

**Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Казанский государственный технологический университет»  
Нижнекамский химико-технологический институт**

## **ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ, ЭЛЕКТРОСТАТИКА**

**Методические указания  
к лабораторным работам**

**2008**

**6**

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я7

Составители: доц. Д.Б. Вафин,  
доц. А.М. Абдуллин,  
и.о.доц. М.Р. Шарипов

**Электроизмерительные приборы, электростатика:** метод. указания / Д.Б. Вафин, А.М. Абдуллин, М.Р. Шарипов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – 56 с.

Дано описание устройства и принципа работы основных электроизмерительных приборов, применяемых на лабораторном практикуме по электричеству и электромагнетизму, а так же лабораторных работ по электростатике.

Предназначено для студентов инженерно-технических специальностей.

Печатается по решению методической комиссии по циклу дисциплин общего математического и естественнонаучного профилей НХТИ.

Рецензенты: проф. С.С.Амирова  
доц. А.А.Сагдеев

© Вафин Д.Б., Абдуллин А.М.,  
Шарипов М.Р., 2008

© Казанский государственный технологический университет, 2008 г.

## ***Введение***

Электрические явления имеют огромное значение, как в жизни отдельного современного человека, так и для промышленности и техники в целом. Это связано с тем, что электрическую энергию легко передавать на большие расстояния, что позволяет использовать для выработки электрической энергии естественные запасы энергии рек, углеводородное топливо, атомную энергию, энергию ветра, солнца и др. Электрическая энергия достаточно легко и с большим коэффициентом полезного действия может быть преобразована в другие виды энергии, а затем применена для привода машин в промышленности, для химических процессов, для нагрева и освещения и т.д. Широкое применение в быту и технике получили самые разнообразные электроаппараты: холодильники, стиральные и посудомоечные машины, телевизионная и радиоаппаратура, телефон, факс, компьютеры, различные электронные автоматы .... Все примеры применения электрической энергии трудно перечислить. Во всех областях науки и техники благодаря своей исключительной точности применяются электроизмерительные приборы. Кроме этого, учение об электричестве имеет очень большое познавательное значение.

Еще в глубокой древности были известны некоторые электрические явления. Более 2500 лет назад Фалес Милетский указывал, что потертый о шерсть кусок янтаря приобретает свойство притягивать пушинки и другие легкие предметы. Термин «электричество» был введен в конце XV в. Гильбертом от греческого слова «электрон», означавшего «янтарь». Современные представления об электричестве и магнетизме были в основных чертах сформулированы более 100 лет назад величайшими представителями естествознания – М. Фарадеем и Дж. К. Максвеллом. Фарадей открыл явление электромагнитной ин-

дукции. Он высказал некоторые основополагающие качественные соображения о природе электромагнитных явлений, в частности ввел понятие электромагнитного поля. Максвелл на основе опытов Фарадея создал количественную теорию электромагнитных явлений. Теория Максвелла, основанная на его знаменитых уравнениях, и сейчас является одним из краеугольных положений естествознания. Теория Максвелла дала возможность понять широкий круг электромагнитных явлений с единой точки зрения. В частности данная теория вскрыла электромагнитную природу световых явлений, т.е. учение о закономерностях распространения видимого света, составляет часть об электричестве и магнетизме.

Учебная дисциплина «электричество» традиционно делится на три части: электростатика, электродинамика, электромагнетизм. *Электростатика* – раздел электричества, изучающий взаимодействие и свойства систем электрических зарядов, неподвижных относительно выбранной инерциальной системы отсчета. В данной работе приведены описания некоторых лабораторных работ по электростатике. Так как любые лабораторные работы по электричеству связаны с применением электроизмерительных приборов, первые две работы посвящены изучению основных характеристик таких приборов.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать правила техники безопасности и быть внимательными, так как ко всем лабораторным столам подведен переменный электрический ток с напряжением 220 В. Прежде чем приступить к выполнению лабораторной работы, следует ознакомиться с описанием работы. Монтаж экспериментальной установки в большинстве случаев должен производиться студентом самостоятельно по принципиальной или монтажной схемам. Необходимо помнить следующее:

1. Вся электрическая схема монтируется с помощью соединительных проводов. Провода должны иметь исправную электроизоляцию, а концы их защищены, так как они постоянно окисляются, вследствие чего нарушается контакт. Контакты должны быть плотными.
2. Переплетение даже изолированных проводов не допускается. Установка должна быть заземлена.
3. Источник тока подключается к установке в последнюю очередь. При разборке схемы, прежде всего, отключается источник тока.
4. Все ключи и коммутаторы при сборке цепи должны быть разомкнуты. Включать установку к электрической сети следует только после проверки установки лаборантом или преподавателем.
5. Ток включите только на время отсчетов. Не производите переключение схем, находящихся под напряжением.
6. Во избежание порчи электроизмерительных приборов сначала на приборе устанавливают максимальный диапазон измеряемой величины. После этого переходят на тот диапазон, верхний предел которого ближе к значению измеряемой величины, но в то же время больше ее.
7. Если в ходе опыта измеряемая величина увеличивается, то измерения продолжают до тех пор, пока стрелка не приблизится до конца шкалы, а затем переходят на больший диапазон. В случае уменьшения величины, измерения продолжают до тех пор, пока измеряемая величина не достигнет верхнего предела следующего меньшего диапазона, после чего переходят на этот диапазон.

**Лабораторная работа № 200**  
**ЗНАКОМСТВО С ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ**  
**ПРИБОРАМИ**

*Цель работы:* ознакомление с основными принципами работы электроизмерительных приборов.

**Краткая теория**

Имеются разные способы классификации электроизмерительных приборов. По принципу действия или физическому явлению, положенному в основу работы прибора они делятся на электромеханические, электронные, термоэлектрические и электрохимические. Четкую границу между ними провести трудно, так как имеются комбинированные устройства, использующие ряд физических явлений. Электроизмерительные приборы делятся на следующие группы: 1) приборы лабораторные и переносные, 2) регистрирующие, 3) измерительные преобразователи и усилители, 4) цифровые электроизмерительные приборы, 5) аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. В данной работе вы изучите с принципы работы электромеханических приборов, к которым относятся магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические и другие.

Электромеханические приборы состоят из подвижной и неподвижной частей. При измерениях вращающий момент подвижной части уравновешивается противодействующим моментом пружины или какого-либо устройства. При таком равновесии указатель прибора фиксирует определенный угол поворота или линейное смещение по шкале. Шкала прибора делится на определенное число отрезков - делений, иногда непосредственно соответствующее измеряемой величине  $X$ , но часто не связанное с ней. Современные приборы в большинстве случаев выполняются многопредельными и комбинированными, элек-

трические схемы которых можно переключать для изменения интервалов и рода измеряемой величины.

Для получения верных отсчетов по прибору, необходимо правильно определить цену деления прибора –  $C$ . Цена деления определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение стрелки (указателя) прибора на одно деление. Цена деления зависит от верхнего предела диапазона измерения прибора  $X_N$  и от числа делений шкалы  $N_o$ . Величина, обратная цене деления прибора, называется *чувствительностью прибора*:  $S = 1/C$ .

Например, при определенном положении переключателя верхний предел диапазона измерения амперметра, шкала которого имеет  $N_o = 150$  делений, равен  $X_N = I_N = 60$  мА. Тогда цена деления:

$$C = \frac{I_N}{N_o} = \frac{60 \text{ мА}}{150 \text{ дел}} = 0,4 \frac{\text{мА}}{\text{дел}}; \quad S = 2,5 \frac{\text{дел}}{\text{мА}}.$$

Если в процессе измерения силы тока указатель амперметра показывает  $N = 120$  делений, то значение измеряемой величины будет:

$$X = I = N \cdot C = 120 \text{ дел} \cdot 0,4 \frac{\text{мА}}{\text{дел}} = 48 \text{ мА}.$$

Пусть нам необходимо установить силу тока  $I = 56$  мА, тогда указатель должен показывать:

$$N = \frac{I}{C} = \frac{56 \text{ мА}}{0,4 \text{ мА/дел}} = 140 \text{ делений}.$$

Одной из основных характеристик электроизмерительного прибора является класс точности. *Класс точности* измерительных приборов является обобщенной характеристикой средств измерений, определяющей пределы допустимых основных и дополнительных погрешностей (в процентах), которые устанавливаются в виде приведенных  $\gamma$ , относительных  $\varepsilon$  или абсо-

лутных  $\Delta x$  погрешностей. Эти погрешности соответственно определяются по формулам:

$$\gamma = \frac{100 \cdot |\Delta x|}{X_N}; \quad \varepsilon = \frac{|\Delta x|}{X} \cdot 100; \quad \Delta x = X - X_0,$$

где  $X$  – измеренное значение величины, применяемое без учета знака;  $X_N$  – нормирующее значение измеряемой величины в заданном диапазоне;  $X_0$  – действительное значение измеряемой величины.

Из-за разнообразия измеряемых величин и средств измерений нельзя ввести единый способ выражения пределов допускаемых погрешностей и единые обозначения класса точности. Часто класс точности обозначает приведенную погрешность  $\gamma$ . При этом в качестве нормирующего значения обычно берется верхний предел диапазона измерения  $X_N$ . Иногда в качестве нормирующего значения берут номинальное значение измеряемой величины  $X_n$ , если установлено это номинальное значение. Номинальное значение устанавливается для однофазных ваттметров и варметров, фазометров и частотомеров непосредственного включения, вторичных токов трансформаторов тока.

Во многих измерительных приборах (амперметры, вольтметры, манометры и др.) класс точности означает предельно допустимую приведенную погрешность, выраженную в процентах от верхнего предела измерений. Классы точности выбираются из ряда  $(1; 2; 5) \cdot 10^n$ , где  $n$  – целое отрицательное число. Например, 0,1; 0,2; 0,5; а также 1,0; 2,0; 2,5; 4,0;

Класс 2,0 устанавливается только для счетчиков электрической энергии. Для приборов, у которых основная погрешность больше 4,0, класс не устанавливается. При нормировании по относительной погрешности обозначение класса точности заключают в кружок.

Класс точности позволяет определить предельные значения приведенной, относительной и абсолютной погрешностей, в



заданном диапазоне измерения. Предельные значения абсолютной и относительной погрешностей измерения физической величины определяются по формулам:

$$\Delta x_{np} = \gamma \cdot \frac{X_N}{100}, \quad \varepsilon = \gamma \frac{100 \cdot |\Delta x_{np}|}{X}.$$

Например, миллиамперметр класса точности  $\gamma = 0,5$  с верхним пределом измерения  $I_N = 60$  мА дает в любом месте шкалы абсолютную погрешность не больше  $\Delta x_{np} = \pm 0,5 \cdot 60 / 100 = \pm 0,3$  мА. Пусть прибор показывает  $I = 30$  мА (стрелка отклонена на половину шкалы). Тогда относительная погрешность  $\varepsilon = 100 \cdot 0,3 / 30 = 1\%$ . Таким образом, относительная погрешность по мере уменьшения отклонения стрелки увеличивается и только при значении измеряемой величины  $X = X_N$  относительная погрешность  $\varepsilon = \gamma$ . Поэтому предел измерения необходимо подобрать так, чтобы стрелка прибора отклонялась более чем на  $2/3$  шкалы.

### ***Маркировка приборов***

Электроизмерительные приборы на лицевой панели, на корпусе, у зажимов имеют условные обозначения, называемые маркировкой прибора. Маркировка прибора включает: обозначение единицы измеряемой величины (для приборов с именованной шкалой); обозначение класса точности прибора; указание номера стандарта; условное обозначение системы прибора и степени защищенности от магнитных и электрических влияний; условное обозначение частоты (если она отличается от 1000 Гц); условное обозначение рабочего положения прибора; условное обозначение испытательного напряжения изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу; товарный знак завода – поставщика; заводское обозначение прибора; год выпуска и заводской номер.

