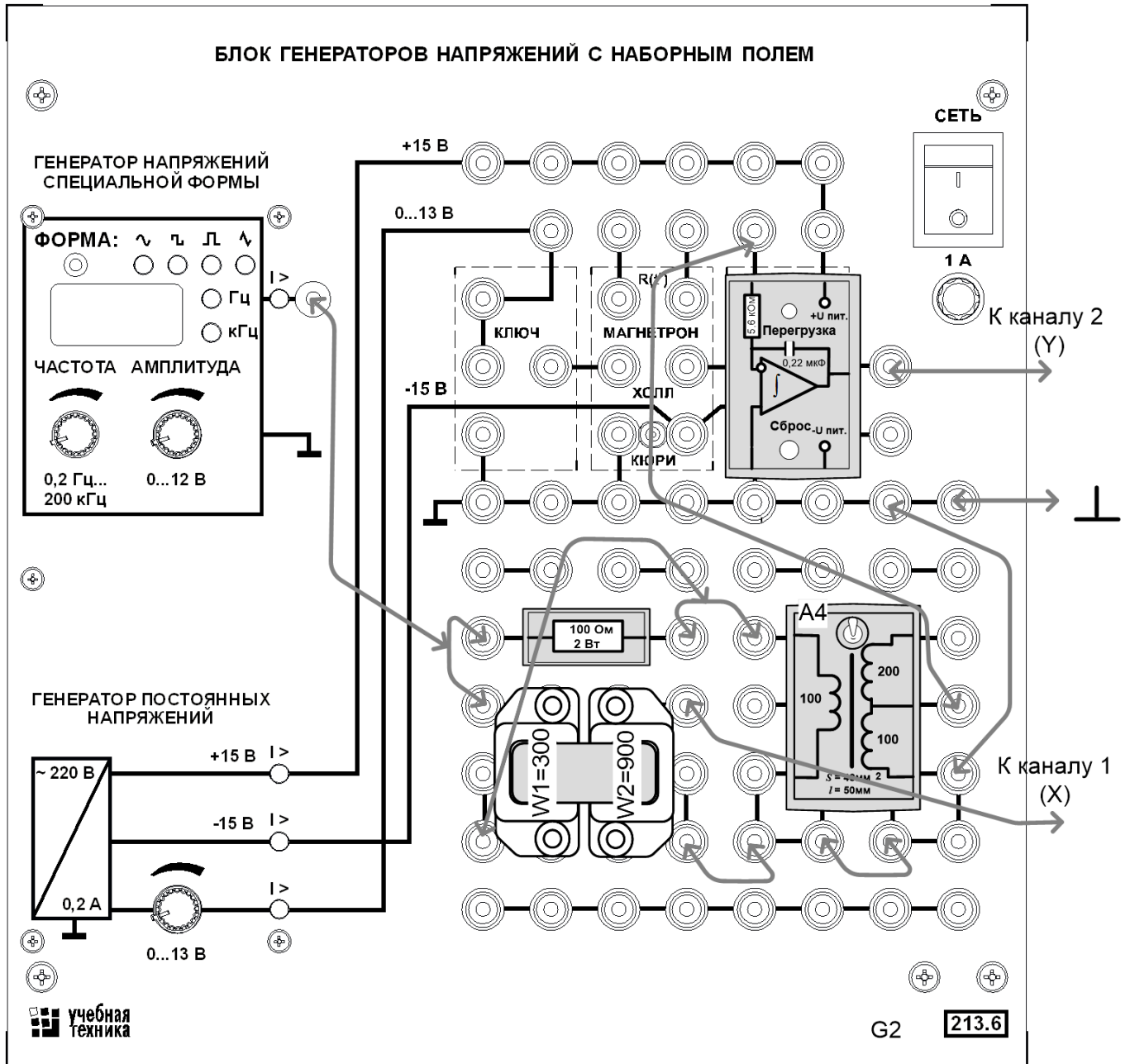



Рис. 5.2. Монтажная схема для снятия петли гистерезиса

### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжения	213.6	$\pm 15$ В, 0...+13 В, ~0...12 В, Л 12В. 0,2 Гц...200 кГц
A4	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18	Миниблоки: «Трансформатор тороидальный», Трансформатор с разъемным сердечником, «Интегратор», «ГМ11ДС», «ГМ14ДС», «Резистор 100 Ом»
	USB осциллограф	1419	
	Ноутбук	1420	

#### Порядок выполнения лабораторной работы

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 5.2). При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение  $\square 1$ . Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные щипцы из комплекта аксессуаров.
  - Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку. Включите ноутбук.
  - Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1 (218).
  - Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 500 Гц максимальной амплитуды.
  - Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows и убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух сигналов: кривая из-



менения тока и кривая магнитного потока. Отрегулируйте развёртку так, чтобы на дисплее было 1...2 периода сигналов. Отрегулируйте чувствительность по каналам так, чтобы кривые не выходили за пределы экрана осциллографа.

