

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Владимирский государственный университет
Кафедра электротехники и электроэнергетики

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ»**

Составители
А.В. КОРОВКИН
С.А. СБИТНЕВ
М.Н. СТАРОВЕРОВ

Владимир 2005

УДК 621.315.61

ББК 31.234

М54

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент

кафедры приборостроения и информационно-измерительной техники

Владимирского государственного университета

Л.В. Ильинская

Печатается по решению редакционно-издательского совета

Владимирского государственного университета

Методические указания к лабораторным работам по дисциплине М54 «Материаловедение. Электротехнические материалы» / сост. : А. В. Коровин, С. А. Сбитнев, М. Н. Староверов ; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Ред.-издат. комплекс ВлГУ, 2005. – 24 с.

Содержат задания по одному из основных разделов курса электроматериаловедения – диэлектрические материалы – и указания к их выполнению. Рассматриваются следующие расчетно-лабораторные работы: определение удельных электрических сопротивлений твердых диэлектриков, определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков на частоте 50 Гц, определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков на высоких частотах.

Предназначены для студентов электротехнических специальностей и могут быть полезны инженерам-электрикам, занятым эксплуатацией электротехнологического оборудования.

Ил. 4. Библиогр.: 4 назв.

УДК 621.315.61

ББК 31.234

Введение

Студентам ряда специальностей электроэнергетического, электротехнического, электромеханического, радиоэлектронного направлений читают курсы по электротехническому материаловедению, при изучении которых выполняют лабораторные работы. Представленное издание является руководством к таким работам. В нем содержится описание трех лабораторных работ по практическому применению знаний по разделу курса «Материаловедение. Электротехнические материалы».

В соответствии с лекционными курсами в лабораторных работах исследуются диэлектрические, полупроводниковые, проводниковые и магнитные материалы.

Выполнение лабораторной работы предусматривает проведение студентами подготовительной работы, содержание которой отражено в разделах «Домашнее задание» и «Контрольные вопросы». Каждое занятие рассчитано на 4 часа работы в лаборатории и 4 часа самостоятельной работы.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ (ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ)

Цель работы: изучение стандартных методов определения на постоянном токе удельного объемного ρ и удельного поверхностного ρ_s электрического сопротивления твердых диэлектриков (электроизоляционных материалов) и определение ρ и ρ_s образцов различных материалов в зависимости от различных условий окружающей среды.

Домашнее задание

Изучите:

- 1) физические основы и характерные черты явления электропроводности диэлектриков (электроизоляционных материалов);
- 2) физические основы влияния условий окружающей среды на процесс электропроводности диэлектриков;
- 3) стандартные методы определения ρ и ρ_s на постоянном токе и порядок работы на установках для измерения сопротивления диэлектриков;
- 4) требования к образцам материалов для определения удельного объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков (электроизоляционных материалов);
- 5) порядок проведения обработки результатов испытаний и оформления протокола по работе.

Описание лабораторной установки

На испытуемом плоском образце ИО с толщиной h расположены высоковольтный ВЭ, измерительный ИЭ и охранный ОЭ электроды (рис. 1, а, б).

При измерении ρ (рис. 1, а) высокое напряжение U подается на электрод ВЭ и ИЭ. Электрод ОЭ заземлен. Поэтому ток, протекающий по поверхности образца, отводится на землю и не измеряется регистрирующим прибором РП.

