Лабораторная работа № 7

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ, ОСНОВАННЫЕ НА ЯВЛЕНИИ АБСОРБЦИИ ЗАРЯДОВ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Изоляция установок высокого напряжения состоит, как правило, из нескольких диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями ε и удельными объемными сопротивлениями ρ_V. В таких случаях изоляция уже в силу конструктивных особенностей является неоднородной. При воздействии электрического поля в неоднородной изоляции происходит относительно медленная миграционная поляризация, которая в отличие от других видов поляризации обусловлена перемещением не связанных, а свободных зарядов. Вследствие миграционной поляризации на границах слоев разных диэлектриков образуются заряды абсорбции. С процессами накопления и растекания зарядов абсорбции связаны некоторые характерные явления, которые используются для контроля состояния изоляции.

В простейшем случае неоднородная изоляция состоит из двух слоев, каждый из которых характеризуется своим удельным объемным сопротивлением ρ и диэлектрической проницаемостью ε (рис. 7.1,*а*). Очевидная схема замещения такой изоляции показана на рис. 7.1,*б*, где $R_1 = \dfrac{\rho_1 d_1}{S}$ и $R_2 = \dfrac{\rho_2 d_2}{S}$ – сопротивления утечки соответствующих слоев в установившемся режиме; $C_1 = \dfrac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{d_1}$ и $C_2 = \dfrac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{d_2}$ – емкости этих слоев; S – площадь электродов.

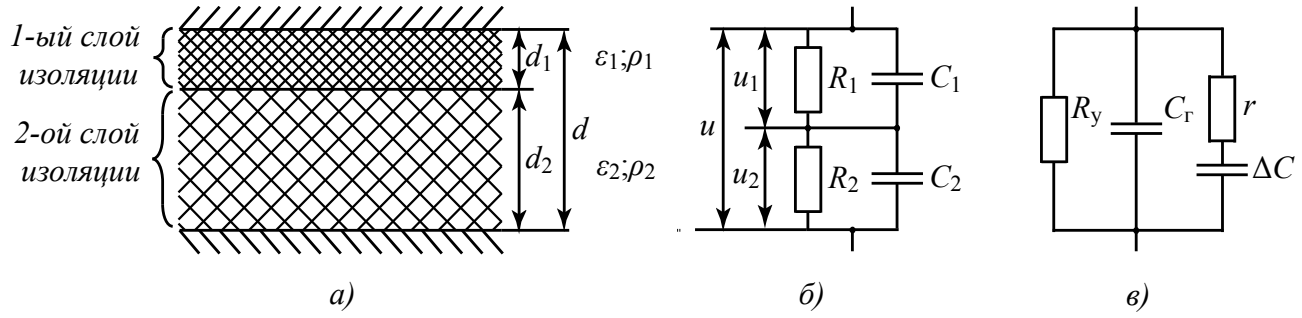


Рис. 7.1. Двухслойная изоляция (a) и схемы ее замещения ($б$ и $в$)

Пользуясь схемой замещения по рис. 7.1,*б* можно показать, что при воздействии на изоляцию постоянного напряжения U в установившемся режиме заряд на границе слоев, т.е. заряд абсорбции, будет равен:

$$q_{абс} = q_1 - q_2 = U_1C_1 - U_2C_2 = U\frac{C_1R_1 - C_2R_2}{R_1 + R_2} \tag{7.1}$$

Из этого выражения следует, что $q_{абс} \neq 0$ при условии $R_1C_1 \neq R_2C_2$ или, если воспользоваться приведенными выше выражениями для R_1, R_2, C_1 и C_2, при условии

$$\varepsilon_1\rho_1 \neq \varepsilon_2\rho_2 \tag{7.2}$$

Неравенство (7.2) есть условие существования миграционной поляризации, при которой $q_{абс} \neq 0$ и двухслойная изоляция является неоднородной.

Для анализа явлений в неоднородной изоляции, используемых для контроля ее состояния, иногда применяют схему замещения по рис. 7.1,*в*, на которой $R_у = R_1 + R_2$ – сопротивление утечки всей изоляции в установившемся режиме; $C_Г = \dfrac{C_1C_2}{C_1 + C_2}$ – геометрическая емкость изоляции, определяемая лишь ее размерами и диэлектрическими проницаемостями слоев.

В схеме рис. 7.1,*в* накопление заряда абсорбции $q_{абс}$ происходит на емкости ΔC, включенной последовательно с сопротивлением r. Из условия равенства полных сопротивлений двух схем замещения следует:

$$r = \frac{R_1R_2(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)^2}{(R_1C_1 - R_2C_2)^2};\ \Delta C = \frac{(R_1C_1 - R_2C_2)^2}{(R_1 + R_2)^2(C_1 + C_2)} \tag{7.3}$$

Согласно (7.3) в случае однородной изоляции, когда $R_1C_1 = R_2C_2$ или $\rho_1\varepsilon_1 = \rho_2\varepsilon_2$, сопротивление $r = \infty$ и емкость $\Delta C = 0$, т.е. схема замещения на рис. 7.1,*в* включает лишь $R_у$ и $C_г$, и заряд абсорбции не образуется, что согласуется с (7.1).