- Активизируйте полный комплект инструментов настройки осциллографа, используя пункты меню: *Wiew – Complete Tools* и уберите верхние дополнительные линейки инструментов, щёлкнув на пунктах меню: *Wiew – Top Toolbar 1* и *Top Toolbar 2*. (*Top Toolbar Left оставьте*).

- С помощью левой вертикальной линейки инструментов настройки «включите» измерение амплитуд напряжения по первому и второму каналам (пункты меню: *Ch1 --  $\int$* , *Ch2 --  $\int$* ). Результат отображается в окне «Measurement» в виде надписей *CH1: Top=\*\*\*\** и *CH1: Top=\*\*\*\**. Появившиеся лишние позиции в этом окне сотрите. (*Top – положительная средне-взвешенная амплитуда периодического сигнала*).

- Включите режим X-Y (канал 1 – X, канал 2 – Y) и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. Отрегулируйте намагничивающий ток таким образом, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области насыщения. При необходимости измените чувствительность.

- Запишите в табл. 5.1 исходные значения амплитуды напряжения на шунте (CH1) и амплитуды выходного напряжения интегратора (CH2).

- Уменьшая шаг за шагом намагничивающий ток до нуля, снимите зависимость амплитуды выходного напряжения интегратора от амплитуды тока (Ток определяется как  $U_{\text{шунта}}/R_{\text{шунта}}$ ).

- Рассчитайте соответствующие значения магнитной индукции, напряжённости магнитного поля и постройте график  $B(H)$  на рис. 5.3.

- Вычислите относительную магнитную проницаемость по двум соседним в таблице значениям:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{n+1} - B_n}{H_{n+1} - H_n},$$

- где  $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость пустоты.

- На рис. 5.4. постройте график  $\mu(H)$ , относя каждое вычисленное значение  $\mu$  к среднему значению напряжённости:

$$H_{cp} = \frac{H_{n+1} + H_n}{2}.$$

- Повторите опыт, вычисления и построения для трансформаторов «ГМ11ДС» и «ГМ14ДС». При замене миниблока с трансформатором не забудьте соединить вторичную обмотку с интегратором в соответствии с рисунком на этикетке миниблока.

- Закройте окно виртуального осциллографа, нажав на кнопку  $\square$ .

- Закройте все окна и выключите ноутбук, используя кнопку «ПУСК».

- Разберите цепь.

Таблица 5.1

$I_{\text{макс}}, \text{мА}$	$U_{\text{макс}}, \text{мВ}$	$H, \text{А/м}$	$B, \text{Тл}$	$\mu$	$H_{\text{ср}}, \text{А/м}$
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					
80					
90					
100					

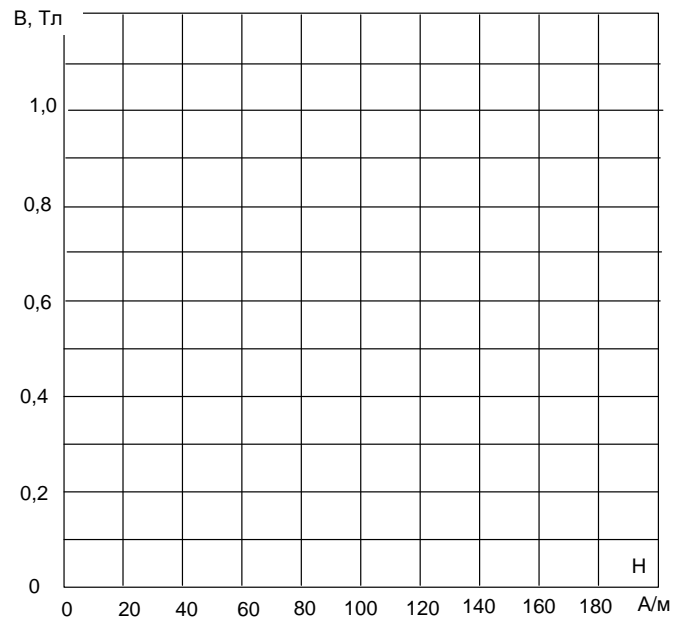


Рис. 5.3

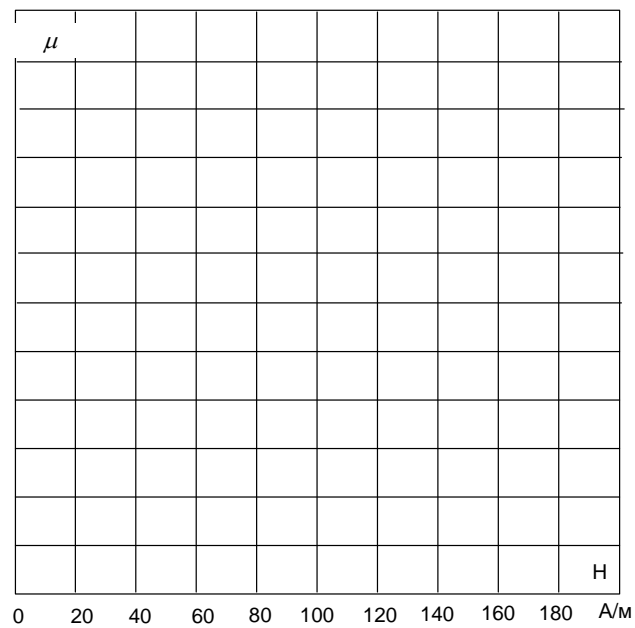


Рис. 5.4.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что характеризует магнитная проницаемость?
2. Что такое магнитный момент?
3. В чем особенность ферромагнетиков?
4. Что характеризует магнитная восприимчивость?
5. Чем диамагнетик отличается от парамагнетика?