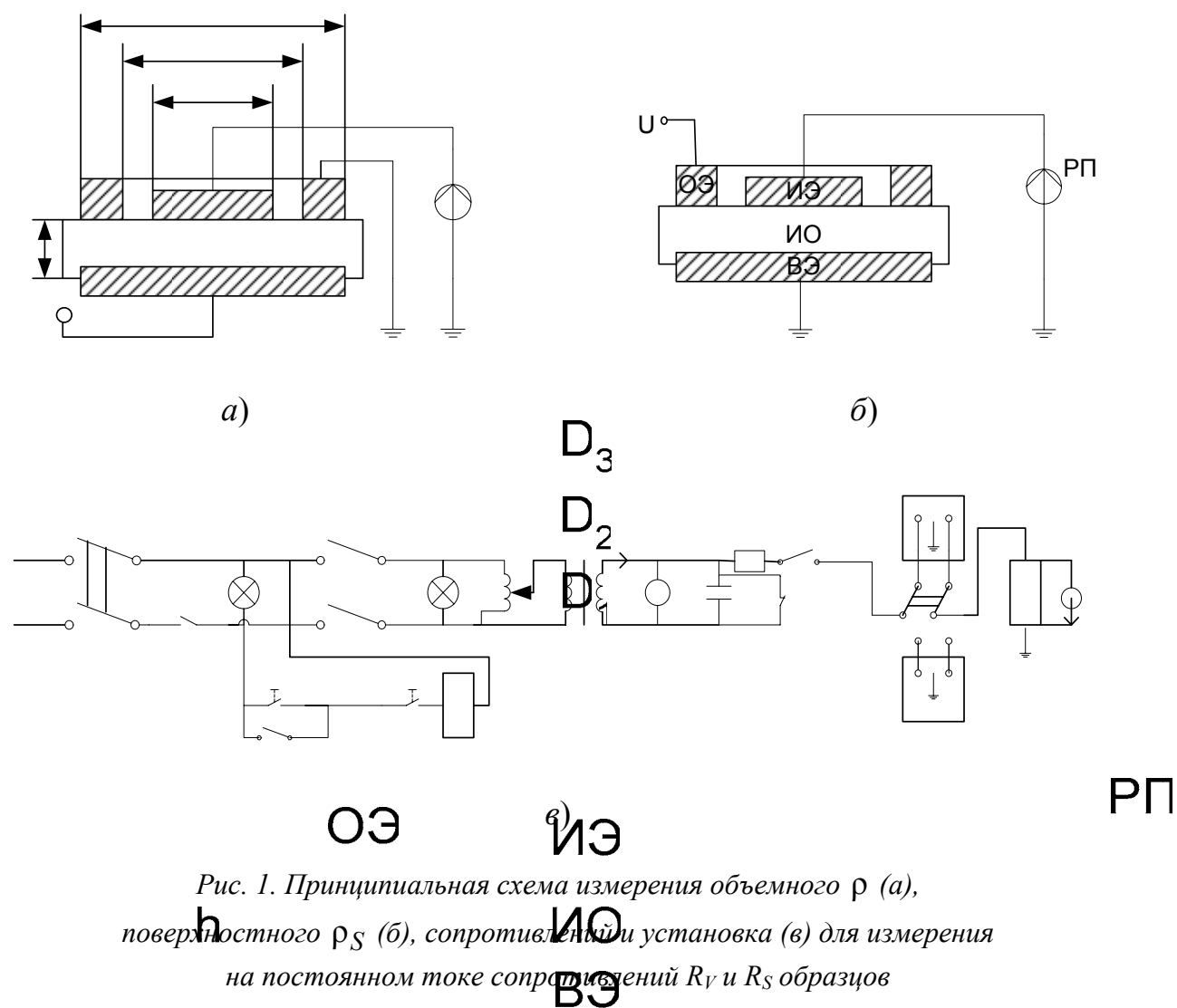


Рис. 1. Принципиальная схема измерения объемного ρ (а), поверхностного ρ_S (б), сопротивлений и установка (в) для измерения на постоянном токе сопротивлений R_V и R_S образцов

Заземлением электрода ОЭ достигается также и некоторое выравнивание электрического поля у краев электродов. Однако по ГОСТ 6433.2-71 неоднородность электрического поля следует учитывать, приняв, что ток протекает по образцу, площадь поперечного сечения которого определяется диаметром, м:

$$D_0 = (D_1 + D_2) / 2, \quad (1)$$

а длина равна h , м, если измеренное прибором РП сопротивление равно R_V , Ом, то ρ материала (Ом·м) рассчитывают по формуле

$$\rho = R_V (\pi/16)(D_1 + D_2)^2 / h. \quad (2)$$

При измерении ρ_S (рис. 1, б) напряжение U подается на электрод ОЭ. Электрод ВЭ заземлен, поэтому ток, протекающий от ОЭ по объему образца, отводится на землю. Считается, что ток протекает по образцу с длиной, м:

$$g = (D_2 - D_1)/2 \quad (3)$$

и с «сечением»

$$S_{II} = \pi(D_1 + D_2)/2. \quad (4)$$

Если в этом случае измеренное прибором РП сопротивление равно R_S (Ом), то ρ_S (Ом) материала рассчитывают по формуле

$$\rho_S = \pi(D_1 + D_2)/(D_2 - D_1). \quad (5)$$

Для измерения R_V и R_S в работе используют методы *косвенного* и *прямого* измерения сопротивления.

При *косвенном* измерении сопротивление рассчитывают по значениям испытательного напряжения, приложенного к электродам на образце, и току, протекающему через образец; ток измеряется зеркальным гальванометром методом непосредственного отклонения.

При *прямом* измерении сопротивление между электродами ВЭ и ИЭ измеряют с помощью терморезистора.

При определении R_V и R_S косвенным методом ток измеряется зеркальным гальванометром, снабженным универсальным шунтом $R_{ш}$. Различными положениями шунта соответствуют шунтовые числа $1/n$ в пределах от $1/10000$ до $1/1$. Если при измерении показание гальванометра в единицах зеркальной шкалы равно a (мм), то измеряемый ток равен $I = naC_d$, А, где C_d – динамическая постоянная гальванометра, А/мм.

Тогда с учетом выражений (2) и (5) ρ (Ом·м) и ρ_S (Ом) материалов будут равны:

$$\rho = [U/(naC_d)](\pi/16)(D_1 + D_2)^2 / h, \quad (6)$$

$$\rho_S = [U/(naC_d)]\pi(D_1 + D_2)/(D_2 - D_1). \quad (7)$$

Источником постоянного напряжения установки (см. рис. 1, в) является выпрямитель, состоящий из высоковольтного трансформатора ВТ, диода VD и сглаживающего пульсации тока конденсатора С. Напряжение на первичной обмотке ВТ изменяется с помощью автотрансформатора АТ. Защитный резистор R_0 ограничивает ток в цепи при пробое образца до безопасных значений.

При измерениях испытуемый образец и токоведущие части установки, соединенные с клеммами ВН и Г (рис. 1, в), находятся под высоким потенциалом. Поэтому они изолированы от оператора в камере, выполненной из прозрачного пластика, или в термостате. На дверцах камеры и термостата смонтированы блок-контакты БК1 и БК2. При открывании любой дверцы контакт БК1 размыкается и отключает установку от сети; одновременно контакт БК2 замыкается и разряжает конденсатор С; разряжается на землю и заряд, запасенный в испытуемом образце. Включение установки и проведение испытаний возможно только при закрытых дверцах.

Если дверцы закрыты, то при включении щитового выключателя ВЩ загорается сигнальная лампа Л1, высвечивая надпись «УСТАНОВКА ВКЛЮЧЕНА». Нажатием расположенной на пульте кнопки *Пуск* магнитного пускателя на его обмотку ОП подается напряжение. Контакты КП и блокирующие кнопку *Пуск* вспомогательные контакты ВК пускателя замыкаются. Загорается сигнальная лампа Л2, и на пульте высвечивается красный сигнал «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПОДАНО». Установив на образце по вольтметру В нужную величину напряжения, замыкают ключ К. В установке предусмотрено, что замыкание К происходит одновременно с переводом переключателя $R_{Щ}$ из положения 1/10000 в другое, выбираемое оператором.