Примеры обозначения единиц измерения,  
их кратных и дольных значений

Таблица 1

|   |            |    |    |            |     |
|---|------------|----|----|------------|-----|
| 1 | Ампер      | A  | 9  | Килоом     | кΩ  |
| 2 | Миллиампер | мА | 10 | Ом         | Ω   |
| 3 | Микроампер | μA | 11 | Милливебр  | мWb |
| 4 | Вольт      | V  | 12 | Микрофарад | μF  |
| 5 | Милливольт | мВ | 13 | Пикофарад  | pF  |
| 6 | Ватт       | W  | 14 | Генри      | H   |
| 7 | Герц       | Гц | 15 | Миллигенри | мН  |
| 8 | Мегаом     | MΩ | 16 | Тесла      | T   |







Обозначение рода и характеристик измеряемых величин

Таблица 2

|   |                                   |                |    |                            |                |
|---|-----------------------------------|----------------|----|----------------------------|----------------|
| 1 | Напряжение (действующее значение) | V              | 3. | Ток (действующее значение) | I              |
| 2 | Напряжение (амплитудное значение) | V <sub>m</sub> | 4. | Ток (амплитудное значение) | I <sub>m</sub> |

Обозначение принципа действия прибора

Таблица 3

|   |  |   |
|---|--|---|
| 1 | Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой   |   |
| 2 | Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом |  |
| 3 | Электромагнитный прибор                          |  |
| 4 | Электродинамический прибор                       |  |
| 5 | Индукционный прибор                              |  |
| 6 | Электростатический прибор                        |  |

Обозначения рода тока

Таблица 4

|   |                             |        |
|---|-----------------------------|--------|
| 1 | Постоянный ток              | —      |
| 2 | Постоянный и переменный ток | —<br>~ |
| 3 | Переменный однофазный ток   | ~      |

Обозначение класса точности, положения прибора,  
прочности изоляции

Таблица 5

|   |   |            |
|---|---|------------|
| 1 | Класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения, например, 0,5 | 0,5        |
| 2 | Класс точности при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы                        | <u>0,5</u> |
| 3 | Горизонтальное положение шкалы  | ┌          |
| 4 | Вертикальное положение шкалы  | └          |
| 5 | Прочность изоляции, кВ  | ☆          |
| 6 | Осторожно! Прибор без нормы   | ⚡          |
| 7 | Соблюдать меры предосторожности по инструкции   | △<br>6     |

Обозначение зажимов

Таблица 6

|   |  |   |
|---|--|---|
| 1 | Отрицательный зажим  | — |
| 2 | Положительный зажим  | + |
| 3 | Общий зажим (для многопредельных приборов переменного тока и комбинированных приборов) | * |
| 4 | Зажим переменного тока (в комбинированных приборах)                                    | ~ |
| 5 | Генераторный зажим (для ваттметров, фазометров)  | ⊗ |
| 6 | Зажим, соединенный с корпусом  | └ |
| 7 | Зажим для заземления   | ≡ |

## Описание лабораторной установки

*Приборы и принадлежности:* электроизмерительные приборы, источник тока, резисторы, ключ, соединительные провода.

Каждый студент должен изучить принципы работы приборов, указанных преподавателем. По маркировке прибора сначала необходимо определить принцип его действия (систему), затем конспектировать приведенное ниже описание данного прибора.

### ***Приборы магнитоэлектрической системы.***

Принцип действия приборов данной системы основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с током, протекающим по обмотке легкой подвижной катушки (рамки).

Неподвижный подковообразный магнит 1 своими полюсами 2, сделанными из мягкого железа, охватывает сплошной железный сердечник 3 (рис. 1). Между сердечником и полюсами магнита имеется кольцевой зазор. На одной оси 5 с сердечником находится легкая прямоугольная рамка 4, обмотка которой изготовлена из тонкого изолированного провода. Рамка с закрепленной с ней стрелкой 7 может свободно вращаться в воздушном зазоре между сердечником и полюсами магнита.

В результате взаимодействия магнитного поля магнита с током, протекающим по рамке, возникает вращающий момент, под действием которого подвижная часть прибора поворачивается вокруг оси. Противодействующий момент создается пружинами 6, через которые подводится также ток к обмотке.

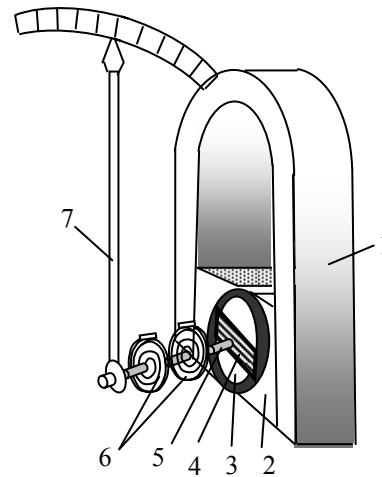


Рис. 1

Вращающий момент  $M_1 = \kappa_1 I$ , пропорциональный силе проходящего тока  $I$ , уравнивается противодействующим моментом пружин  $M_2 = \kappa_2 \alpha$ . Поэтому угол отклонения подвижной части пропорционален силе тока:

$$\alpha = \frac{\kappa_1}{\kappa_2} I = \kappa \cdot I$$

где  $\kappa = \frac{\kappa_1}{\kappa_2}$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора. Из этой зависимости видно, что магнитоэлектрические приборы имеют равномерную шкалу.

Магнитоэлектрические приборы применяются в качестве гальванометров, амперметров и вольтметров постоянного тока. Лучшие конструкции этих приборов имеют класс точности 0,2.

### ***Приборы электромагнитной системы***

Принцип работы приборов данной системы основан на взаимодействии магнитного поля тока, протекающего по обмотке неподвижной катушки и пропорциональной измеряемой величине, с подвижным железным сердечником, помещенным в это магнитное поле.

Прибор (рис. 2) состоит из прямоугольной катушки 1 с узкой щелью (просветом). Сердечник 2 изготовлен из мягкого железа и укреплен эксцентрично на оси. С осью сердечника скреплены стрелка 6, поршень воздушного успокоителя 5 и спиральные пружины 4, создающие противодействующий момент.

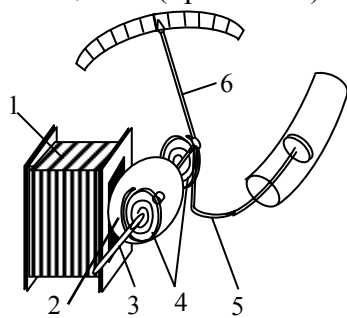


Рис. 2

Ток, протекающий по катушке 1, образует внутри нее магнитное поле, под действием которого железный сердечник, поворачиваясь вокруг

оси, втягивается в щель катушки. Создаваемый при этом вращающий момент пропорционален квадрату силы тока. При увеличении силы тока возрастает магнитная индукция в щели катушки и увеличивается намагниченность железного сердечника. Угол отклонения стрелки и сила тока в катушке находятся в квадратичной зависимости:

$$\alpha = \kappa I^2.$$

Следовательно, шкала таких приборов неравномерная. При равенстве вращающего и противодействующего момента со стороны спиральных пружин стрелка останавливается.

Выпускаются электромагнитные *амперметры* и *вольтметры* для измерений главным образом в цепях переменного тока низкой частоты. В электромагнитном амперметре катушка измерительного механизма включается последовательно в цепь измеряемого тока, в вольтметре параллельно. Электромагнитные измерительные механизмы применяют также в *логометрах*. Наиболее распространены щитовые приборы классов точности 1,5 и 2,5, хотя существуют приборы классов 0,5 и даже 0,1 с рабочей частотой до 800 Гц.

#### ***Приборы электродинамической системы.***

Принцип действия электродинамических приборов основан на взаимодействии токов, протекающих по двум рамкам (катушкам), из которых одна подвижная, а другая неподвижная. Катушка 1 состоит из двух разделенных небольшим зазором одинаковых частей, обмотки которых соединены между собой последовательно (рис. 3). В этом зазоре расположена ось 2 подвижной части прибора, с которой скреплены подвижная катушка 3, поршень воздушного успокоителя 5, стрелка 6. Противодействующий момент создается спиральными пружинками 4.

Угол отклонения стрелки пропорционален произведению сил токов в катушках 1 и 3:

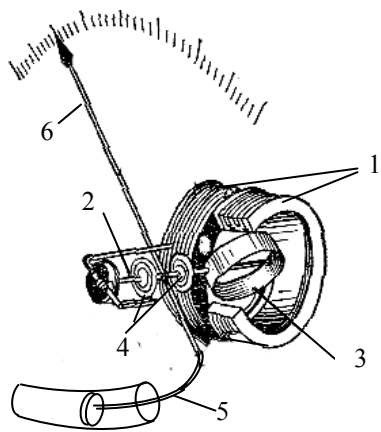


Рис. 3

$$\alpha = \kappa I_1 I_2.$$

Поэтому шкала электродинамического прибора неравномерная.

Электродинамические приборы применяются для определения действующих значений тока и напряжения в цепях переменного и постоянного тока. При последовательном соединении обмоток катушек угол поворота стрелки пропорционален квадрату измеряемой величины. Такое включение обмоток применяется

для измерения напряжения и силы тока (вольтметры и амперметры). Электродинамические измерительные механизмы используют также для измерения мощности (ваттметры). При этом через неподвижную катушку пропускают ток, пропорциональный току в цепи, а через подвижную - ток, пропорциональный напряжению в измеряемой цепи. Показания прибора пропорциональны потребляемой цепью электрической мощности.

#### **Приборы индукционной системы**

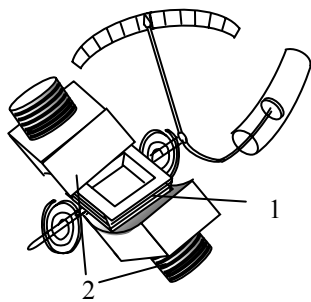


Рис. 4

Устройство приборов индукционной системы (рис. 4) основано на взаимодействии токов, индуцируемых в подвижной части прибора 1, с магнитными потоками неподвижных электромагнитов 2. К индукционной системе принадлежат, например, электрические счетчики переменного тока. Применяются также и ваттметры этой системы.

## Измерения и обработка результатов измерений

1. Ознакомьтесь со всеми приборами, находящимися на лабораторном столе. Запишите основные характеристики сначала для одного, затем для другого прибора в следующем порядке:

1) название – ...; 2) назначение – ...; 3) принцип действия (система) – ...; 4) пределы измерений – ...; 4) число делений шкалы ...; 5) класс точности....

2. Сделайте расшифровку маркировок, имеющихся на приборе: сначала нарисуйте условное обозначение, рядом расшифровку.

3. Для двух пределов измерений, указанных преподавателем, определите цену деления  $C$  и чувствительность шкалы  $S$  в заданном диапазоне измерений. Вычислите предельно допустимую абсолютную погрешность  $\Delta x_{пр}$  и результаты запишите в табл. 7.

4. Вычислите относительную погрешность при предполагаемом отклонении стрелки на  $\frac{1}{4}$  и  $\frac{3}{4}$  диапазона шкалы.

Результаты вычисления основных параметров прибора

Таблица 7

| Пределы измерений | $C$ ,<br>(ед. изм.) | $S$ ,<br>(ед. изм.) | $\Delta x_{пр}$ ,<br>(ед. изм.) | $\varepsilon_{1/4}$ | $\varepsilon_{3/4}$ |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| .....             |                     |                     |                                 |                     |                     |
| .....             |                     |                     |                                 |                     |                     |

5. Такие же действия, предусмотренные пунктами 2 – 4, выполните и для другого прибора, если это входит в задание.

6. Соберите схему, которая позволит проверить закон Ома, произведите измерения силы тока и напряжения. Вычислите сопротивление резистора и сравните его с номинальным значением. Сделайте вывод о соответствии измеренных и номинальных значений сопротивления резистора.