## ***Лабораторная работа №6***

### ***Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри***

***Цель работы:*** Снять экспериментально петлю гистерезиса ферромагнетика при различных температурах, определить температуру Кюри и намагниченность насыщения.

#### ***Краткие теоретические сведения***

Физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция магнитного поля  $B$  в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме, называется магнитной проницаемостью ( $\mu$ ).

Магнитные свойства веществ определяются магнитными свойствами элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав атомов. Поскольку магнитные свойства протонов и нейтронов, конкретно это их магнитные моменты, на три порядка слабее магнитных свойств электронов, именно последние определяют магнитные свойства веществ. Именно спиновые поля электронов и магнитные поля, обусловленные их орбитальными движениями в атоме, определяют широкий спектр магнитных свойств веществ.

Слабромагнитные вещества делятся на две большие группы – парамагнетики и диамагнетики. Парамагнитные образцы при внесении во внешнее магнитное поле намагничиваются так, что их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю, а диамагнитные образцы намагничиваются против внешнего поля. Поэтому у парамагнетиков  $\mu > 1$ , а у диамагнетиков  $\mu < 1$ . Отличие  $\mu$  от единицы у пара- и диамагнетиков весьма мало. Будучи помещенными в неоднородное магнитное поле, образцы из пара- и диамагнетика, между полюсами электромагнита, ведут себя по-разному – парамагнетики втягиваются в область сильного поля, а диамагнетики выталкиваются. Пара- и диамагнетизм объясняется поведением электронных орбит во внешнем магнитном поле. Диамагнитными свойствами обладают атомы любых веществ. Однако, во многих случаях диамагнетизм атомов маскируется более сильным парамагнитным эффектом.

Вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле, называются ферромагнетиками. К группе ферромагнетиков относятся четыре химических элемента: железо, никель, кобальт, гадолиний. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Поэтому вся эта группа и получила название ферромагнетиков. Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы – на магнито-мягкие и магнито-жесткие материалы.

Магнито-мягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю. Магнито-жесткие материалы сохраняют в значительной мере свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля.

Магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетиков не является постоянной величиной; она сильно зависит от индукции  $B_0$  внешнего поля. Типичная зависимость  $\mu(B_0)$  приведена на рис. 6.1.

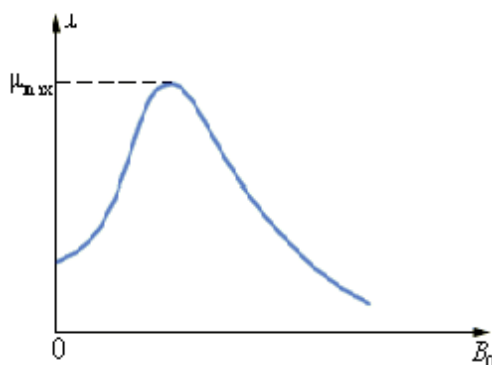


Рис. 6.1. Зависимость магнитной проницаемости  $\mu$  ферромагнетиков от индукции  $B_0$  внешнего поля

В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости. Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетике от индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля. Кривая намагничивания ферромагнетиков называется петлей гистерезиса (запаздывания) в том смысле, что при росте индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля уменьшается скорость роста суммарного поля, слагающегося из внешнего магнитного поля и созданного магнетиком в результате его намагничивания (рис. 6.2).

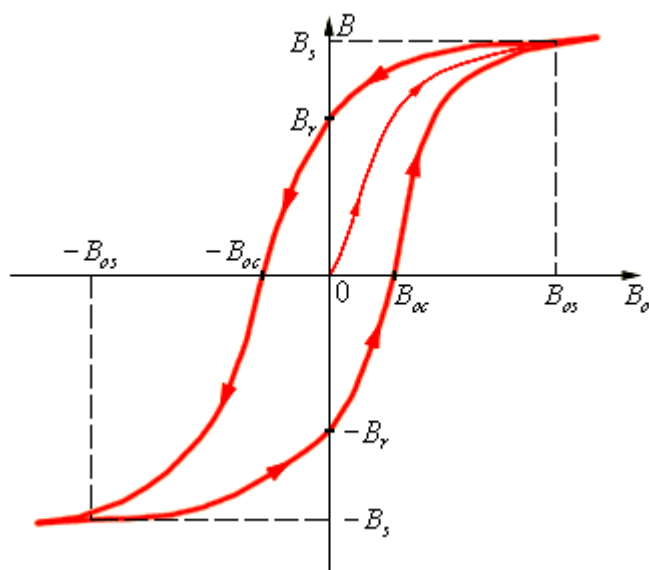


Рис. 6.2. Петля гистерезиса ферромагнетика.