Образец электроизоляционного материала – диэлектрика с нанесенными электродами – представляет собой конденсатор. После подачи на электроды такого конденсатора постоянного напряжения по объему или поверхности диэлектрика протекают токи, в которых можно выделить следующие компоненты: ток электропроводности, обусловленный перемещением нейтрализуемых на электродах свободных зарядов (значение этого тока определяет величину R_V и R_S диэлектрика), и ток, спадающий во времени (ток абсорбции, вызванный смещением связанных зарядов – поляризацией диэлектрика). Время завершения процесса установления тока абсорбции определяется строением диэлектрика и условиями окружающей

среды. Уменьшение во времени тока абсорбции приводит к изменению и измеряемого тока, протекающего через образец диэлектрика. Для многих диэлектриков процесс изменения тока завершается в течение 1 мин, поэтому отсчет измерения тока производят на 60-й с после приложения к образцу напряжения.

Рабочее задание

1. Определите ρ и ρ_S твердых электроизоляционных материалов: гетинакса (серии из 3 – 5 образцов); текстолита (стеклотекстолита) (серии из 3 – 5 образцов); асбестоцемента (серии из 3 – 5 образцов). Метод измерения (косвенный или прямой) и величину испытательного напряжения указывает преподаватель. Рассчитайте средние значения найденных значений ρ и ρ_S . За среднее значение примите потенцированное среднее значение десятичных логарифмов величин сопротивлений.

2. Пользуясь косвенным методом измерения сопротивления, определите при комнатной температуре зависимость ρ и ρ_S от величины приложенного напряжения образцов твердых диэлектриков (по указанию преподавателя); величину напряжения изменяйте от 500 до 1500 В. Постройте графики зависимостей ρ и ρ_S от напряжения.

3. В интервале температур от комнатной до $T = 100$ °С (5 – 6 точек) определите зависимость $\rho(T)$ образца электроизоляционной лакоткани. Метод измерения (*косвенный* или *прямой*) и величину испытательного напряжения указывает преподаватель. По найденным значениям методом наименьших квадратов зависимость $\lg[\rho(T)]$ аппроксимируйте прямой и рассчитайте значения параметров ρ_0 и α , которые входят в уравнение (8).

4. Сделайте письменные выводы по проделанной работе.

Порядок проведения работы

Работа проводится при напряжениях, опасных для жизни, и требует строгого выполнения правил по технике безопасности. Перед началом работы следует ознакомиться с устройством высоковольтной установки, типовым заданием, приведенным в работе, указаниями преподавателя по его выполнению. Начинать работу на установке можно только по разрешению преподавателя. Размещать образцы, производить переключения элементов

установки, находящихся в объеме камеры или термостата, можно, лишь выключив выключатель ВЩ на щите.

1. Подготовьте образцы для испытаний. Измерьте толщину h , диаметры D_1 и D_2 электродов. Зафиксируйте динамическую постоянную гальванометра C_d , А/мм.

2. Схема установки смонтирована, и в процессе работы необходимо только произвести включение исследуемого образца ИО в схему в рабочем объеме камеры или термостата. Электрод ВЭ образца помещают на металлический изолированный столик. Электрический контакт осуществляют с помощью массивных металлических накладных электродов, контактирующих с нанесенными на образец электродами. Электроды ВЭ, ИЭ и ОЭ соединяют с расположенными в камере и термостате клеммами ВН, Г и З по схемам, приведенным на рис. 1, а, б. После подключения образца дверцы камеры и термостата должны быть закрыты на замок.

3. Порядок работы при *косвенном* методе измерения

3.1. Фиксируют «нулевое» положение регулятора автотрансформатора АТ и положение 1/10000 переключателя шунта; переключатель П «КАМЕРА-ТЕРМОСТАТ» устанавливают в требуемое положение.

3.2. Включают выключатель ВЩ, нажимают кнопку *Пуск* пускателя, фиксируют «НУЛЬ» светового указателя на шкале гальванометра, устанавливают с помощью автотрансформатора АТ по вольтметру В требуемое напряжение.

3.3. Переводят переключатель $R_{Ш}$ из положения 1/10000 в положения с меньшим n , таким, чтобы установившееся отклонение светового указателя находилось в пределах 50 – 100 делений (мм) шкалы. Одновременно с переводом переключателя из положения 1/10000 включают секундомер. По истечении 60 с фиксируют и записывают отклонение светового указателя на шкале.

3.4. Переводят переключатель $R_{Ш}$ в положение 1/10000, регулятор АТ выставляют в «нулевое положение», нажимают кнопку *Стоп*, выключают выключатель ВЩ, открывают дверцу камеры (термостата), производят подключение другого образца в последовательности, предусмотренной п. 2 раздела «*Порядок проведения работы*». Далее измерения проводят в последовательности, предусмотренной пп. 3.1 – 3.4 этого же раздела.

4. При прямом методе измерения сопротивления в работе применяется тераомметр Е6-13, в котором измерение сопротивления основывается на сравнении измеряемого и образцового сопротивлений. Операции измерения производят в следующем порядке:

- 4.1. Включают питание прибора и осуществляют его прогрев в течение 30 мин.
- 4.2. Переключатель «ЛИНЕЙНАЯ-ОБРАТНАЯ» шкала, расположенный на задней панели прибора, выставляют в положение «ЛИНЕЙНАЯ».
- 4.3. Нажав и повернув по часовой стрелке ручку замыкателя входа, замыкают измерительную цепь (вход) прибора.
- 4.4. Переключатель диапазонов выставляют в положение, которое соответствует значению измеряемого сопротивления.
- 4.5. Ручкой точной установки нуля устанавливают электрический нуль по шкале прибора. Такую установку необходимо периодически повторять в процессе последующих измерений.