### Контрольные вопросы

1. С приборами, какой системы вы ознакомились? Объясните принцип работы.
2. Как подобрать верхний предел диапазона измерений для получения более точных результатов?
3. Каким должен быть луч зрения относительно шкалы при отсчете результатов?
4. Что называется приведенной и относительной погрешностью?
5. Соответствует ли предельная абсолютная погрешность  $\Delta X_{пр}$ , вычисленная по классу точности, действительной погрешности  $\Delta x$  прибора?

### Лабораторная работа № 201

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННО- ЛУЧЕВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

*Цель работы:* ознакомление с основными принципами работы электронно-лучевого осциллографа, измерение амплитудного значения напряжения и частоты переменного тока.

#### Краткая теория

*Электронно-лучевой осциллограф* (ЭЛО) – электроизмерительный прибор, предназначенный для визуального наблюдения и исследования переменных электрических сигналов. Современные осциллографы позволяют исследовать электрические сигналы в диапазоне частот до  $10^9$  Гц, а также измерять амплитуды и длительности исследуемых сигналов.

В ЭЛО переменный электрический сигнал преобразуется в видимое графическое изображение. Основной частью осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) - электровакуумный прибор, преобразующий электрические сигналы в световые. Устройство ЭЛТ схематически показано на рис. 5. Источником электронов является нагреваемый катод 1 электронной пушки, помещенной внутри управляющего электрода 2.

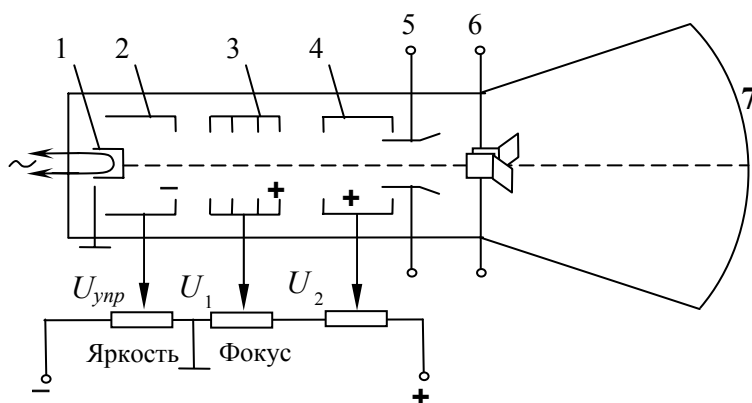


Рис. 5

Управляющий электрод позволяет изменять интенсивность электронного пучка и, следовательно, яркость свечения пятна на экране. Для этой цели на управляющий электрод подается отрицательное напряжение  $U_{упр}$  относительно катода. Электроны, прошедшие через управляющий электрод, фокусируются затем с помощью неоднородного электрического поля в узкий пучок. Неоднородное поле создается первым анодом 3, на который подается положительное напряжение  $U_1$ . Для того, чтобы электроны достигли экрана, их ускоряют при помощи второго анода 4, на который подается положительное напряжение  $U_2$ . Две пары пластин 5 и 6 служат для отклонения пучка электронов в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно. Отклонение пучка зависит от напряжения, приложенного к пластинам, и скорости электронов.

Если на вертикально отклоняющие пластины 5 подается сигнал, изменяющийся во времени, то след электронного луча на экране прочерчивает вертикальную линию. Для того чтобы след луча перемещался в горизонтальном направлении, напряжение (напряжение развертки), изменяющееся во времени, подается на горизонтально отклоняющие пластины 6.

Если на горизонтально отклоняющие пластины подается линейно нарастающее напряжение, а на вертикально отклоняющие – исследуемый сигнал, то след электронного луча прочерчивает на экране форму этого сигнала (рис.6).

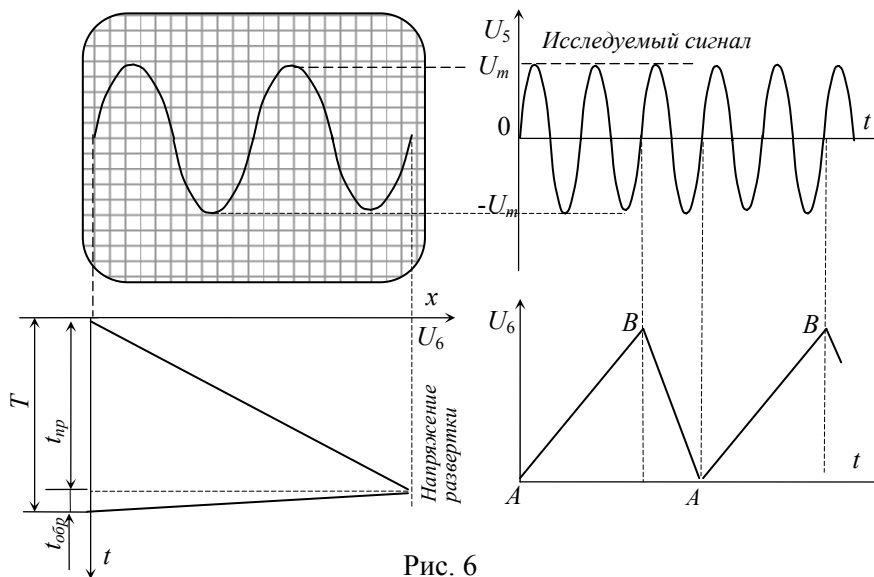


Рис. 6

При минимальном значении развертывающего напряжения  $U_6$  (точка  $A$ ), луч находится на экране осциллографа в крайнем левом положении. По мере роста напряжения от  $A$  до  $B$  луч перемещается с постоянной скоростью слева направо по горизонтальной прямой (ось времени).

Когда напряжение спадает от  $B$  до  $A'$ , луч совершает обратный путь. Период линейной развертки  $T = t_{np} + t_{обр}$ , ( $t_{обр} \ll t_{np}$ ), где  $t_{np}$  – время прямого хода электронного луча,  $t_{обр}$  – обратного хода. Обратный ход на экране не виден, так как на осциллографе имеется устройство, гасящее луч во время обратного хода. Обратный ход луча должен быть синхронизирован с периодом исследуемого сигнала так, чтобы за это время произошло один или

несколько полных колебаний. Для этого предусмотрен специальный блок. Если синхронизация нарушена, то на экране происходит наложение смещенных по фазе колебаний.

Важными характеристиками осциллографа, определяющими его эксплуатационные возможности, являются: 1) *чувствительность  $S$*  – величина отклонения луча на экране трубки в делениях шкалы при напряжении 1 В на соответствующей паре пластин; 2) *коэффициент отклонения  $C$*  (обратная величина чувствительности) - отношение напряжения входного сигнала к линейному отклонению луча, вызванному этим напряжением (В/см или В/дел); 3) *коэффициент развертки  $k$*  - отношение времени к величине отклонения луча, вызванного напряжением развертки за это время (с/см или с/дел); 4) *полоса пропускания* - диапазон частот, в пределах которого коэффициент отклонения осциллографа уменьшается не более чем на 3 деления относительно его значения на средней (опорной) частоте. Перечисленные параметры определяют амплитудный, временной и частотный диапазоны исследуемых сигналов.

Электронный луч, пройдя фокусирующую и отклоняющую системы ЭЛТ, попадает на катодолюминесцентный экран 7. Практически безынерционный электронный луч вычерчивает на экране светящуюся линию, представляющую исследуемый сигнал в виде графической функции времени. На внутреннюю поверхность экрана нередко наносится шкала для проведения необходимых измерений.

### **Описание лабораторной установки**

*Приборы и принадлежности:* электронно-лучевой осциллограф, звуковой генератор.

Установка состоит из электронного лучевого осциллографа 1 и низкочастотного звукового генератора 2 (рис. 7).

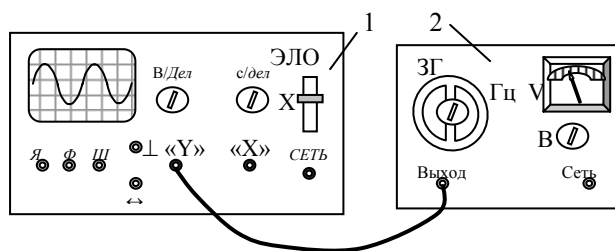


Рис. 7

Разные модели ЭЛО могут несколько отличаться друг от друга по своим параметрам, внешним оформлением, количеством и расположением органов управления. Но на всех моделях имеются следующие органы управления, которые, как правило, располагаются на лицевой панели: тумблер «Сеть» – для включения и выключения прибора в сеть;

1) тумблер «Сеть» – для включения и выключения прибора в сеть;

2) ручка «Яркость» – для установки необходимой яркости луча;

3) ручка «Фокус» – для фокусировки луча;

4) ручка «Шкала» – для регулировки освещения шкалы;

5) гнездо «Y» – для подачи сигнала на усилитель пластин вертикального отклонения луча ЭЛТ;

6) ручка переключателя «Усиление – Y» – для переключения чувствительности пластин вертикального отклонения;

7) гнездо «X» – для подачи внешнего сигнала на входной усилитель горизонтального отклонения;

8) переключатель «X» – для подключения развертывающего сигнала на пластины горизонтального отклонения;

9) ручка переключателя «Время/дел» – для измерения периода линейной развертки;

10) ручка «↑» – для перемещения луча по вертикали;

11) ручка «↔» – для перемещения луча по горизонтали.

Звуковой генератор (ЗГ) генерирует синусоидальное переменное напряжение звукового диапазона. На лицевой панели ЗГ

обычно имеются ручки регулирования частоты выходного сигнала и его амплитуды, тумблер «Сеть» и гнездо «Выход». из Гнездо «Выход» ЗГ соответствующим кабелем необходимо соединить со входом «У» ЭЛО.

### **Измерения и обработка результатов измерений**

1. Ознакомьтесь с инструкцией по эксплуатации электронного осциллографа.

2. Включите ЭЛО в сеть и настройте согласно инструкции.

3. Определите минимальный коэффициент вертикального отклонения луча  $C$  (максимальную чувствительность  $S$ ).

4. На ЗГ установите первое значение заданной преподавателем частоты синусоидального сигнала. Установите заданное преподавателем напряжение выходного сигнала звукового генератора ЗГ и, регулируя соответствующие ручки ЭЛО, получите на экране устойчивое изображение сигнала.

5. Определите частоту сигнала. Для этого по горизонтальной оси координатной сетки на экране ЭЛО измерьте период сигнала в делениях шкалы. Вычислите период сигнала (в секундах) по формуле:

$$T = k \cdot N ,$$

где  $k$  – коэффициент развертки (длительность метки времени), определяется по положению ручки «Развертка» на лицевой панели ЭЛО;  $N$  - период сигнала в делениях шкалы.

Вычислите частоту сигнала  $\nu = 1/T$ . Результаты измерений занесите в табл. 8. Повторите измерения и вычисления для других частот исследуемого сигнала. Отметьте характер отклонения показаний ЗГ от измеренных значений частот.

5. Вычислите амплитуду синусоидального сигнала. Для этого при определенной частоте исследуемого сигнала с помощью ручки регулирования напряжения выходного сигнала ЗГ установите первое из заданных преподавателем действующее напряжение сигнала. Измерьте амплитуду сигнала  $A$  по вертикальной

оси экрана ЭЛТ в делениях шкалы  $N$ . Определите коэффициент отклонения  $C$  по положению ручки переключателя «Усиление – Y» и вычислите амплитуду сигнала по формуле:

$$U_m = C N .$$

Результаты определения частоты исследуемого сигнала

Таблица 8

| № п/п | $k$ ,<br>«Время/дел» | $N$ ,<br>деления | $T$ , с | $\nu$ , Гц | Частота по<br>ЗГ, Гц |
|-------|----------------------|------------------|---------|------------|----------------------|
| 1     |                      |                  |         |            |                      |
| 2     |                      |                  |         |            |                      |
| 3     |                      |                  |         |            |                      |

6. Результаты сравните с показанием вольтметра звукового генератора. Показание генератора соответствует эффективному значению напряжения  $U_{эф}$ , связанного с амплитудой напряжения  $U_m$  по соотношению:

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U_{эф} .$$

Результаты измерений занесите в табл. 9. Повторите измерения для других значений выходного напряжения.