При увеличении индукции внешнего поля  $B_0$  от нуля, полная индукция  $B$  поля растёт по линии первоначального намагничивания (средняя кривая) с уменьшающейся скоростью до состояния насыщения  $B_S$ , когда  $B_0 > B_{oc}$ . Здесь намагниченность образца достигает максимального значения. Если теперь уменьшать магнитную индукцию  $B_0$  внешнего поля (левая кривая) и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит остаточную намагниченность – поле внутри образца будет равно  $B_r$ . Эта остаточная намагниченность превращает образец в постоянный магнит.

Чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию  $B_0$  до значения  $-B_{oc}$ , которое принято называть коэрцитивной силой. Дальше процесс перемагничивания продолжается по стрелкам вверх.

У магнито-мягких материалов значения коэрцитивной силы  $B_{oc}$  невелико, и петля гистерезиса таких материалов узкая. Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие широкую петлю гистерезиса, относятся к магнито-жестким.

Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка  $10^{-2}$ – $10^{-4}$  см, называемые доменами. Каждый домен представляет из себя небольшой постоянный магнит.

### Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 4.2.1.

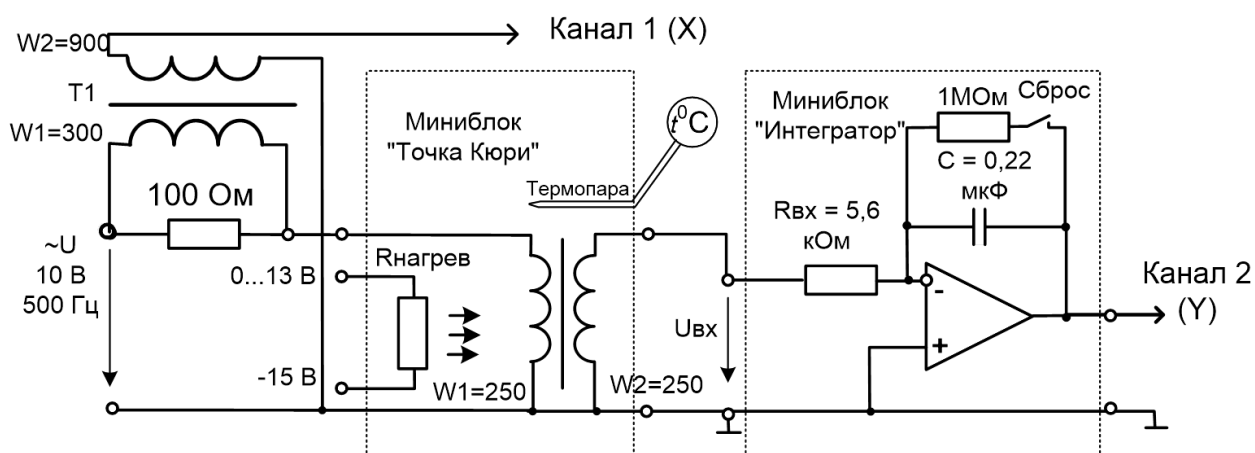


Рис. 6.3. Принципиальная схема для снятия петли гистерезиса и определения точки Кюри

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетке миниблока «Точка Кюри». На сердечнике имеются две одинаковых катушки по 250 витков. Одна из них подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. К другой катушке подключён интегратор для измерения магнитного потока.

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int u_{\text{ex}}(t) dt = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{w_2}{R_{\text{ex}} C} \Phi = \frac{w_2}{R_{\text{ex}} C} BS, \quad (6.1)$$

где  $R_{\text{ex}}$  и  $C$  – параметры интегратора,  $S$  – сечение сердечника а  $B$  – магнитная индукция.

Для исключения интегрирования постоянной составляющей входного сигнала переключатель «Сброс» интегратора должен находиться в замкнутом состоянии.

Из рассмотренного выражения магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{ex}} C}{w_2 S} u_{\text{вых}}. \quad (6.2)$$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = iw/l, \quad (6.3)$$

где  $l$  – длина средней линии сердечника.

Напряжение с шунта 100 Ом подаётся на горизонтальный вход осциллографа, а напряжение  $u_{\text{вых}}$  с выхода интегратора - на вертикальный вход. Поскольку первое пропорционально напряжённости магнитного поля, а второе - магнитной индукции, экране осциллографа отображается в определённом масштабе зависимость  $B(H)$ .

Нагревание образца осуществляется встроенным в миниблок «Точка Кюри» резистором  $R_{\text{нагр}}$ . Напряжение на нём можно регулировать от 15 до 30 В с помощью ручки управления регулируемого источника постоянного

напряжения. С увеличением напряжения увеличивается яркость свечения сигнальной лампочки, встроенной в миниблок.

Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений как показано на монтажной схеме (рис.6.4). Причём, миниблоки «Интегратор» и «Точка Кюри» устанавливается в наборную панель точно на отведённое для них место. Тогда к интегратору автоматически подводятся напряжения питания «+» и «-» 15 В, а к нагревателю миниблока «Точка Кюри» подаётся напряжение - 15В. Кроме того, вторичная катушка трансформатора, встроенного в миниблок соединяется с входом интегратора. Это существенно уменьшает количество внешних соединений.

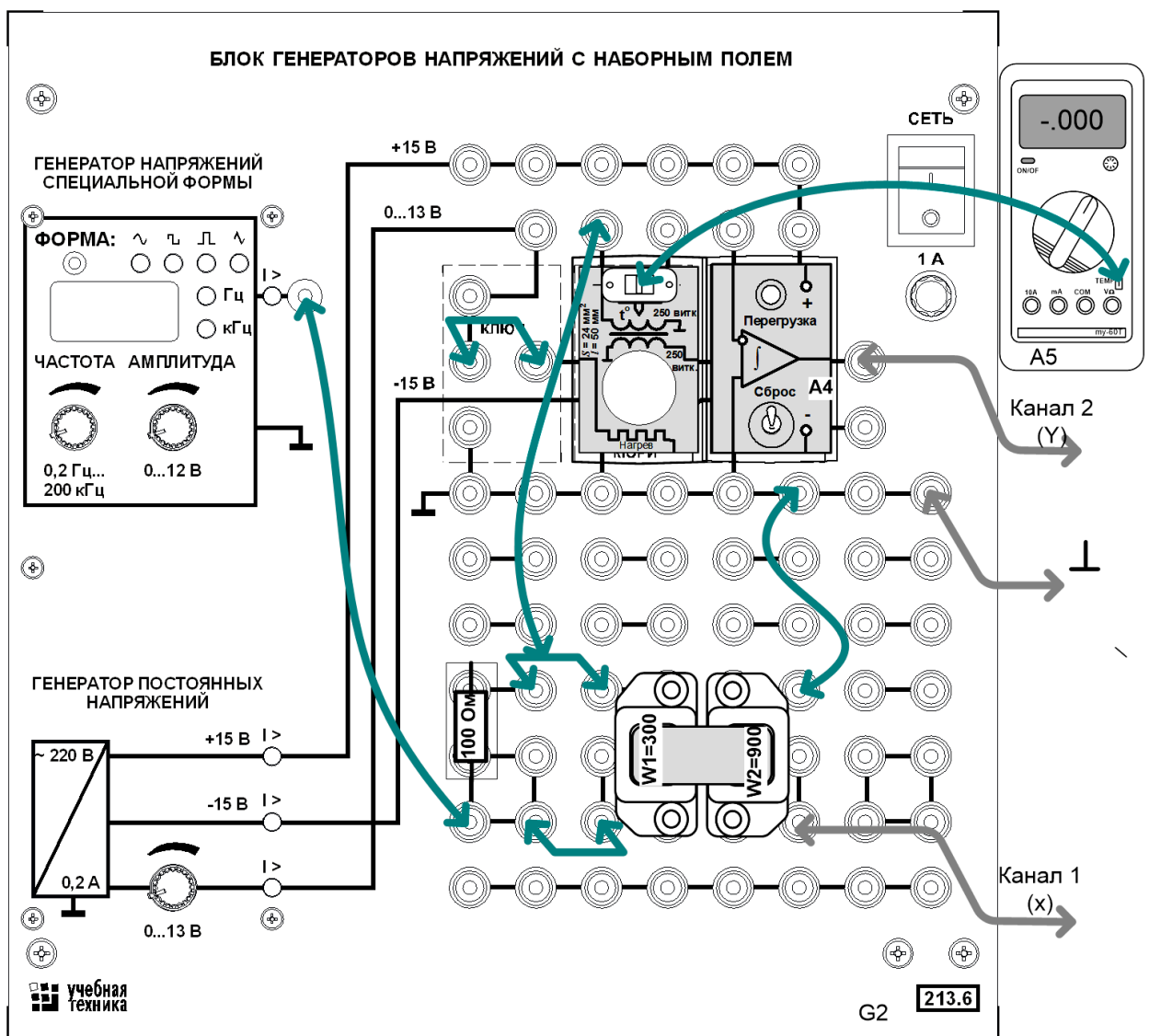


Рис. 6.4. Монтажная схема для снятия петли гистерезиса и определения точки Кюри




### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжения	213.2	$\pm 15$ В, 0...+13 В, ~0...12 В, $\perp$ 12В. 0,2 Гц...200 кГц
A4	Набор миниблоков «Электро-технические материалы»	600.18	Миниблоки: «Точка Кюри», «Интегратор», Трансформатор с разъемным сердечником, «Резистор 100 Ом»
A5	Мультиметр	1416	Цифровой мультиметр МУ60Т
	USB осциллограф	1419	
	Ноутбук	1420	

#### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 6.4). При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение  $\square 1$ . Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные штыри из комплекта аксессуаров.
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1 (218).
- Установите минимальное выходное напряжение генератора постоянных напряжений блока генераторов A1 (213.2). Для этого ручку регулирования выходного напряжения 0...15В генератора постоянного напряжения поверните против часовой стрелки до упора.
- Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 500 Гц максимальной амплитуды.

- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows и убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух сигналов: кривая изменения тока и кривая магнитного потока. Отрегулируйте развёртку так, чтобы на дисплее было 1...2 периода сигналов. Отрегулируйте чувствительность по каналам так, чтобы кривые не выходили за пределы экрана осциллографа.
- Настройте осциллограф и убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух сигналов: кривая изменения тока и кривая магнитного потока. Отрегулируйте развёртку так, чтобы на дисплее было 1...2 периода сигналов.
- Включите режим X-Y (канал 1 – X, канал 2 – Y) и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. Отрегулируйте намагничивающий ток таким образом, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области насыщения. Для этого уменьшайте ток до тех пор, пока не исчезнут однолинейные концы петли гистерезиса. При необходимости сместите изображение в центр экрана.
- Сохраните изображение петли гистерезиса в желаемом формате (пункт меню File), или перерисуйте её в отчёт.
- Включите на мультиметре режим измерения температуры и, подайте напряжение нагрева 15 В на миниблок, повернув ручку регулятора 0...15 В вправо. Убедитесь, что в миниблоке загорелась сигнальная лампочка и температура начала увеличиваться. *Скорость нагрева можно регулировать, увеличивая и уменьшая напряжение нагрева.*
- По мере нагревания миниблока сохраняйте или перерисовывайте кривую при выбранных значениях температуры.
- Дождитесь нагрева до температуры точки Кюри (примерно 110...120°C) и сразу же отключите или убавьте нагрев. Снова сохраните изображение петли гистерезиса в желаемом формате (пункт меню File), или перерисуйте её в отчёт. Запишите температуру точки Кюри.

### ***Контрольные вопросы***

1. Магнитотвердые материалы: особенности структуры и области применения.
2. Каковы условия образования ферромагнитного состояния?
3. Что характеризует дифференциальная относительная магнитная проницаемость?
4. Чем отличаются магнитомягкие и магнитотвердые материалы?
5. Что характеризует динамическая петля гистерезиса?
6. Поясните характеристики магнитного гистерезиса.
7. Как строится основная кривая намагниченности?

## Лабораторная работа №7

### Снятие начальной кривой намагничивания ферромагнитных материалов и определение магнитной проницаемости

**Цель работы:** Снять экспериментально начальную кривую намагничивания ферромагнетика, рассчитать и построить графики  $B(H)$  и  $\mu(H)$ .

#### Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 7.1.

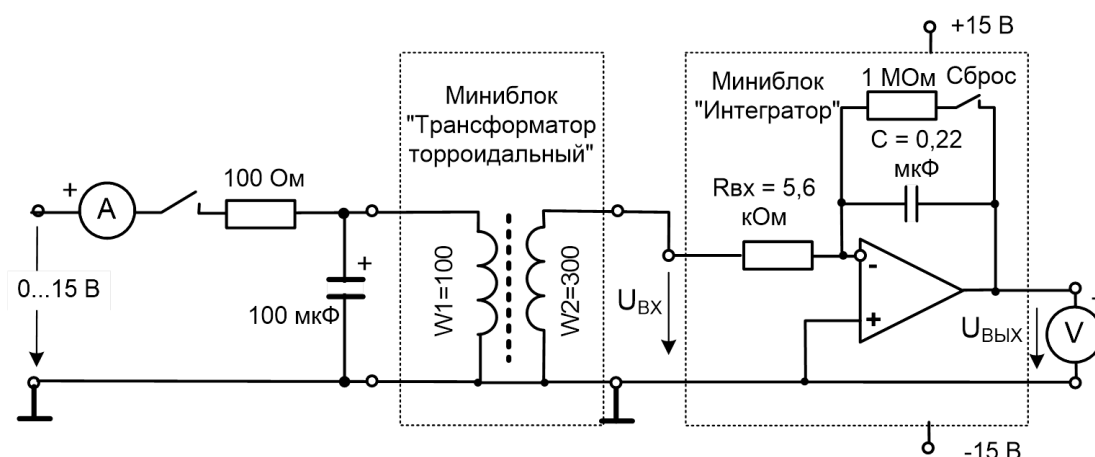


Рис. 7.1. Принципиальная схема для снятия начальной кривой намагничивания

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетках миниблока «Трансформатор тороидальный». На сердечнике имеются две катушки. Катушка  $w_1=100$  витков подключается к источнику регулируемого постоянного напряжения и служит для создания магнитного поля в сердечнике. Направление тока можно изменять тумблером на миниблоке. К другой катушке ( $w_2=300$  витков) подключён интегратор для измерения магнитного потока.

Начальная кривая намагничивания снимается путём включения катушки  $w_1$  на различные по величине постоянные токи. Ток регулируется величиной подаваемого напряжения и ограничивается резистором 100 Ом на входе. Конденсатор 100 мкФ, включённый параллельно катушке, служит для ограничения перенапряжений и создания колебательного контура при отключении цепи. При выключении цепи в катушке возникает затухающий колебательный процесс и сердечник размагничивается.