ПРИМЕЧАНИЕ. На задней панели прибора расположена ручка грубой установки нуля.

- 4.6. Образец размещают в измерительной камере, которая служит экраном при измерении больших сопротивлений. Подключение образца к клеммам, расположенным в камере, производят согласно схемам рис. 1, а, б. Камеру закрывают на замок.
- 4.7. Нажав и повернув против часовой стрелки ручку замыкателя входа, включают измерительную цепь прибора и по истечении 1 мин производят отсчет значения измеряемого сопротивления; далее блокируют измерительную цепь прибора по п. 4.3, открывают камеру, производят необходимые операции с образцом.
- 4.8. Последующие измерения выполняют в последовательности, предписываемой пп. 4.2. – 4.5, 4.7.

5. При измерении R_V и R_S образцов при повышенных температурах их размещают в термостате. Включают термостат, регулятор температуры устанавливают на нужную температуру T_i , производят нагрев и последующую выдержку образцов при выбранной T_i в течение 10 – 15 мин. Измерения проводят в последовательности, предписываемой пп. 2 и 3 *Порядка проведения работы*.

6. После выполнения всего объема испытаний следует переключатель шунта гальванометра перевести в положение 1/10000, поставить регулятор автотрансформатора АТ в положение «0», отключить выключатель ВЩ, открыть дверцу камеры или термостата, выгрузить образцы и разместить их в контейнере для образцов, отключить питание тераомметра Е6-13, получить разрешение преподавателя на окончание работы.

Обработка результатов измерений

1. Протокол испытаний должен содержать данные, перечень которых приведен в приложении.

2. Сопротивления ρ и ρ_S рассчитываются по формулам соответственно (6) и (7). Определяют десятичные логарифмы $\lg \rho$ и $\lg \rho_S$.

3. Уменьшение ρ с ростом T в интервале температур ($T_0 - T$) может быть выражено формулой

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot \exp(-\alpha T), \quad (8)$$

где ρ_0 – сопротивление при температуре T_0 ; α – коэффициент, который зависит от свойств материала и условий испытания.

Логарифмируя выражение (8), получим $\lg \rho(T) = \lg \rho_0 - 0,43\alpha T$ – зависимость, представляющую собой в координатах $Y = \lg \rho(T)$ и $X = T$ прямую, которая показывает, что с ростом T значение Y линейно уменьшается от значения $Y_0 = \lg \rho_0$ при T_0 . Эту прямую строят по экспериментальным значениям T_i и $Y_i(T_i) = \lg \rho(T_i)$, пользуясь методом наименьших квадратов. При этом сумма квадратов отклонений экспериментальных значений $Y_i(T_i)$ от соответствующих им значений на построенной прямой должна быть минимальной. По значениям $\lg \rho(T_i)$, взятым на построенной прямой, рассчитывают коэффициент α по формуле:

$$\alpha = 2,3[\lg \rho(T_{i+1}) - \lg \rho(T_i)] / (T_{i+1} - T_i), \text{ 1/град.} \quad (9)$$

Контрольные вопросы

1. Чем вызвана электропроводность диэлектриков? Какие частицы переносят заряд в электрическом поле в диэлектрике, каковы механизмы

их генерации и перемещения? Что такое объемная и поверхностная электропроводность диэлектриков (электроизоляционных материалов)?

2. Как зависят ρ и ρ_S от температуры, увлажнения и загрязнения, радиации и других факторов?

3. Какие методы используют для измерения ρ и ρ_S диэлектриков и почему необходима стандартизация таких измерений?

4. Что представляют собой гетинакс, стеклотекстолит, асбестоцемент, лакоткань; почему величины удельного объемного и поверхностного сопротивлений таких материалов отличаются?

Библиографический список

1. **Богородицкий, Н. П.** Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с. (гл. 2; пп. 6.12, 6.14).

2. **Казарновский, Д. М.** Испытания электроизоляционных материалов и изделий / Д. М. Казарновский, Б. М. Тареев. – Л. : Энергия, 1980. – 213 с. (введение, гл. 2).

3. **Пасынков, В. В.** Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – М. : Высш. шк., 1986. – 367 с. (пп. 6.3, 7.4).

4. **Бородулин, В. Н.** Диэлектрики / В. Н. Бородулин. – М. : Изд-во МЭИ, 1993. – 60 с. (гл. 2).

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ (ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ) НА ЧАСТОТЕ 50 Гц

Цель работы: изучение стандартных методов определения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ твердых диэлектриков (электроизоляционных материалов) на переменном токе (частоты 50 Гц) и определение ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ образцов различных материалов и изделий на их основе в зависимости от различных условий окружающей среды.

Домашнее задание

Изучите:

- 1) физические основы и характерные черты явлений поляризации и диэлектрических потерь в твердых диэлектриках;
- 2) влияние окружающей среды на процессы поляризации и диэлектрические потери;
- 3) стандартные методы определения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ при напряжении с частотой 50 Гц; устройство установки для определения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов (моста переменного тока типа Р5026) и порядок работы на установке;
- 4) требования к образцам материалов для определения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектриков;
- 5) порядок проведения обработки результатов испытаний и оформления протокола по работе.

Описание лабораторной установки

Установка представляет собой четырехплечий мост, схема которого представлена на рис. 2. В работе используют мост переменного тока типа Р5026.