Результаты определения амплитуды напряжения

Таблица 9

| № п/п | Амплитуда сигнала в делениях шкалы $A$ , дел | Коэффициент отклонения $C$ , В/дел | Амплитуда напряжения $U_m$ , В | Показания ЗГ $U_{эф}$ , В |
|-------|--|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1     |  |                                    |                                |                           |
| 2     |  |                                    |                                |                           |
| 3     |  |                                    |                                |                           |

7. Сделайте вывод о соответствии результатов измерений с показаниями звукового генератора.

## Контрольные вопросы

1. Покажите на панели осциллографа основные органы управления.
2. Объясните принцип получения развернутого изображения исследуемого сигнала.
3. Что такое чувствительность ЭЛТ?
4. Как измерить амплитуду и частоту сигнала?
5. Какие параметры осциллографа определяют его эксплуатационные возможности?
6. Каково предназначение вертикально отклоняющих пластин осциллографа? Какое гнездо на лицевой панели ЭЛО соответствует этим пластинам?

## Лабораторная работа № 211

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

*Цель работы:* изучение основных понятий электростатики, исследование электростатического поля между двумя параллельными пластинками.

#### Краткая теория

Любое электрически заряженное тело создает в окружающем пространстве электрическое поле, посредством которого взаимодействует с другими заряженными телами. Электрическое поле покоящихся относительно инерциальной системы отсчета и неизменных во времени зарядов называется электростатическим.

Французский физик Ш. Кулон в 1785 г. установил закон взаимодействия между двумя точечными неподвижными зарядами  $q_1$  и  $q_2$  (рис.8): сила взаимодействия двух точечных зарядов прямо пропорциональна произведению этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.



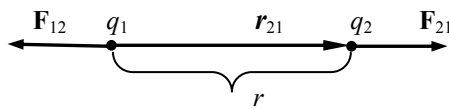


Рис. 8

$$F_o = k_o \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где  $k_o = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц. В системе

СИ коэффициент  $k_o$  иногда выражают в другом виде:

$$k_o = \frac{1}{4\pi\epsilon_o}, \text{ где } \epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \text{ – электрическая постоянная.}$$

Для сил электростатического взаимодействия справедлив третий закон Ньютона:  $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$ .

Отношение силы взаимодействия между двумя зарядами в вакууме  $F_o$  к силе взаимодействия между ними в среде  $F$  называется диэлектрической проницаемостью среды:  $\epsilon = F_o / F$ . Причем  $\epsilon \geq 1$ . Закон Кулона в среде в алгебраической форме запишется в виде:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_o \epsilon} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}.$$

Если заряды взять со своими знаками, силы отталкивания будут положительными, силы притягивания – отрицательными.

Основной силовой характеристикой электростатического поля является *напряженность электрического поля* – это векторная величина, равная силе, действующей на единичный, положительный точечный заряд, помещенный в исследуемую точку поля:

$$\mathbf{E} = \mathbf{F} / q_o.$$

Отсюда, *электростатическая сила*, действующая на *пробный* заряд  $q_o$ :  $\mathbf{F} = q_o \mathbf{E}$ . Единица измерения напряженности:

$$[E] = [F] / [q] = \text{Н/Кл}.$$

Если в законе Кулона подставить  $q = q_1$  и  $q_2 = q_o$ , то из определения получим формулу для напряженности поля точечного заряда:

$$E = \frac{k_o}{\epsilon} \frac{q}{r^2}.$$

Графически электростатическое поле изображается с помощью *силовых линий напряженности  $\mathbf{E}$* . Это кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности  $\mathbf{E}$  в данной точке поля (рис. 9). По густоте силовых линий можно судить о величине напряженности поля. Силовые линии проводят так, чтобы их количество, пронизывающее единичную площадку, перпендикулярную к ним, равнялось напряженности поля в данном месте:

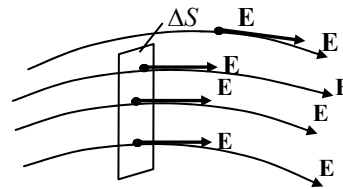


Рис. 9

где  $\Delta N$  – число силовых линий, пронизывающих  $\Delta S$ .

$$E = \Delta N / \Delta S,$$

где  $\Delta N$  – число силовых линий, пронизывающих  $\Delta S$ .

Силовые линии напряженности электростатического поля начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Через каждую точку силового поля проходит только одна силовая линия, т.е. силовые линии не пересекаются и не имеют разрывов.

Опыт показывает, что к кулоновским силам применим принцип независимости действия сил, т.е. результирующая напряженность поля от системы точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей отдельных зарядов:

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^N \mathbf{E}_i .$$

Данное уравнение выражает *принцип суперпозиции электрических полей*. Результирующее поле получается как наложение полей отдельных зарядов.

Можно показать, что работа перемещения пробного заряда  $q_0$  в электростатическом поле не зависит от формы траектории перемещения, а зависит лишь от положений начальной и конечной точек перемещения. Следовательно, электростатическое поле является *потенциальным*, силы электростатического взаимодействия – *консервативными*.

Тело, находящееся в потенциальном поле сил, обладает потенциальной энергией взаимодействия. Поэтому работу сил

электростатического поля по перемещению заряда  $q_0$  можно представить как изменение потенциальной энергии заряда при перемещении его из точки 1 в точку 2:

$$A_{1-2} = W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2},$$

где  $W_{\Pi 1} = W_{\Pi 1}(r_1)$ ,  $W_{\Pi 2} = W_{\Pi 2}(r_2)$ , – потенциальная энергия заряда  $q_0$  в точке 1 и в точке 2 соответственно. Например, работа перемещения заряда  $q_0$  в поле другого точечного заряда  $q$ :

$$A_{1-2} = W_{\Pi 1} - W_{\Pi 2} = \frac{k_0 q q_0}{\epsilon r_1} - \frac{k_0 q q_0}{\epsilon r_2}.$$

По данной формуле можно определить лишь изменение потенциальной энергии. Для однозначного определения потенциальной энергии, в какой-то точке ее необходимо считать равной нулю. Пусть потенциальная энергия равна нулю в бесконечно удаленной точке, т.е.

$$W_{\Pi}(r_2) = 0, \text{ при } r_2 = \infty.$$

Тогда,

$$W_{\Pi 1}(r_1) = \frac{k_0 q q_0}{\epsilon r_1} - \frac{k_0 q q_0}{\epsilon \infty} = \frac{k_0 q q_0}{\epsilon r_1}.$$

Так как точка 1 произвольная, то потенциальная энергия взаимодействия точечных зарядов  $q$  и  $q_0$  находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга:

$$W_{\Pi}(r) = \frac{k_0 q q_0}{\epsilon r}.$$

Отношение  $\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q_0} = \frac{k_0 q}{\epsilon r}$  не зависит от величины

$q_0$ , а является лишь характеристикой поля заряда  $q$  и называется потенциалом электростатического поля.

*Потенциал электростатического поля* – энергетическая характеристика поля, численно равняется потенциальной энергии единичного, положительного точечного заряда, помещенного в рассматриваемую точку поля:

$$\varphi = \frac{W_{\Pi}}{q_0}.$$

Единица измерения потенциала:  $[\varphi] = [W]/[q] = \text{Дж/Кл} = \text{В}$  (Вольт).

Из определения потенциала следует, что  $W_{\text{п}} = q_o \varphi$ . Тогда работу перемещения заряда  $q_o$  из точки 1 в точку 2 можно представить в виде:

$$A_{1-2} = q_o (\varphi_1 - \varphi_2).$$

С другой стороны,  $A_{1-2} = \int_1^2 dA = q_o \int_1^2 E \cos \alpha dl$ . Отсюда

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E \cos \alpha dl.$$

Здесь интегрирование можно производить вдоль любой линии, соединяющей начальную и конечную точки, так как работа сил электростатического поля не зависит от траектории перемещения. Таким образом, разность потенциалов между двумя точками равняется работе перемещения единичного положительного точечного заряда между этими точками.

Когда поле образовано несколькими зарядами, потенциал его в данной точке равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых каждым зарядом в отдельности:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i}.$$

Совокупность точек, имеющих равный потенциал, образует *эквипотенциальную поверхность*.

Пусть пробный заряд  $q_o$  совершает элементарное перемещение  $d\mathbf{l}$  из точки 1 в точку 2 (рис. 10). Работа перемещения в электростатическом поле:

$$dA = F \cos \alpha dl = q_o \cos \alpha dl.$$

Поскольку  $dl_o = dl \cos \alpha$  – проекция  $d\mathbf{l}$  на направление напряженности  $\mathbf{E}$ , то

$$dA = q_o E dl_o$$

С другой стороны,

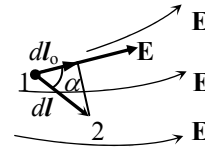


Рис. 10

$$dA = q_o(\varphi_1 - \varphi_2) = -q_o d\varphi, \text{ где } d\varphi = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Отсюда 
$$E = -\frac{d\varphi}{dl_o}.$$

Можно записать

$$d\varphi = -E dl_o = -E \cos\alpha dl.$$

$d\varphi = \max$  при  $\cos\alpha = 1$ , т.е. при  $dl = dl_o$ . Таким образом, это будет перемещение вдоль силовых линий напряженности, и в этом случае потенциал убывает наиболее быстро.

Вектор, определяемый как производная от потенциала по направлению  $l_o$

$$\mathbf{grad}\varphi = \frac{d\varphi}{dl_o},$$

называется *градиентом потенциала*. Это вектор, направленный в сторону наибольшего увеличения потенциала и численно равный изменению потенциала на единичном отрезке в данном направлении:

$$\mathbf{grad}\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \mathbf{k}.$$

Таким образом,

$$\mathbf{E} = -\mathbf{grad}\varphi.$$

Напряженность электростатического поля равна градиенту потенциала, но направлена в противоположную сторону. Знак «-» показывает, что вектор  $\mathbf{E}$  направлен в сторону убывания потенциала. Из данной формулы вытекает более распространенная единица измерения напряженности поля:  $[E] = \text{В/м}$ .

Если  $dl \perp \mathbf{E}$ , то  $\cos\alpha = 0$ . Отсюда  $dA = -q_o d\varphi = 0$ , т.е.  $d\varphi = 0$ . Таким образом, при перемещении перпендикулярно к силовым линиям потенциал не меняется. Это означает, что перемещение происходит по эквипотенциальной поверхности. Значит, силовые линии и эквипотенциальные поверхности взаимно перпендикулярны.

Изучение электростатического поля представляет ряд трудностей, связанных с применением электрометра. Поэтому часто электрическое поле заряженных проводников заменяют стацио-

нарным электрическим полем тока, в котором происходит непрерывное перемещение зарядов среды. Электрическое поле стационарного тока в слабопроводящей жидкости является потенциальным, что позволяет использовать его для моделирования электростатического поля заряженных тел в вакууме.

Плотность тока  $\mathbf{j}$  в электролите определяется дифференциальным законом Ома:

$$\mathbf{j} = \gamma \mathbf{E} = -\gamma \mathbf{grad} \varphi,$$

где  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость среды. Таким образом, плотность тока в электролите и напряженность поля в вакууме описываются подобными дифференциальными уравнениями. Поэтому силовым линиям в электростатическом поле будут соответствовать линии тока в электролите, а поверхностям равного потенциала – поверхности равных напряжений. Напряжение в различных точках поля можно измерить вольтметром, мостовым или компенсационным методом. Замена электростатического поля эквивалентным по конфигурации стационарным электрическим полем удобна тем, что позволяет использовать токоизмерительную аппаратуру вместо электростатической, что значительно упрощает эксперимент.