При включении цепи магнитный поток изменяется от 0 до  $+\Phi$  и в процессе этого изменения во вторичной катушке наводится ЭДС

$$e(t) = w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (7.1)$$

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{вх}} C} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt + u_{\text{вых}}(0). \quad (7.2)$$

где  $R_{\text{вх}}$  и  $C$  – параметры интегратора, а  $u_{\text{вх}}(t) = e(t)$ .

На интеграторе имеется переключатель «Сброс», с помощью которого перед началом интегрирования устанавливается  $u_{\text{вых}}(0)=0$ . Поэтому:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{вх}} C} \int_0^t w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{1}{R_{\text{вх}} C} \int_0^{+\Phi} d\Phi = \frac{w_2}{R_{\text{вх}} C} \Phi = \frac{w_2}{R_{\text{вх}} C} BS, \quad (7.3)$$

где  $S$  – сечение сердечника а  $B$  – магнитная индукция.

Отсюда магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{вх}} C}{w_2 S} u_{\text{вых}} \quad (7.4)$$

Напряжённость магнитного поля определяется по закону полного тока:

$$H = \frac{I_1 w_1}{l} \quad (7.5)$$

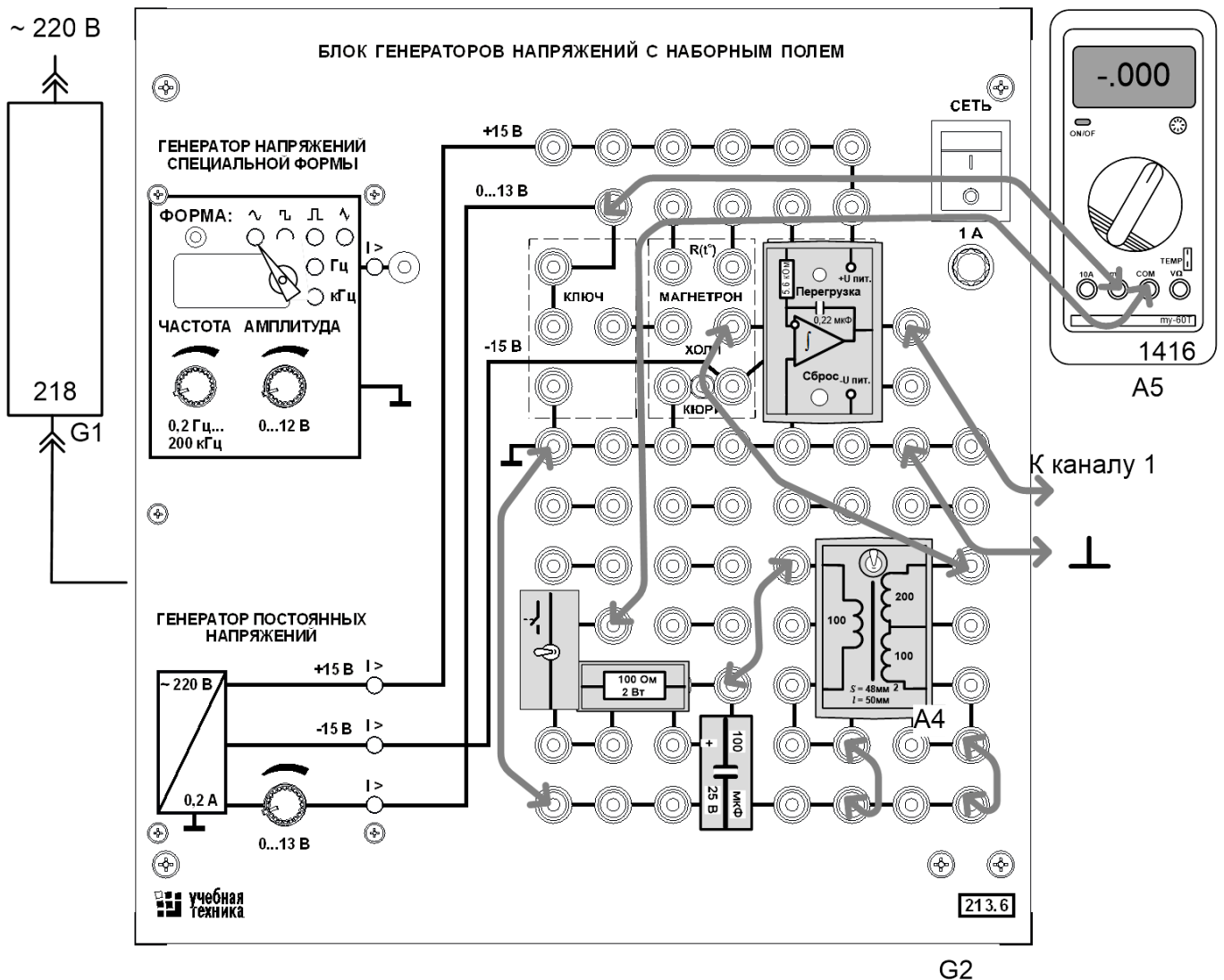
где  $l$  – длина средней линии сердечника.