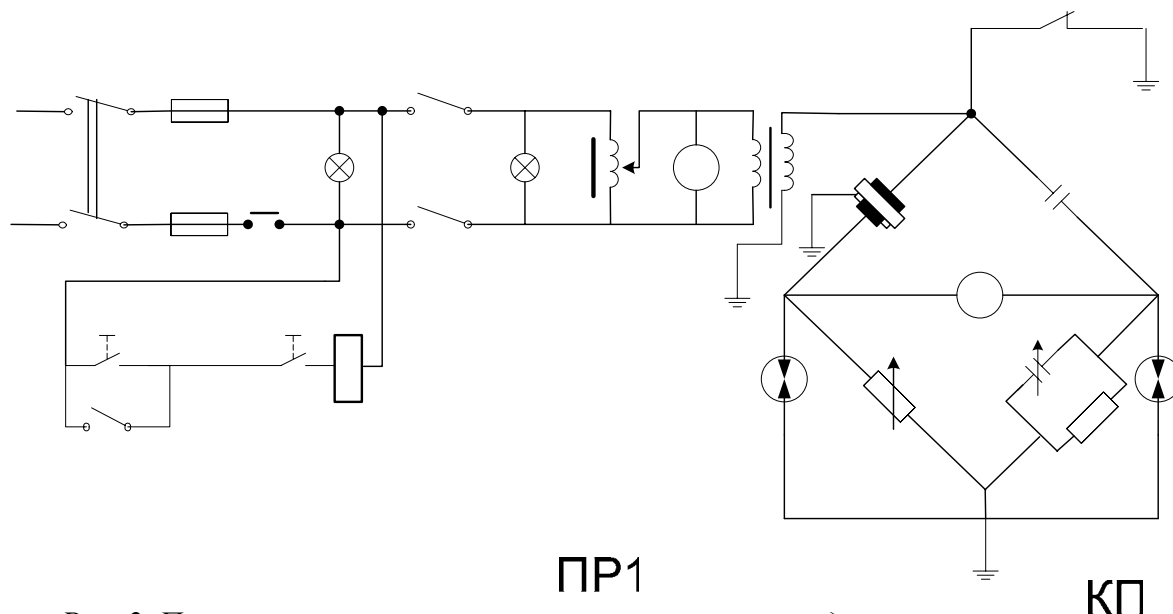


Рис. 2. Принципиальная схема высоковольтного моста для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов

Испытуемый плоский образец ИО (конденсатор), который можно представить эквивалентной схемой замещения в виде параллельно соединенных емкости C_{PX} и сопротивления R_{PX} (или последовательно соединенных C_{SX} и R_{SX}), подключен в плечо АВ моста.

Электроды на образце и токоведущие части установки, составляющие плечо АВ, во время испытания находятся под высоким потенциалом. Поэтому они изолированы от оператора в камеру, выполненную из прозрачного пластика. Изолирован и конденсатор C_0 ($C_0=50$ пФ).

На дверце камеры смонтированы контакты ДК и БК2. При открывании дверцы ДК отключает установку от сети, БК2 заземляет клемму «В». Если дверцы закрыты, то при включении щитового выключателя ВЩ загорается сигнальная лампа СЛ1, высвечивая надпись «УСТАНОВКА ВКЛЮЧЕНА». Нажатием расположенной на пульте кнопки Пуск магнитного пускателя на его обмотку ОП подается напряжение. Контакты КП и блокирующие кнопку Пуск вспомогательные контакты ВК пускателя замыкаются, загорается сигнальная лампа СЛ2 и на пульте высвечивается красный сигнал «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПОДАНО».

Установив на образце с помощью автотрансформатора АТ по вольтметру В требуемую величину напряжения, подбором соответствующих величин R_3 и C_4 уравнивают мост. Индикатором равновесия ИР служит встроенный в мост микроамперметр. Используется также и электронный индикатор нуля типа Ф-510. В индикаторе Ф-510 на горизонтальные пластины электронно-лучевой трубки подается напряжение, приложенное к образцу; на вертикальные – напряжение на измерительной диагонали ВГ моста. Если мост не уравновешен, то на экране фиксируется эллипс, в случае равновесия – горизонтальная прямая линия.

Зафиксировав в момент равновесия значения R_3 (Ом) и C_4 (мкФ), $\text{tg } \delta_x$ и емкость C_x (Ф) испытуемого конденсатора рассчитывают по формулам:

$$\text{tg } \delta = \omega R_4 C_4, \quad (10)$$

$$C_x = C_0 R_4 / [R_3 (1 + \text{tg}^2 \delta)]. \quad (11)$$

Сопrotивление резистора R_4 в мосте Р5026 выбрано равным $10000/\pi$ Ом. Поэтому на частоте 50 Гц величина $\text{tg } \delta_x$ численно равна емкости C_4 , выраженной в микрофарадах. Для диэлектриков (электроизоляционных материалов) обычно $\text{tg } \delta < 0,1$, поэтому вычисление C_x можно проводить по более простой формуле

$$C_x = C_0 R_4 / R_3. \quad (12)$$

В схеме моста предусмотрены разрядники P , защищающие оператора и схему моста в случае пробоя образца ИО или конденсатора C_0 .

Рабочее задание

1. Определите ϵ и $\text{tg } \delta$ твердых диэлектриков (электроизоляционных материалов):

- 1) стеклотекстолита (серия из 3 – 5 образцов);
- 2) гетинакса (серия из 3 – 5 образцов);
- 3) керамического материала (серия из 3 – 5 образцов);
- 4) боросиликатного стекла (серия из 3 – 5 образцов).

2. Рассчитайте средние значения, стандартные отклонения и 90%-ные доверительные интервалы для найденных значений ϵ и $\text{tg } \delta$.

3. При напряжениях 2, 4, 5 и 7 кВ определите C_x и $\text{tg } \delta_x$ конденсатора, в диэлектрическом слое которого содержатся воздушные включения большого объема. Рассчитайте мощность диэлектрических потерь P_{ax} ,

образующихся в конденсаторе. Постройте графики зависимостей $\operatorname{tg} \delta_x$, C_x и P_{ax} от напряжения.

4. Сделайте письменные выводы по проведенной работе.