Для исследования распределения потенциала в стационарных электрических полях тока используются зонды (щупы), вводимые внутрь поля. Зондом является тонкий металлический стержень, хорошо изолированный по всей длине, кроме конца. Измерения в электрической ванне лучше всего производить, используя для питания источник переменного тока, так как при работе с постоянным током происходит поляризация электролита, уменьшающая ток через электролит и изменяющая распределение потенциалов. Если частота переменного тока достаточно низка (звуковая частота), то можно пренебречь влиянием токов смещения и соотношение для плотности тока  $\mathbf{j}$  остается в силе.

## Описание лабораторной установки

*Приборы и принадлежности:* специальная установка – ванна с водой для моделирования электростатического поля, реостат, гальванометр и провода с металлическим щупом, вольтметр переменного напряжения, набор металлических электродов разной конфигурации.

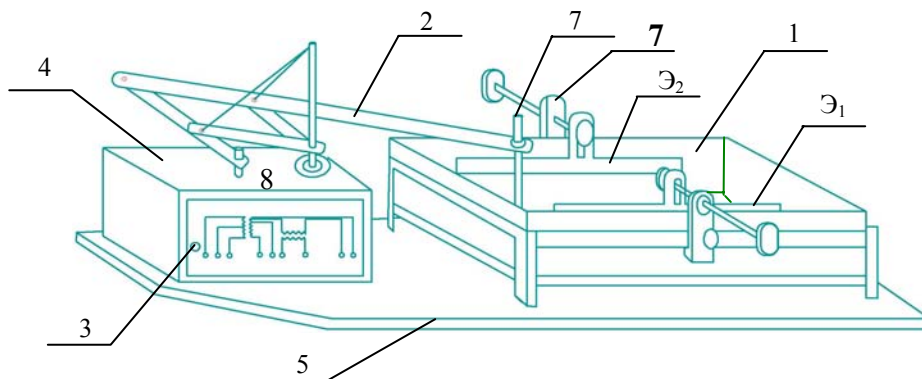


Рис. 11

Установка (рис. 11) состоит из электролитической ванны 1, пантографа 2, пульта 3 и стола 4, смонтированных на деревянном основании 5. Вдоль стенок ванны перемещаются приспособления 6 для крепления сменных электродов  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ . Приспособления позволяют перемещать электроды вдоль и поперек ванны.

Пантограф закреплен на столе и на одном конце имеет зонд 7, на другом – карандаш 8. Стол оборудован прижимом, с помощью которого закрепляют лист бумаги. На лицевой стороне имеется панель, на которой нанесена принципиальная электрическая схема прибора и расположены клеммы для подсоединения концов монтажных проводов, тумблеры.

Электролитическая ванна заполняется водой, в которую погружают электроды  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ . Дно ванны должно быть горизонтальным, а электроды – вертикальными. Снизу электроды долж-

ны соприкоснуться с дном, а сверху – несколько выступать над водой. Установка ванны производится по уровню с помощью установочных винтов.

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 12.

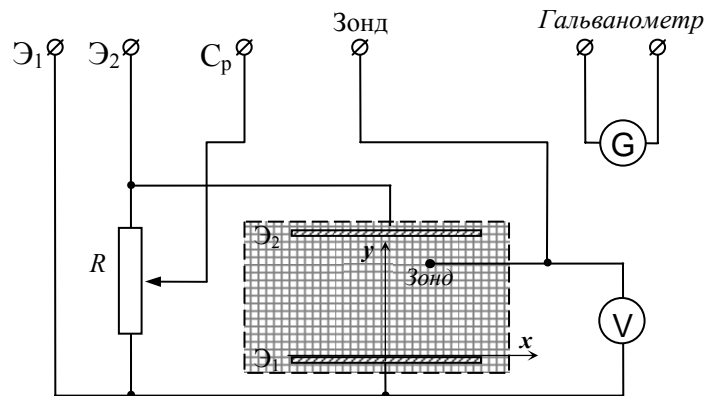


Рис. 12

Напряжение питания через понижающий трансформатор подается на электроды  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$ . Измерение электрических потенциалов в разных точках между электродами производится введением зонда (щупа) – тонкой металлической проволоки, соединенной с измерительной аппаратурой.

Изменяя потенциал зонда с помощью реостата  $R$ , образующем электрическую схему равновесного моста Уитстона, можно добиться, чтобы протекающий через него ток стал равен нулю. Потенциал зонда равен в этом случае потенциалу, который имелся в исследуемой точке поля до введения зонда. Равенство потенциалов зонда и электрического поля устанавливается с помощью гальванометра  $G$ , подключенного через выпрямляющую схему в равновесное плечо моста. Наличие выпрямляющей схемы позволяет использовать гальванометр постоянного тока вместо более сложного чувствительного индикатора нуля переменного напряжения. Разность потенциалов между



электродами  $\mathcal{E}_1$  и зондом измеряется с помощью вольтметра  $V$ . Передвигая зонд таким образом, чтобы стрелка гальванометра все время занимала нулевое положение, можно найти геометрическое место точек равного потенциала. Пантограф (прибор для копирования) позволяет нанести эквипотенциальные линии на листе бумаги, закрепленной на столе 4.

### **Измерения и обработка результатов измерений**

**Упражнение 1.** Исследование электростатического поля между параллельными пластинками.

На приспособлениях электрической ванны закрепите плоские электроды. Установите электроды от нулевой линии на расстоянии 5-12 см (по заданию преподавателя).

1. Согласно рис. 12 соберите схему. Переключатель чувствительности гальванометра на панели должен находиться в положении “Грубо”.

2. На столе 4 закрепите чистый лист бумаги (если работа выполняется вдвоем, то следует поставить сразу два листа). С помощью пантографа на листе бумаги отметьте положение электродов  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  (отметьте края обеих пластинок, после их соединения прямой линией получатся изображения пластинок). Зонд установите на расстоянии 2 см от левого края электрода  $\mathcal{E}_1$ .

3. Включите установку. Зафиксируйте первоначальный потенциал в той точке поля, где находится зонд. Для чего с помощью реостата установите гальванометр на нулевую отметку. Тогда потенциал зонда сравняется с потенциалом поля. Отметьте положение зонда на листе бумаги.

4. Перемещая зонд (примерно вдоль оси  $x$ ), через каждые 2-4 см найдите точки, потенциалы которых равняются потенциалу исходной точки. Следует отмечать положения этих точек на бумаге только после полного установления стрелки гальванометра на нулевую отметку. Через полученные точки проведите плав-

ную кривую. Эта кривая является изображением эквипотенциальной поверхности.

5. Аналогичным образом через каждые 2 см (вдоль оси Y) получите серии точек равного потенциала. Такие измерения проведите до электрода Э<sub>2</sub>. Постройте изображения не менее пяти эквипотенциальных поверхностей. Сами электроды также являются эквипотенциальными поверхностями.

6. Начиная от одной пластинки до другой изобразите вид ряда силовых линий. Сделайте вывод о картине электрического поля между параллельными заряженными плоскостями. В нескольких точках поля покажите направление векторов  $E$ ,  $j$  и  $grad \varphi$  (по заданию преподавателя).

**Упражнение 2.** Определение напряженности электростатического поля и плотности зарядов на электродах.

Теоретическая формула для напряженности поля между разноимёнными и однородно заряженными бесконечными параллельными плоскостями имеет вид:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S},$$

где  $\sigma = q/S$  - поверхностная плотность зарядов, т.е. количества заряда, приходящееся на единицу площади поверхности;  $q$  – количество заряда на одной из пластин;  $S$  – площадь поверхности пластины;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м- электрическая постоянная,  $\varepsilon = 81$  - относительная диэлектрическая проницаемость химически чистой воды, являющейся неплохим изолятором. С другой стороны

$$E = \frac{U}{y},$$

где  $U$  и  $y$  – разность потенциалов между зондом и одним из электродов и расстояние между ними. Из этих формул находим поверхностную плотность зарядов на электродах:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U}{y}.$$

1. Убедитесь, что электронный вольтметр подключен к гнездам «Э<sub>1</sub>» и «Зонд» на передней панели установки. Переключатель рода измерений необходимо поставить в положение «~U», а предел измерений на «10 В».

2. При помощи вольтметра произведите измерения разности потенциалов между электродом Э<sub>1</sub> и зондом при разных его положениях вдоль оси  $y$  через каждые 2 см начиная с  $y = 2$  см.. При этом каждый раз необходимо устанавливать стрелку гальванометра в нулевое положение и только после этого снимать показания вольтметра. Результаты занесите в табл. 10. Сделайте еще две серии таких же измерений, перемещая зонд у левого и правого края поля (на расстоянии 2 – 4 см от краев пластинок).

Результаты измерения напряжения между электродом и зондом в зависимости от расстояния между ними

Таблица 10

| $y, \text{ м}$<br>№ п/п | 0 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 |
|-------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1                       | × |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2                       | × |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 3                       | × |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $\bar{U}, \text{ В}$    |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $\bar{U}_o, \text{ В}$  |   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

3. Вычислите средние значения напряжений  $\bar{U}$ . Результаты занесите в табл. 10.

4. Непосредственно около электродов наблюдается скачок потенциала  $U_o$ , связанный падением напряжения на окисленных поверхностях, а также на соединениях проводников и поляризацией воды. Действительная разность потенциалов между пристеночным слоем воды и зондом определяется по формуле:

$$U_o = U_i - U_o.$$

Для нахождения  $U_o$  постройте график зависимости  $\bar{U} = f(y)$  и продолжайте сглаживающую кривую (прямую) до пересечения с осью напряжений (осью ординат). По точке пересечения графика с вертикальной осью напряжений определите  $U_o$  и занесите в табл. 10.

5. Для заданного преподавателем значения расстояния  $y$  вычислите три значения значение  $U_{\partial i} = U_i - U_o$ , где  $U_i$  – напряжение при определенной серии измерений для заданного значения  $y$ . Затем вычислите среднее значение действительной разности потенциалов:  $\bar{U}_\partial = \sum_{i=1}^3 U_{\partial i}$

6. Вычислите поверхностную плотность зарядов на пластинках:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_o \varepsilon \bar{U}_\partial}{y}$$

7. Для трех разных пар расстояний  $y_i, y_j$  вычислите напряженность электростатического поля по формуле:

$$E = \frac{U_j - U_i}{y_j - y_i}.$$

Сравните, намного ли они отличаются друг от друга.

8. Найдите стандартный доверительный интервал для разности потенциалов  $\bar{U}_\partial$ :

$$\bar{S}_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{\partial i}^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{U}_\partial - U_{\partial i})^2}{n(n-1)}},$$

где  $n$  – число измерений ( $n = 3$ ).

9. Вычислите доверительный интервал для  $\bar{U}_\partial$ :

$$\Delta \bar{U}_\partial = t(\alpha, n) \cdot \bar{S}_u,$$

где  $t(\alpha, n)$  – коэффициент Стьюдента.

10. Определите относительную ошибку вычисления средней плотности зарядов на электродах:

$$\varepsilon_{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \bar{U}_{\delta}}{\bar{U}_{\delta}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \bar{y}}{y}\right)^2},$$

где  $\Delta \bar{y}$  - ошибка в определении расстояния  $y$  (взять половину цены деления шкалы).

11. Определите границы доверительного интервала результата:  $\Delta \bar{\sigma} = \varepsilon_{\sigma} \bar{\sigma}$ .