Включая катушку на различные по величине токи и измеряя выходное напряжение интегратора  $u_{\text{вых}}$  и ток  $I_1$ , можно вычислить начальную кривую намагничивания  $B(H)$ .

Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений как показано на монтажной схеме (рис.7.2). Причём, миниблок «Интегратор» устанавливается в наборную панель точно на отведённое для его место. То-

гда к интегратору автоматически подводятся напряжения питания «+» и «-» 15 В.

Для измерения тока используется мультиметр, а для измерения выходного напряжения интегратора – USB осциллограф с ноутбуком.



.Рис.7.2 Монтажная схема для снятия начальной кривой намагничивания


### Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжения	213.2	$\pm 15$ В, 0...+13 В, ~0...12 В, Л 12В. 0,2 Гц...200 кГц
A4	Набор миниблоков «Электро-технические материалы»	600.18	Миниблоки: «Трансформатор тороидальный», «Интегратор», «ГМ11ДС», «ГМ14ДС», «Резистор 100 Ом», «Конденсатор 100 мкФ», «Тумблер»
A5	Мультиметр	1416	Цифровой мультиметр МУ60Т
	USB осциллограф	1419	
	Ноутбук	1420	

### Указания по проведению эксперимента

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 7.2). При подключении осциллографа аттенюаторы пробника-делителя установите в положение  $\square 1$ . Для подключения пробника-делителя к цепи используйте подпружиненные штыри из комплекта аксессуаров.
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB сначала к осциллографу а, затем, к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1 (218).

- Установите минимальное выходное напряжение генератора постоянных напряжений блока генераторов А1 (213.2). Для этого ручку регулирования выходного напряжения 0...15В генератора постоянного напряжения поверните против часовой стрелки до упора и включите генератор. Переключатель на интеграторе должен быть в положении «Сброс».

- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows. Установите развёртку по горизонтали 10 мс/дел., включите инвертирование первого канала (пункты меню: Channel – CH1 Setting – Invert Off) и переключите первый канал на «открытый вход» (с постоянной составляющей). Второй канал можете отключить.

- Включите тумблер на входе исследуемой цепи и установите первое значение тока  $I_1$ , например, 5 мА. Включая и выключая тумблер, убедитесь по осциллографу, что на выходе появляется напряжение, причём, при включении и отключении цепи возникает колебательный процесс.

- Отрегулируйте чувствительность по оси Y так, чтобы броски напряжения при включении и выключении не выходили за пределы экрана.

- При выключенном токе переведите переключатель «Сброс» в нижнее положение и сразу же включите ток тумблером на входе цепи. На выходе интегратора произойдёт бросок напряжения, который нужно сразу зафиксировать (записать, запомнить или измерить с помощью курсора и горизонтальной оси, как описано в Руководстве пользователя). В дальнейшем напряжение будет медленно меняться в ту или другую сторону вследствие интегрирования токов утечки и неточности балансировки усилителя. Для большей достоверности повторите этот опыт несколько раз и запишите в табл. среднее, либо наиболее часто повторяющееся значение выходного напряжения. Переведите тумблер в положение «Сброс»

- Установите следующее значение тока, выключите ток и повторите опыт при новом значении тока. При этом возможно понадобится изменение масштаба по оси Y.

- Постепенно увеличивайте ток намагничивания и повторяйте опыт при каждом его значении, записывая результаты в табл. 4.3.1.

- Вычислите магнитную индукцию и напряжённость магнитного поля.

- Вычислите магнитную проницаемость по двум соседним в таблице значениям:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{n+1} - B_n}{H_{n+1} - H_n},$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость пустоты.

- Постройте графики  $B(H)$  и  $\mu(H)$ , относя каждое вычисленное значение  $\mu$  к среднему значению напряжённости

$$H_{cp} = \frac{H_{n+1} + H_n}{2}.$$

Таблица 4.3.1

$I, \text{ мА}$	$U_{\text{ВЫХ}} \text{ мВ}$	$H, \text{ А/м}$	$B, \text{ Тл}$	$\mu$	$H_{cp}, \text{ А/м}$
2					
4					
6					
8					
10					
15					
20					
30					
40					
50					

### **Контрольные вопросы**

1. Что характеризует намагниченность?
2. Что такое спонтанная намагниченность?
3. Что характеризует магнитная анизотропия?
4. Из чего складываются магнитные потери?
5. Поясните, как различные факторы влияют на магнитные свойства ферромагнетиков.
6. Как классифицируются магнитомягкие материалы?



Учебное издание

**Маркарянц Лариса Михайловна  
Кирдищев Дмитрий Владимирович**

## **ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Редактор Павлютина И.П.

---

Подписано к печати 9.12.2015 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага печатная. Усл. п. л. 4,12. Тираж 200 экз. Изд. №4170

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета.  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