Порядок проведения работы

Работа проводится при напряжениях, опасных для жизни, и поэтому требует строгого выполнения правил по технике безопасности. Перед началом работы следует ознакомиться с устройством высоковольтной установки, типовым заданием, приведенным в работе, указаниями преподавателя по его выполнению. Начинать работу на установке можно только по разрешению преподавателя. Размещать образцы, производить переключения элементов установки, находящихся в объеме камеры или термостата, можно, лишь выключив выключатель ВЩ на щите.

1. Включите питание электронного указателя равновесия Ф-510.

2. Подготовьте образцы для испытаний. Измерьте: толщину (h , м), диаметры измерительного (D , м) и внутреннего (D_1 , м) охранного электродов. Рассчитайте величину зазора $g=(D_1 - D)/2$, м.

3. Схема установки смонтирована. В процессе работы необходимо только произвести подключение образца ИО в плечо АВ моста. Электрод ВЭ образца располагают на соединенном с клеммой А металлическом изолированном столике. Электрод ИЭ соединяют с расположенной в камере клеммой ИЭ. Охранный электрод ОЭ заземляют.

4. С помощью автотрансформатора АТ по вольтметру В на образце ИО устанавливают нужное напряжение. Переключатель чувствительности указателя равновесия Ф-510 («УСИЛЕНИЕ ПО Y») устанавливают в начальное (1 – 2) положение и производят уравнивание моста. Для этого подбирают величину R_3 и C_4 , начиная с больших значений, таким образом, чтобы у фиксируемого на экране указателя равновесия эллипса малая ось уменьшилась, а направление большой оси приближалось к горизонтальному. Процесс продолжают при большой чувствительности индикатора. Считается, что мост уравновешен, если переключатель чувствительности находится в положениях 7 – 8, а на экране указателя фиксируется горизонтальная прямая линия.

5. Измерения при большем напряжении проводят в той же последовательности, как это и предписано в п. 4 *Порядка проведения работы*.

6. После выполнения всего объема испытаний для завершения работы необходимо выполнить следующие операции:

- 6.1. Переключатель чувствительности указателя равновесия Ф-510 вывести в нулевое положение.
- 6.2. Уменьшить напряжение по вольтметру В до 0.
- 6.3. Нажать кнопку *Стоп* пускателя.
- 6.4. Открыть дверцу камеры.
- 6.5. Выключить ВЦ выключатель.
- 6.6. Извлечь образец и разместить его в контейнере для образцов.
- 6.7. Получить разрешение преподавателя на окончание работы.

Обработка результатов измерений

1. Протокол испытаний должен содержать данные, перечень которых приведен в приложении.

2. Значения $\operatorname{tg} \delta_x$ и C_x образцов вычисляются по формулам (10) – (12).

Мощность потерь P_{ax} (Вт) рассчитывают по формуле

$$P_{ax} = U^2 2\pi f C_x \operatorname{tg} \delta_x, \quad (13)$$

где U , f и C_x выражаются соответственно в вольтах, герцах, фарадах.

Относительная диэлектрическая проницаемость рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_r = C_x h / (\varepsilon_0 \cdot S_{\text{эф}}), \quad (14)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; $S_{\text{эф}}$ (м²) – эффективная площадь измерительного электрода, которая зависит от искажения электрического поля у краев измерительного и охранного электродов.

Эффективная площадь вычисляется по формуле

$$S_{\text{эф}} = \pi(D + Bg)^2, \quad (15)$$

где B – поправочный коэффициент, учитывающий искажение электрического поля у края электродов; может быть найден по графику (рис. 3).

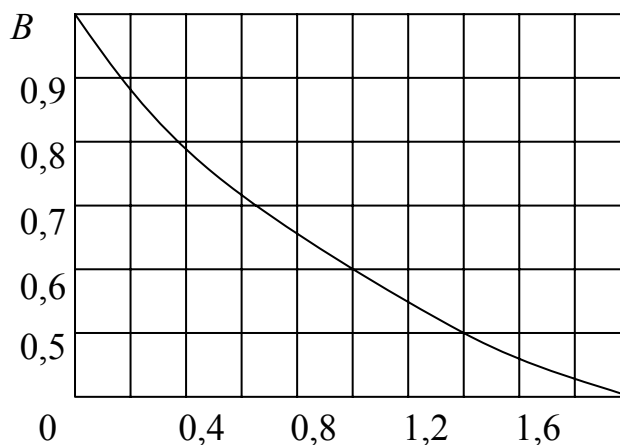


Рис. 3. Поправочный коэффициент B

для учета искажения поля у краев электродов

Средние значения, стандартные отклонения и 90%-ные данные доверительные интервалы для найденных значений ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ рассчитываются по формулам.

Контрольные вопросы

1. Какие виды поляризаций могут наблюдаться в твердых диэлектриках? Что такое диэлектрическая проницаемость?
2. Какие поляризации сопровождаются диэлектрическими потерями?
3. Какие механизмы обуславливают диэлектрические потери, что такое мощность диэлектрических потерь и тангенс угла диэлектрических потерь?
4. Как зависят ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ от температуры, напряженности электрического поля?
5. Как работает схема высоковольтного моста для измерения C и $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов?
6. Почему необходима стандартизация измерений C и $\operatorname{tg} \delta$ конденсаторов?
7. Как рассчитать величину ϵ диэлектрического материала по измеренной емкости конденсатора?
8. Что представляют собой стеклотекстолит, текстолит, электрокерамика, конденсаторные и установочные стекла?

Библиографический список

1. **Богородицкий, Н. П.** Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с. (гл. 3; пп. 6.14, 6.16, 6.17).
2. **Казарновский, Д. М.** Испытания электроизоляционных материалов и изделий / Д. М. Казарновский, Б. М. Тареев. – Л. : Энергия, 1980. – 213 с. (введение, гл. 3).
3. **Бородулин, В. Н.** Диэлектрики / В. Н. Бородулин. – М. : Изд-во МЭИ, 1993. – 60 с. (гл. 3).