### Контрольные вопросы

1. Когда металлическая пластинка будет иметь отрицательный заряд, а когда – положительный?
2. Сформулируйте закон Кулона. В чем измеряется электрический заряд?
3. Когда электрическое поле называется электростатическим?
4. Что называется напряженностью и потенциалом электростатического поля?
5. Дайте определение силовых линий напряженности  $E$ . Как по силовым линиям можно определить численное значение напряженности электростатического поля?
6. Какая связь между потенциалом и напряженностью, силовыми линиями и эквипотенциальными поверхностями электростатического поля?
7. Какой физический смысл разности потенциалов между двумя точками поля?
8. В чем заключается возможность моделирования электростатического поля?

## Лабораторная работа № 212

### ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА С ПОМОЩЬЮ МОСТИКОВОЙ СХЕМЫ

*Цель работы:* изучение метода измерения электроемкости, измерение емкости отдельных и соединенных в батарею конденсаторов.

#### Краткая теория

На практике для кратковременного накопления значительных зарядов при малых размерах и небольших потенциалах используются устройства, называемые конденсатором.

*Конденсатором* называется система из двух проводников (обкладок), разделенных тонким слоем диэлектрика, (рис. 13). Общая электроемкость такой системы проводников намного больше электроемкости каждого из них по отношению к другим проводникам или по отношению к Земле.

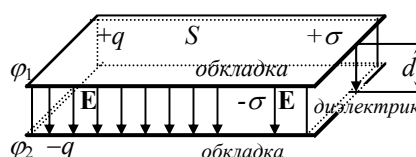


Рис. 13

Если к заряженному проводнику приближать другие тела, то на них возникают индуцированные (на проводнике) или связанные (на диэлектрике) заряды, причем ближайшими к наводящему заряду  $q$  будут заряды противоположного знака. Эти заряды ослабляют поле, создаваемое зарядом  $q$ , т.е. понижают потенциал проводника, что приводит к повышению его электроемкости.

В зависимости от формы обкладок конденсаторы делятся на плоские (рис. 13), цилиндрические и сферические.

Так как электростатическое поле сосредоточено между обкладками, то силовые линии напряженности начинаются на положительной обкладке и заканчиваются на отрицательной обкладке. Поэтому свободные заряды, возникающие на разных обкладках, являются равными по модулю и разноименными по знаку.

Под электроемкостью конденсатора, или *взаимной емкостью* понимается физическая величина, численно равная заряду, который необходимо сообщить одному из проводников, чтобы разность потенциалов между ними увеличить на один вольт:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} .$$

Единица измерения электроемкости

$$[C] = \frac{[q]}{[\varphi]} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф (фарад)} .$$

1Ф – электроемкость такого уединенного проводника, потенциал которого изменяется на 1В при сообщении ему заряда в 1 Кл.

Рассмотрим электроемкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью  $S$  каждая. Если расстояние  $d$  между пластинами мало по сравнению с их линейными размерами, то краевыми эффектами можно пренебречь и поле между обкладками считать однородным. Его можно рассчитать, используя формулы для двух бесконечных плоскостей:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = E d = \frac{\sigma \cdot d}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{q \cdot d}{\varepsilon_0 \varepsilon S} ,$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между обкладками. Тогда, электроемкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S}{d} .$$

Под действием электрического поля обкладок происходит поляризация диэлектрика. В результате этого у положительной обкладки на поверхности диэлектрика оказываются избыточные отрицательные связанные заряды, а у отрицательной обкладки – положительные. Противоположные поляризационные заряды поверхностей диэлектрика ослабляют поле обкладок (уменьшают разность потенциалов), что приводит к увеличению электроемкости. Конденсаторы характеризуются *пробивным напряжением* – разностью потенциалов между обкладками, при которой происходит электрический разряд через слой диэлектрика (пробой).

Электрическая ёмкость конденсатора не всегда является постоянной, она зависит от диэлектрических свойств диэлектрика. Поэтому конденсаторы характеризуются *кулонвольтной характеристикой*, т.е. зависимостью заряда конденсатора от приложенного к нему напряжения:  $q = q(U)$ . Другой важной характеристикой конденсатора является температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ), характеризующий зависимость изменения ёмкости от температуры.

Конденсаторы различаются: 1) по форме обкладок - на плоские, цилиндрические, сферические и другие; 2) по типу диэлектрика - на воздушные, жидкостные, бумажные, слюдяные, керамические, электролитические; 3) по области применения - низковольтные и высоковольтные, высокой и низкой частоты переменного тока; 4) по характеру задаваемой ёмкости – конденсаторы постоянной ёмкости, переменной ёмкости и полупеременные (триммеры).

Параметры, конструкция и область применения конденсаторов определяются диэлектриком, разделяющим его обкладки, поэтому основная классификация конденсаторов проводится по типу диэлектрика. Диэлектриком служат газы, жидкости и твёрдые электроизоляционные вещества, а также полупроводники.

В конденсаторах с твёрдым диэлектриком обкладки делают из тонкой металлической фольги или наносят слои металла непосредственно на диэлектрик. В таких конденсаторах на поверхность металлической фольги (алюминий, тантал, ниобий или титан) наносится тонкий слой диэлектрика; второй обкладкой является металлическая или полупроводниковая плёнка, нанесённая на слой диэлектрика с другой стороны, или электролит, в который погружается оксидированная фольга. Последние - *электролитические (оксидные) конденсаторы*, где диэлектриком является оксидная плёнка, нанесённая электролитическим способом на поверхность металлической пластинки, а второй обкладкой служит жидкий, полужидкий или пастообразный электролит или полупроводник. Электролитические конденсаторы обладают большой удельной ёмкостью, но имеют большие электрические потери и ток утечки, малую стабильность ёмкости. Причём, эксплуатация электролитических конденсаторов возможна только при определённой полярности напряжения на обкладках, что ограничивает допустимую величину переменной составляющей рабочего напряжения и применяются только в цепях постоянного и пульсирующего тока низкой частоты (до 20 кГц). В связи с развитием *интегральных схем* получили распространение два принципиально новых вида твердотельных конденсаторов: диффузионные и металл-окисел-полупроводниковые (МОП). В диффузионных конденсаторах используется ёмкость созданного методом диффузии *p - n*-перехода, которая зависит от приложенного напряжения. В конденсаторах типа МОП в качестве диэлектрика используется слой двуокиси кремния, выращенный на поверхности кремниевой пластины. Обкладками служат подложка с малым удельным сопротивлением (кремний) и тонкая плёнка алюминия. Обкладками конденсаторов с газообразным и жидким диэлектриком служит система металлических пластин с постоянным зазором между ними.

Конденсаторы с газообразным диэлектриком (воздушные, газонаполненные и вакуумные) имеют высокую стабильность ёмкости. Воздушные конденсаторы постоянной ёмкости применяются в измерительной технике как образцовые при напряжениях не выше 1000 В. Рабочее напряжение для вакуумных конденсаторов постоянной ёмкости от 5 до 45 кВ. Они используются при работе в диапазоне частот от 1 до 10 МГц, устойчивы к перепадам атмосферного давления. Конденсаторы с жидким диэлектриком имеют при тех же размерах большую ёмкость, чем газовые конденсаторы. Однако такие конденсаторы имеют большой ТКЕ и большие электрические потери.



Соединение конденсаторов в батарее позволяет варьировать значениями электроемкости. Используется их параллельное и последовательное соединение.

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 14) разность потенциалов (напряжение) между обкладками каждого конденсатора одинакова:

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Суммарный заряд равняется сумме зарядов отдельных конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n.$$

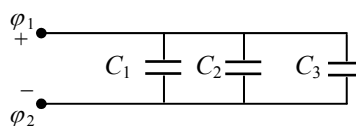


Рис. 14

Выразив заряд отдельного конденсатора в этой формуле из определения взаимной емкости  $q_i = C_i U_i$ , получаем соотношение для общей емкости параллельно соединенных конденсаторов:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

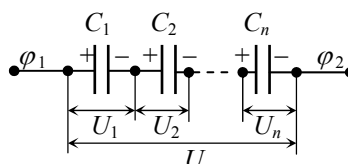


Рис. 15

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 15) общая разность потенциалов распределяется между отдельными конденсаторами:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

Если левой обкладке первого конденсатора сообщается заряд  $+q$ , то за счет электрического притяжения свободные электроны из левой обкладки второго конденсатора по соединяющему проводнику перейдут на правую обкладку первого конденсатора. Данная обкладка приобретает отрицательный заряд  $-q$ , а левая обкладка второго положительный заряд  $+q$ . Таким образом, все конденсаторы заряжаются одинаковыми зарядами, равными заряду всей батареи:

$$q_1 = q_2 = \dots = q_n = q.$$

Если разности потенциалов отдельных конденсаторов

$$U_i = q_i / C_i$$

подставить в соотношение для общего напряжения, то получится формула для общей емкости последовательно соединенных конденсаторов:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

### Описание установки

*Приборы и принадлежности:* проволочный реохорд, магазин емкостей, источник переменного тока, осциллограф, два конденсатора с неизвестной емкостью.

Для измерения емкости конденсаторов можно использовать мостиковую схему (рис. 16), аналогичную той, которая применяется для измерения сопротивлений (рис. 17). Измерительный мост постоянного тока для измерения сопротивления носит имя своего изобретателя Ч. Уитстона, где измеряемое сопротивление обозначено через  $R_x$ .

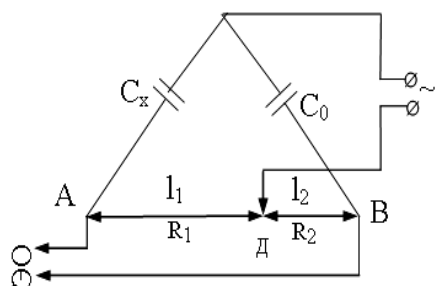


Рис. 16

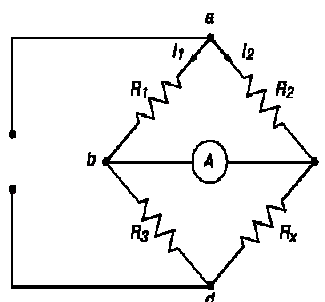


Рис. 17

При измерении емкости конденсаторов следует учесть тот факт, что конденсатор не пропускает постоянный электрический ток. В цепи переменного тока при каждом изменении направления тока конденсатор перезаряжается, вследствие чего поддерживается ток. Конденсатор оказывает так называемое емкостное сопротивление переменному току, зависящее от емкости и круговой частоты электрического тока  $\omega$ :  $R_C = 1/(\omega C)$ .

Поэтому для измерения емкости пользуются измерительным мостом переменного тока. Как доказывается в теории переменных токов, при условии равенства потенциалов точек  $A$  и  $B$  по величине и фазе имеет место соотношение:

$$\frac{C_o}{C_x} = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{или} \quad C_x = C_o \frac{R_2}{R_1}.$$

Измерительный мост переменного тока (рис. 16) представляет собой замкнутый контур из последовательно соединенных двух резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и двух конденсаторов  $C_o$ ,  $C_x$ , которые называются плечами моста. В качестве плеч с активным сопротивлением используется проволочный реохорд. Сопротивление проволоки от контакта  $A$  до движка  $D$  –  $R_1$ , а от движка до контакта  $B$  –  $R_2$ .  $C_x$  – конденсатор с неизвестной емкостью,  $C_o$  – магазин емкостей. Вставляя конические штепсели в соответствующие гнезда верхнего ряда на передней панели магазина емкостей, можно набирать необходимое значение емкости от 1 до 110 мкФ. При включении нескольких штепселей емкости отдельных эталонных конденсаторов магазина суммируются. Значения емкости меньше 1 мкФ набираются с помощью переключателей декад.

Так как сопротивление проволоки пропорционально ее длине, то отношение сопротивлений  $R_2/R_1$  можно заменить отношением длин  $l_2/l_1$ . Поэтому расчетная формула имеет вид:

$$C_x = C_o \cdot \frac{l_2}{l_1},$$

которая справедлива для уравновешенного моста, т.е. при отсутствии напряжения между контактами  $A$  и  $B$ . Последнее условие контролируется с помощью индикатора нуля переменного тока, в данной работе – электронным осциллографом (ЭО).