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ (ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ) НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Цель работы: определение диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ различных электроизоляционных материалов в зависимости от изменения частоты электрического поля, а также ознакомление с одним из стандартных методов определения этих диэлектрических характеристик.

Домашнее задание

Изучите:

- 1) физические основы и характерные черты различных видов поляризации диэлектриков на высоких частотах;
- 2) виды и физическую природу диэлектрических потерь;
- 3) влияние частоты электрического поля и температуры окружающей среды при испытании на величины ϵ и $\operatorname{tg} \delta$;
- 4) методику определения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ твердых электроизоляционных материалов на высоких частотах (выше 10 кГц) резонансным методом;
- 5) порядок проведения обработки результатов испытаний и оформления протокола по работе.

Описание лабораторной установки

В работе для определения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектриков на высоких частотах используется резонансный метод измерения емкости и добротности конденсаторов с помощью измерителя добротности (куметра).

Измерение основано на двукратной настройке в резонанс последовательного колебательного контура, содержащего образцовую катушку индуктивности L и конденсатор переменной емкости C (рис. 4, а).

Сначала, не подключая испытуемый конденсатор, изменением емкости C контур настраивают в резонанс, когда комплексное сопротивление

контура минимально, а реактивные составляющие общего сопротивления контура равны, то есть

$$\omega L = 1/(\omega C). \quad (16)$$

Резонанс фиксируют по максимальному показанию Q_1 проградуированного в единицах добротности вольтметра Q .

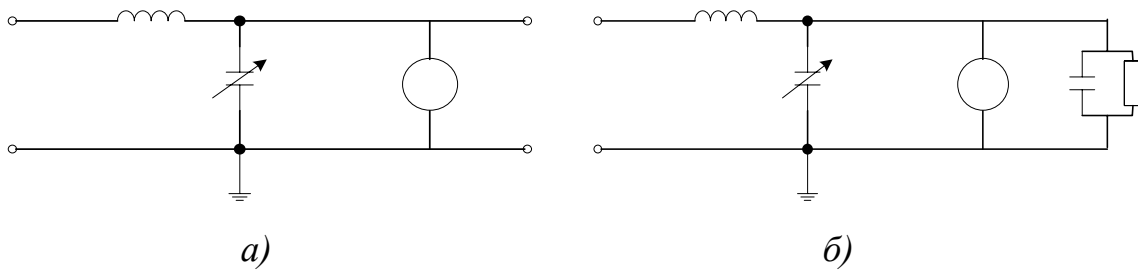


Рис. 4. Принципиальная схема измерительного колебательного контура куметра без подключенного образца (а) и с подключенным образцом (б)

Далее, испытуемый конденсатор, который может быть представлен в виде параллельной схемы замещения (C и R), включают параллельно емкости C (рис. 4, б). При неизменных частоте и индуктивности L контур вновь настраивают в резонанс. Теперь настройка контура производится изменением (уменьшением) переменной емкости C от величины C_1 до C_2 , так чтобы

$$C_1 = C_2 + C_x. \quad (17)$$

Значение добротности Q_2 , соответствующее резонансу в контуре с подключенным испытуемым конденсатором, меньше Q_1 из-за диэлектрических потерь в конденсаторе C_x .

Тангенс угла диэлектрических потерь испытуемого конденсатора $\text{tg } \delta$ рассчитывают по формуле

$$\text{tg } \delta = (Q_1 - Q_2)C_1 / [Q_1 Q_2 (C_1 - C_2)]. \quad (18)$$

где C_1 и Q_1 – значения емкости C и добротности контура Q в резонансе без образца соответственно; C_2 и Q_2 – то же с образцом.

Рабочее задание

1. При температуре 20 ± 5 °С на частоте 1 МГц определите ε и $\operatorname{tg} \delta$ образцов твердых диэлектриков по указанию преподавателя.
2. Рассчитайте погрешность определения ε и $\operatorname{tg} \delta$.
3. Снимите зависимости ε и $\operatorname{tg} \delta$ от частоты в диапазоне от 50 кГц до 10 МГц (1 – 12 точек по указанию преподавателя) для предложенных образцов диэлектриков.
4. Полученные зависимости представьте в виде графиков $\varepsilon = f_1(\lg \nu)$ и $\operatorname{tg} \delta = f_2(\lg \nu)$, где ν – частота электрического поля.
5. Сделайте письменные выводы по проведенной работе.
6. Выполните протокол проделанной работы.

Порядок проведения работы

Исследования образцов производят с помощью измерителя добротности Е4-7, предназначенного для эксплуатации в интервале частот от 50 кГц до 35 МГц.

Перед началом работы следует ознакомиться с прибором, комплектом образцовых катушек индуктивности, предлагаемыми образцами твердых электроизоляционных материалов, типовым рабочим заданием и указаниями преподавателя. Начинать работу можно только по разрешению преподавателя в следующем порядке.

1. Для подготовки прибора к работе тумблер питания включается в положение «СЕТЬ», при этом должна загореться сигнальная лампочка. Прибор будет готов к работе после 30-минутного прогрева.

2. Подготовьте образцы диэлектриков для испытаний. В случае необходимости проведите измерение геометрических размеров образцов и электродов.

3. После прогрева производят калибровку прибора, для чего, установив переключатель «Частота кГц/МГц» на требуемый поддиапазон, ручкой «Частота кГц/МГц» поставьте стрелку на нужную частоту. Переключатель « $\Delta Q - Q$ » поставьте в положение «Q», а тумблер «Измерение – калибровка $Q \nabla$ » – в положение «Калибровка $Q \nabla$ ». Ручкой «Калибровка $Q \nabla$ » стрелку измерительного прибора устанавливают точно на риску под знаком « ∇ ».