### Измерения и обработка результатов измерений

1. Ознакомьтесь с устройством приборов и правилами пользования. Соберите измерительную установку, используя один из конденсаторов с неизвестной емкостью. Включите осциллограф. Установите электронный луч на середину шкалы экрана.

2. Движок реохорда установите на середине его шкалы. Включите источник переменного тока. В магазине емкостей подберите такую емкость, чтобы высота сигнала на экране ЭО была минимальной (При разных индуктивностях плеч моста возникает разность фаз напряжения между точками  $A$  и  $B$ , поэтому не всегда удается сигнал довести до нуля). Передвижением движка реохорда в ту и другую сторону убедитесь, что подобранная емкость действительно обеспечивает минимальный сигнал. Данное значение емкости обозначьте через  $C_o$ . Результаты занесите в табл. 11.

3. Повторите измерения еще два раза при  $C'_o \geq C_o$  и  $C''_o \leq C_o$ . Мост уравнивайте, перемещая движок по проволочному реохорду. Следите за тем, чтобы между движком и натянутой на шкалу реохорда проволокой имелся надежный контакт.

4. Для каждого измерения по расчетной формуле вычислите значение емкости конденсатора  $C_{xi}$ . Найдите среднее значение  $\bar{C}_x$  и ошибки отдельных измерений  $\Delta C_{xi}$ . Результаты измерений и расчетов запишите в табл. 11.

5. Такие же измерения сделайте для второго конденсатора  $C_{x2}$ . Затем повторите измерения при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов  $C_{x1}$  и  $C_{x2}$ . Простое устройство с переключателями позволяет производить эти измерения без разбора измерительной установки.

6. Вычислите доверительный интервал для всех случаев:

$$\Delta \bar{C} = t(\alpha, n) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta C_{xi})^2}{n(n-1)}},$$


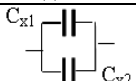
где  $t(\alpha, n)$  – коэффициент Стьюдента. Значение доверительной вероятности  $\alpha$  берете по указанию преподавателя.

7. По средним значениям  $\bar{C}_{x1}$  и  $\bar{C}_{x2}$ , используя расчетные формулы, вычислите суммарную емкость при последовательном и параллельном соединениях этих конденсаторов. Вычисленные значения емкостей сравните с соответствующими средними измеренными значениями и сделайте вывод о совпадении резуль-

татов. Соответствие расчетных и измеренных значений считаются удовлетворительными, если отклонения лежат в пределах доверительных интервалов.

### Результаты измерения емкости

Таблица 11

| Объект измерения  | № п/п | $C_o$ , мкФ | $l_1$ , см | $l_2$ , см | $C_{xi}$ , мкФ | $\bar{C}_x$ , мкФ | $\Delta C_{xi}$ , мкФ | $\Delta \bar{C}_x$ , мкФ |
|---|-------|-------------|------------|------------|----------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| $C_{x1}$  | 1     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
|   | 3     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
|   | 2     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
| $C_{x2}$  | 1     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
|   | 2     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
|   | 3     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
| <br>$C_{x1}$ $C_{x2}$<br>Последовательное соединение | 1     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
|   | 2     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
|   | 3     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
| <br>$C_{x1}$ $C_{x2}$<br>Параллельное соединение     | 1     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
|   | 2     |             |            |            |                |                   |                       |                          |
|   | 3     |             |            |            |                |                   |                       |                          |

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение и устройство конденсаторов?
2. Что называется емкостью? Единица измерения емкости.
3. Объясните принцип измерения емкости с помощью моста переменного тока.
4. Какие соотношения между зарядами, напряжениями и емкостями при параллельном и последовательном соединении конденсаторов?
5. Какие диэлектрики применяются в конденсаторах, и какие бывают типы конденсаторов?
6. Как диэлектрик влияет на емкость конденсатора?

## Лабораторная работа 213

### ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

*Цель работы:* изучение явления поляризации диэлектриков, измерение относительной диэлектрической проницаемости различных образцов.

#### Краткая теория

В зависимости от концентрации свободных зарядов тела делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники. *Проводники* - тела, в которых электрический заряд может перемещаться по всему его объему. Проводники делятся на две группы: 1) *проводники первого рода* (металлы) - перенос в них зарядов (свободных электронов) не сопровождается химическими превращениями; 2) *проводники второго рода* (например, расплавленные соли, растворы кислот) - перенос в них зарядов (положительных и отрицательных ионов) ведет к химическим изменениям. *Диэлектрики* (стекло, пластмассы и др.) – тела, в которых практически отсутствуют свободные заряды.

*Полупроводники* (например, германий, кремний) занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Указанное деление тел является весьма условным, однако большое различие в них концентраций свободных зарядов обуславливает огромные качественные различия в их поведении и поэтому оправдывает деление тел на проводники, диэлектрики и полупроводники.

В диэлектриках все внешние (валентные) электроны участвуют в образовании ковалентных связей с соседними атомами, в результате чего электроны не могут перемещаться под действием электрического поля и диэлектрики не проводят электрический ток (являются изоляторами). Дополнительный заряд, помещенный на поверхности или внутри диэлектрика, остается неподвижным. К диэлектрикам относятся все неионизированные газы, некоторые жидкости (дистиллированная вода, бензол,

нефтяные, синтетические и растительные масла и др.) и твердые тела (стекло, фарфор, слюда, поливинилхлорид и др.) Удельное электрическое сопротивление диэлектриков  $\rho \sim 10^6 \div 10^{15}$  Ом·м, тогда как у металлов  $\rho \sim 10^{-8} \div 10^{-6}$  Ом·м.

Диэлектрики делятся на полярные и неполярные диэлектрики. Молекулы полярных диэлектриков представляют собой электрический диполь, т.е. центры «тяжести» отрицательных и положительных зарядов несколько смещены. Полярные молекулы имеют несимметричное строение. К ним, например, относятся: CO, H<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> ... Такие молекулы можно представить

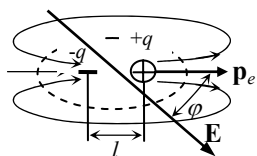


Рис. 18

как электрический диполь (рис. 18). Дипольный момент молекулы  $p_e = ql$ , где  $q$  – суммарный заряд всех электронов молекулы;  $l$  – эксцентриситет молекулы. При отсутствии внешнего электрического поля вследствие теплового движения дипольные моменты полярных молекул ориентированы хаотично, и их результирующий момент равняется нулю.

У неполярных диэлектриков, молекулы которых имеют симметричное строение, центры «тяжести» положительных и отрицательных зарядов в отсутствие внешнего поля совпадают. К ним относятся: H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ... Дипольный момент такой молекулы равен нулю. При наличии внешнего электрического поля  $E_0$  электронное облако молекулы несколько смещается относительно центра тяжести положительных зарядов, и молекула приобретает электрический дипольный момент (рис. 19):

$$p_e = \alpha \epsilon_0 E,$$

где  $\alpha$  называется поляризуемостью молекулы.

Третью группу диэлектриков (NaCl, KCl, KBr и др.) составляют вещества, молекулы которых имеют ионное строение. Ионные кристаллы представляют собой пространственные решетки с правильным чередованием ионов разных знаков. В этих кристаллах нельзя выделить отдельные молекулы, а рассматри-

вать их можно как систему двух вдвинутых одна в другую ионных подрешеток. При наложении на ионный кристалл электрического поля происходит некоторая деформация кристаллической решетки или относительное смещение подрешеток, приводящее к возникновению дипольных моментов.

Под действием внешнего электрического поля возникает отличный от нуля вращающий момент, действующий на полярную молекулу:

$$M = pE \sin \varphi,$$

где  $\varphi$  – угол между векторами напряженности электрического поля и дипольным моментом молекулы (рис. 18). Поэтому молекулы полярных диэлектриков в электрическом поле поворачиваются так, что дипольные моменты располагаются параллельно силовым линиям поля (рис. 20).

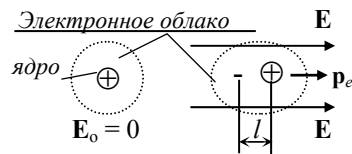


Рис. 19

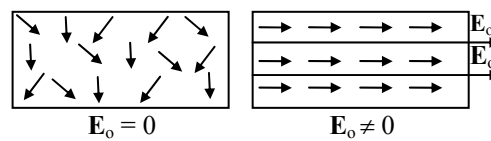


Рис. 20

Таким образом, внесение всех трех групп диэлектриков во внешнее электрическое поле приводит к возникновению отличного от нуля результирующего электрического дипольного момента. Приобретение диэлектриками суммарного дипольного момента под действием внешнего электрического поля называется *поляризацией диэлектрика*. Диэлектрик в целом приобретает отличный от нуля дипольный момент.

Соответственно трем группам диэлектриков различают три вида поляризации:

– *ориентационная*, или *дипольная поляризация* диэлектрика с полярными молекулами, заключающаяся в ориентации имеющихся дипольных моментов молекул по полю. Естественно, что тепловое движение препятствует полной ориентации молекул, но в результате совместного действия обоих факторов (электри-



ческое поле и тепловое движение) возникает преимущественная ориентация дипольных моментов молекул по полю. Эта ориентация тем сильнее, чем больше напряженность электрического поля и ниже температура;

– *электронная*, или *деформационная поляризация* диэлектрика с неполярными молекулами, заключающаяся в возникновении у атомов индуцированного дипольного момента за счет деформации электронных оболочек;

– *ионная поляризация* диэлектриков с ионными кристаллическими решетками, заключающаяся в смещении подрешетки положительных ионов вдоль поля, а отрицательных - против поля, приводящем к возникновению дипольных моментов.

Степень поляризации (количественно) характеризуется вектором поляризованности, равным отношению суммарного дипольного момента диэлектрика к его объему:

$$\mathbf{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i}{\Delta V},$$

где  $\mathbf{p}_i$  – дипольный момент отдельной молекулы в объеме  $\Delta V$ .

Как показывает опыт, для большого класса диэлектриков (за исключением сегнетоэлектриков – диэлектриков, обладающих в определенном интервале температур спонтанной поляризованностью, т.е. поляризованностью в отсутствие внешнего электростатического поля, например,  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{BaTiO}_3$ ) вектор поляризованности прямо пропорционален напряженности электрического поля:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \kappa \mathbf{E},$$

где  $\kappa$  – безразмерная величина, называемая *диэлектрической восприимчивостью диэлектрика* ( $\kappa > 0$ ).

Все молекулы неполярного диэлектрика в электрическом поле приобретают одинаковые индуцированные дипольные моменты  $\mathbf{p}_e$ . Поэтому поляризованность  $\mathbf{P} = n \mathbf{p}_e$ , где  $n$  – концентрация молекул. Следовательно,  $\kappa = \alpha n$ , где  $\alpha = 4\pi R^3$  – *поляризуемость молекулы*, зависящая только от радиуса молекулы  $R$ .

Диэлектрическую восприимчивость полярных диэлектриков можно вычислить по формуле Дебая–Ланжевена:

$$\kappa = n p_e^2 / (3 \epsilon_0 k T).$$

Диэлектрическая восприимчивость - величина безразмерная, всегда больше нуля и для большинства диэлектриков (твердых и жидких) составляет несколько единиц (хотя, например, для спирта  $\kappa = 25$ , для воды  $\kappa = 80$ ).

Для установления количественных характеристик поля в диэлектрике внесем в однородное внешнее электростатическое поле  $\mathbf{E}_0$ , созданное двумя бесконечными параллельными разноименно заряженными плоскостями (рис. 21), пластинку из однородного диэлектрика толщиной  $l$ . За счет поляризации молекулы диэлектрика поворачиваются, в результате чего ближе к положительной плоскости оказываются отрицательные заряды молекул, а ближе к отрицательной – положительные. Внутри диэлектрика положительные и отрицательные заряды соседних молекул взаимно компенсируются.

В результате на правой грани диэлектрика, обращенного к отрицательной плоскости, будет избыток положительных зарядов с поверхностной плотностью  $+\sigma'$ , на левой избыток – отрицательных зарядов с поверхностной плотностью  $-\sigma'$ . Эти некомпенсированные заряды в отличие от свободных зарядов проводников (плоскостей) называются *связанными зарядами*. Связанные заряды противоположных поверхностей диэлектрика создают внутреннее поле напряженностью  $\mathbf{E}'$ , направленной противоположно напряженности внешнего поля  $\mathbf{E}_0$ . Но  $E' < E_0$ . Суммарное поле получается как наложение внешнего и внутреннего полей, в результате электрическое поле в диэлектриках ослабевает:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}'.$$

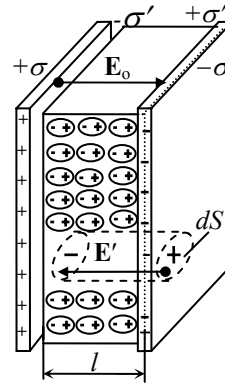


Рис. 21

Результирующее поле внутри диэлектрика в алгебраической форме находится как разность напряженностей:  $E = E_0 - E'$ . Напряженность внутреннего поля можно определить как напряженность поля параллельных плоскостей:  $E' = \sigma'/\epsilon_0$ .

Для определения поверхностной плотности связанных зарядов  $\sigma'$  в диэлектрике возьмем контрольный объем в виде цилиндра с основаниями  $dS$ , лежащими на противоположных гранях диэлектрика, и длиной образующей  $l$ . Этот объем можно рассматривать как электрический диполь. Поляризационный заряд основания цилиндра

$$dq' = \sigma' dS.$$

Электрический дипольный момент цилиндра

$$dp = dq' l = \sigma' dS l = \sigma' dV,$$

где  $dV = dS l$  – объем цилиндра.

Поляризованность определяется как отношение дипольного момента к объему цилиндра:

$$P = \frac{dp}{dV} = \frac{\sigma' dV}{dV} = \sigma'.$$

Таким образом, поляризованность численно равняется поверхностной плотности связанных зарядов:  $P = \sigma'$ .

Тогда

$$E = E_0 - E' = E_0 - \sigma'/\epsilon_0 = E_0 - P/\epsilon_0 = E_0 - \kappa E,$$

так как  $\mathbf{P} = \epsilon_0 \kappa \mathbf{E}$ . В результате численное значение напряженности электростатического поля в диэлектрике

$$E = E_0 / (1 + \kappa).$$

По определению отношение напряженности поля в вакууме к напряженности поля в среде называется диэлектрической проницаемостью среды:  $\epsilon = E_0 / E$ . Из двух последних выражений получаем связь между диэлектрической проницаемостью среды и диэлектрической восприимчивостью

$$\epsilon = 1 + \kappa.$$

Диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  показывает, во сколько раз электростатическое поле ослабляется за счет поляризации диэлектрика.

Как видим, напряженность электрического поля зависит от свойств среды. Поэтому при переходе из одной среды в другую напряженность меняется скачкообразно (рис. 22). Например, диэлектрическая проницаемость для воздуха  $\varepsilon \approx 1$ , для керосина  $\varepsilon = 7$ , для дистиллированной воды  $\varepsilon = 81$ .

С целью исключения неудобств, связанных с прерывностью напряженности на границах раздела сред, ввели дополнительную векторную величину  $\mathbf{D}$ , которая называется *вектором электрического смещения* (вектором индукции):

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}.$$

Электрическое смещение не зависит от свойств среды, т.е. от  $\varepsilon$ . Учитывая, что  $\varepsilon = 1 + \kappa$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \kappa \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}.$$

Единица измерения:  $[D] = \text{Кл/м}^2$ .

В диэлектрике на внешнее электростатическое поле (свободных зарядов) накладывается внутреннее поле связанных зарядов. Напряженность поля является силовой характеристикой, как поля свободных зарядов, так и поля связанных зарядов. Электрическое смещение  $\mathbf{D}$  – силовая характеристика поля только свободных зарядов. Связанные заряды могут вызвать, однако, перераспределение свободных зарядов по поверхности проводника. Поэтому электрическое смещение  $\mathbf{D}$  характеризует электростатическое поле, создаваемое свободными зарядами, но при таком их распределении, какое имеется при наличии диэлектрика.

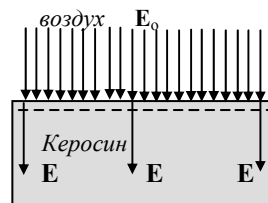


Рис. 22

### Описание установки и методики измерения

*Приборы и принадлежности:* конденсатор разборный, эталонное сопротивление, генератор переменного сигнала, осциллограф, образцы диэлектриков.

Экспериментальная установка (рис.23) собрана на базе лабораторного комплекса ЛКЭ-2. Диэлектрическая проницаемость образца определяется по измерению емкости конденсатора с диэлектриком и без диэлектрика. Сравнивают напряжение  $U_C$  на исследуемом конденсаторе  $C$  и напряжение  $U_{R_0}$  на соединенном с ним последовательно эталонном сопротивлении  $R_0$ . Если напряжения на эталонных элементах намного меньше напряжения на исследуемом конденсаторе, в качестве  $U_C$  можно взять напряжение генератора  $U$ . В качестве вольтметров  $V_1$  и  $V_2$  можно использовать осциллограф. При синусоидальном сигнале генератора в качестве  $V_1$  и  $V_2$  можно использовать любые вольтметры переменного тока с входным сопротивлением более 300 кОм.

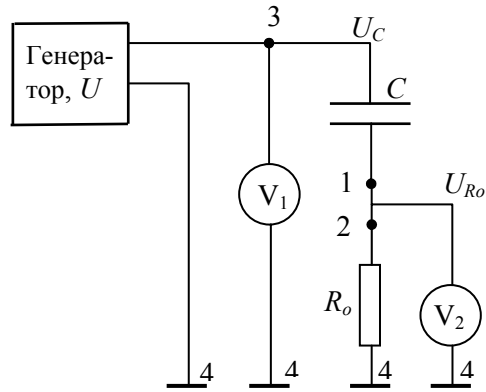


Рис. 23

Для схемы, изображенной на рис. 23, при последовательном соединении исследуемого конденсатора  $C$  и эталонного сопротивления  $R_0$  сила тока через эти элементы одинаковы:  $I_C = I_{R_0}$ . Тогда по закону Ома

$$\frac{U_C}{R_C} = \frac{U_{R_0}}{R_0}, \quad (1)$$

где  $R_C = 1/\omega C = 1/2\pi\nu C$  - емкостное сопротивление конденсатора,  $\nu$  - частота переменного сигнала. Тогда из формулы (1) находим емкость исследуемого конденсатора:

$$C = \frac{U_{R_0}}{2\pi\nu R_0 U_C}. \quad (2)$$

## Измерения и обработка результатов измерений

1. Установите на генераторе переменный сигнал заданной частоты  $\nu$  ( $1 \div 5$  кГц).

2. Определите емкость исследуемого конденсатора  $C_B$  с воздушным зазором т.е. без диэлектрического образца. Для этого подключите вход «Y» осциллографа к гнездам «1», «3» (рис. 23). Измерьте амплитуду сигнала  $A$  в делениях шкалы  $N$ . По положению переключателя «Усиление Y» на передней панели осциллографа определите коэффициент вертикального отклонения, который обозначим здесь через  $k$ . Амплитуду напряжения на исследуемом конденсаторе вычислите по формуле:

$$U_C = k N.$$

Подключите вход «Y» осциллографа к гнездам «2» и «4». Аналогичным образом измерьте напряжение  $U_{R_0}$  на эталонном сопротивлении  $R_0$ . По формуле (2) вычислите емкость воздушного конденсатора  $C_B$ . Значение эталонного сопротивления  $R_0 = 10$  кОм.

3. Снимите верхнюю обкладку конденсатора и по заданию преподавателя поместите внутрь исследуемого конденсатора один из диэлектрических образцов. По методике определения, описанном в пункте 2, измерьте емкость  $C_\partial$  полученного конденсатора с диэлектриком между обкладками. Результаты измерений занести в табл. 12.

Результаты измерения емкости конденсаторов

Таблица 12

| $\nu$ , кГц | Воздушный конденсатор |               |            | Конденсатор с диэлектриком |               |                   |
|-------------|-----------------------|---------------|------------|----------------------------|---------------|-------------------|
|             | $U_C$ , В             | $U_{R_0}$ , В | $C_B$ , пФ | $U_C$ , В                  | $U_{R_0}$ , В | $C_\partial$ , пФ |
|             |                       |               |            |                            |               |                   |

3. Из формулы для емкости плоского конденсатора отношение электроемкостей конденсаторов составляет:

$$\frac{C_o}{C_B} = \frac{\varepsilon d_B}{d}.$$

Отсюда определяете относительную диэлектрическую проницаемость исследуемого образца:

$$\varepsilon = \frac{C_o d}{C_B d_B}, \quad (3)$$

где  $d$  – толщина образца диэлектрика;  $d_B$  – толщина воздушного зазора.

Используя данные табл.12, по формуле (3) вычислите относительную диэлектрическую проницаемость образца.

По паспорту установки толщина воздушного зазора в конденсаторе  $d_B = 2,1$  мм; площадь обкладки  $S = 228,48$  см<sup>2</sup>; электроемкость воздушного конденсатора  $C_B = 96,9$  пФ. При выполнении работы могут быть использованы различные образцы диэлектриков. Толщина этих образцов  $d$ : стекло – 3,8 мм, текстолит – 4,1 мм, оргстекло – 4,1 мм. Паспортные значения относительной диэлектрической проницаемости образцов: стекло – 5,65; текстолит – 3,47; оргстекло – 2,71.

### Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются диэлектриками? На какие группы они делятся?
2. Что называется поляризацией диэлектрика? Объясните электронный, ориентационный и ионный механизмы поляризации.
3. Какие заряды называются связанными? Почему внутри диэлектрика электрическое поле ослабляется?
4. Докажите формулу для напряженности электростатического поля внутри диэлектрика.

5. Какой физический смысл имеет относительная диэлектрическая проницаемость?
6. Чем вектор электрического смещения  $\mathbf{D}$  отличается от напряженности электрического поля  $\mathbf{E}$ ?

#### ***Библиографический список***

1. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова, – М.: Высшая. шк., 2001.–478 с.
2. Детлаф, А.А. Курс физики: учебное пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Высшая. шк., 2001.– 718 с.
3. Вафин, Д.Б. Физика: учебное пособие / Д.Б. Вафин, Казан.гос.технол.ун-т. Казань, 2006. Ч. 1. – 292 с.
4. Лабораторный практикум по физике: учебное пособие для студентов вузов / А.С. Ахматов, В.М. Андреевский, А.М. Кулаков и др.; под ред. А.С. Ахматова, – М.: Высшая. шк., 1980. – 360 с.
5. Лабораторный комплекс ЛКЭ - 2 /техническое описание, – М.: НТЦ «Владис», 1998.– 46 с.

Редактор Л.Г. Шевчук  
Лицензия № 020404 от 6.03.97 г.

Подписано в печать 25. 05.2008.                      Формат 60×84 1/16  
Бумага писчая.                      Печать RISO                      3,25 усл.печ.л.  
3,5 уч.- изд.л.                      Тираж 150 экз.      Заказ 6                      «С»

Издательство Казанского государственного технологического университета

Офсетная лаборатория Казанского государственного технологического университета  
420015, Казань, К.Маркса, 68