После этого тумблер «Измерение – калибровка QV » ставят в положение «Измерение». Прибор готов к измерениям.

4. Из комплекта катушек индуктивности подберите такую, которая может резонировать на частоте измерения (диапазон частот указан на катушке), и подключите её к клеммам L .

5. Настройте измерительный контур в резонанс. Для этого нажатиём кнопки « \leftrightarrow » изменяйте емкость конденсатора переменной емкости, добиваясь максимального значения Q . В случае необходимости нужно перейти на другой диапазон Q . Точную настройку контура в резонанс производят нониусным конденсатором. Проведите калибровку в соответствии с п. 3 *Порядка проведения работы*, зафиксируйте (запишите) полученные значения C_1 и Q_1 .

6. К клеммам « C_x » подключите исследуемый конденсатор. Контур вновь настройте в резонанс, произведите калибровку и зафиксируйте значения C_2 и Q_2 .

ВНИМАНИЕ! При работе на шкалах Q «300» и «1000» необходимо предварительно включить переключатель « $\Delta Q-Q$ » в положение « ΔQ » и ручкой «Нуль Q » установите стрелку указателя Q на отметку «0».

7. После выполнения всего объема испытаний для завершения работы необходимо выполнить следующие операции.

- 7.1. Снять катушку индуктивности и уложить её в контейнер.
- 7.2. Отключить образцы от прибора.
- 7.3. Получить разрешение преподавателя на окончание работы.
- 7.4. Выключить питание прибора тумблером «СЕТЬ».

Обработка результатов измерений

1. В случае использования плоских образцов диэлектрическая проницаемость может быть вычислена по формуле

$$\varepsilon = 14,4C_x h / D^2, \quad (19)$$

где h – толщина образца, см; D – диаметр измерительного электрода, см; C_x – емкость, пФ.

2. Расчет погрешностей измерения ε и $\operatorname{tg} \delta$ ведется по формулам

$$\frac{\Delta \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{(\Delta Q_1 + \Delta Q_2)}{(Q_1 - Q_2)} + \frac{\Delta C_1}{C_1} + \frac{(\Delta C_1 + \Delta C_2)}{(C_1 - C_2)} + \frac{\Delta Q_1}{Q_1} + \frac{\Delta Q_2}{Q_2}, \quad (20)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta C_X}{C_X} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{2\Delta D}{D}, \quad (21)$$

где $C_x = C_1 - C_2$ (22)

и $\Delta C_x = \Delta C_1 + \Delta C_2$. (23)

3. Графики зависимостей выполняют на миллиметровой бумаге.

Контрольные вопросы

1. Объясните методику проведения эксперимента.
2. Объясните, как изменятся полученные зависимости при изменении температуры окружающей среды.
3. Что такое диэлектрическая проницаемость (абсолютная, относительная, диэлектрическая проницаемость вакуума) и какова её зависимость от внешних факторов (температуры, частоты, напряженности электрического поля)?
4. Дайте характеристику быстрых и медленных видов поляризации диэлектриков.
5. Назовите виды диэлектрических потерь в полярных и неполярных диэлектриках.
6. Дайте характеристику исследованных материалов, опишите технологию их получения, основные свойства, области применения.

Библиографический список

1. **Богородицкий, Н. П.** Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с. (гл. 3; пп. 6.14, 6.16, 6.17).
2. **Казарновский, Д. М.** Испытания электроизоляционных материалов и изделий / Д. М. Казарновский, Б. М. Тареев. – Л. : Энергия, 1980. – 213 с. (введение, гл. 3).
3. **Бородулин, В. Н.** Диэлектрики / В. Н. Бородулин. – М. : Изд-во МЭИ, 1993. – 60 с. (гл. 3).

ПРИЛОЖЕНИЕ

В протоколе испытаний по ГОСТ 6433.1-71 – ГОСТ 6433.4-71 должны содержаться следующие данные:

- Описание материала (наименование, сорт, цвет, завод-изготовитель).
- Форма, размеры, количество и обработка образцов. Тип, размеры электродов.
- Условия подготовки образцов (предварительная сушка, увлажнение).
- Описание испытательной установки, схема установки.
- Условия испытания (температура, относительная влажность и т.д.).
- Величина и полярность приложенного напряжения (для $U_{пр}$ и $E_{пр}$).
- Метод измерения (при измерении ρ и ρ_s).
- Время выдержки перед измерением.
- Потенцированные средние значения десятичных логарифмов значений результатов измерений (при измерении ρ и ρ_s).
- Тангенс угла диэлектрических потерь (среднее значение, стандартное отклонение), число измерений C_x и $\text{tg } \delta_x$.
- Пробивное напряжение и средняя толщина каждого образца; среднее значение электрической прочности (МВ/м), стандартное отклонение и число образцов; способ подъема напряжения.
- Визуальные наблюдения при пробое и место пробоев (под электродом или около электрода).
- Расчет относительных погрешностей измеряемых величин (по ГОСТ 12635-67 ε и $\text{tg } \delta$ на высоких частотах).

Оглавление

Введение	3
Лабораторная работа № 1. Определение удельных электрических сопротивлений твердых диэлектриков (электроизоляционных материалов)	4
Лабораторная работа № 2. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков (электроизоляционных материалов) на частоте 50 Гц	13
Лабораторная работа № 3. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков (электроизоляционных материалов) на высоких частотах	19
Приложение	24

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ»

Составители

КОРОВКИН Андрей Венедиктович
СБИТНЕВ Станислав Александрович
СТАРОВЕРОВ Максим Николаевич

Редактор Р.С. Кузина
Корректор В.В. Гурова

Компьютерная верстка Е.Г. Радченко

ЛР № 020275. Подписано в печать 10.03.05.

Формат 60×84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать на ризографе. Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,42. Тираж 100 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.