В случае многослойной изоляции схемы замещения будут иметь вид, показанный на рис. 7.2. Следует обратить внимание на то, что при числе слоев *n* число элементов r_i и ΔC_i в схеме 7.2,*б* равно *n*-1, по числу границ между слоями, на которых могут накапливаться заряды абсорбции.

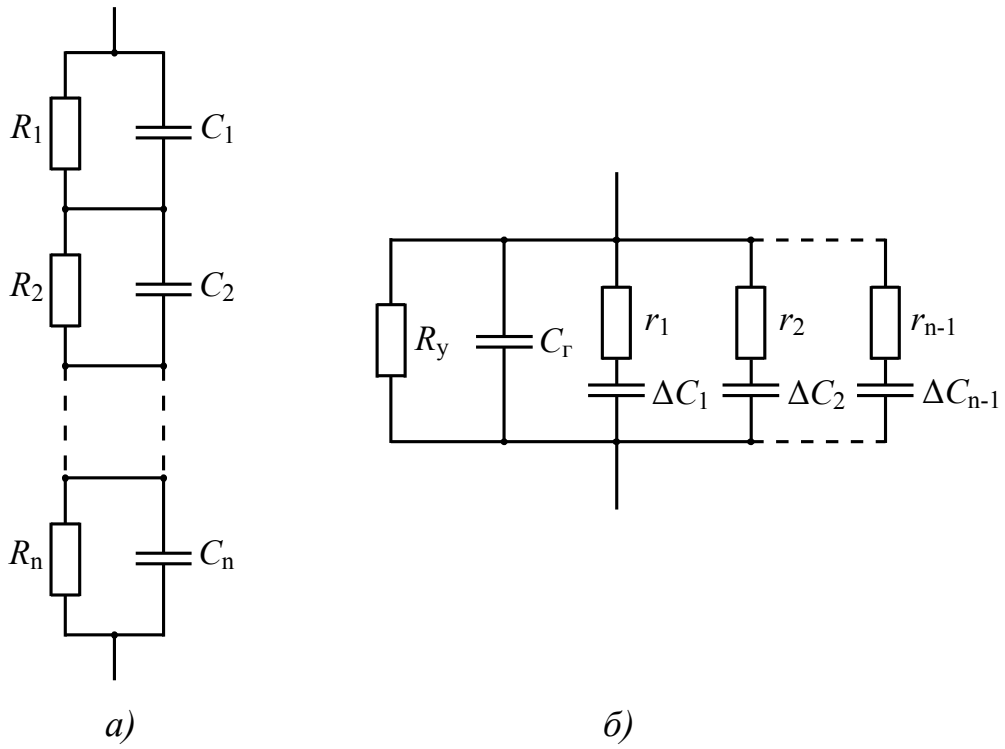


Рис. 7.2. Схемы замещения многослойной изоляции (*n* слоев)

$$R_y = \sum_1^n R_i; \ \frac{1}{C_Г} = \sum_1^n \frac{1}{C_i}$$

С накоплением заряда абсорбции $q_{абс}$ связаны следующие явления, используемые для контроля состояния изоляции:

– возвратное напряжение;

– саморазряд;

– зависимость от времени тока зарядки $i_{зар}$ емкости изоляции;

– зависимость от времени тока разрядки $i_{раз}$ емкости изоляции.

Возвратное напряжение. О степени неоднородности изоляции можно судить на основании следующего опыта. После длительной выдержки под постоянным напряжением изоляцию отсоединяют от источника и кратковременно (доли секунды) замыкают ее электроды. В случае однородной изоляции при этом происходит "мгновенная" и полная нейтрализация всех зарядов. Если же изоляция неоднородная, то нейтрализуются лишь заряды на геометрической емкости, а заряд абсорбции сохраняется практически полностью.

Пока электроды замкнуты, емкости слоев изоляции C_1 и C_2 соединены параллельно. В это время заряд абсорбции распределяется по емкостям C_1 и C_2, заряжая их до одинакового по значению напряжения $U_{абс} = q_{абс}/(C_1 + C_2)$. После размыкания электродов емкости C_1 и C_2 вновь соединены последовательно, причем заряжены до одного и того же напряжения $U_{абс}$, но разной полярности. Поэтому в момент размыкания электродов суммарное напряжение на изоляции остается равным нулю. Затем емкости C_1 и C_2 разряжаются на сопротивления утечки своих слоев, причем с разными постоянными времени, так как для неоднородной изоляции $R_1C_1 \neq R_2C_2$. В результате на изоляции появляется напряжение, которое и называется возвратным (рис. 7.3,*а)*. Для двухслойной изоляции с учетом (7.1) выражение для напряжения $U_{возвр}$ имеет вид:

$$U_{возвр} = U_{абс}(e^{-\frac{t}{R_1C_1}} - e^{-\frac{t}{R_2C_2}}) = U_0 \frac{R_1C_1 - R_2C_2}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)}(e^{-\frac{t}{R_1C_1}} - e^{-\frac{t}{R_2C_2}}) \qquad (7.4)$$

где U_0 – напряжение источника.

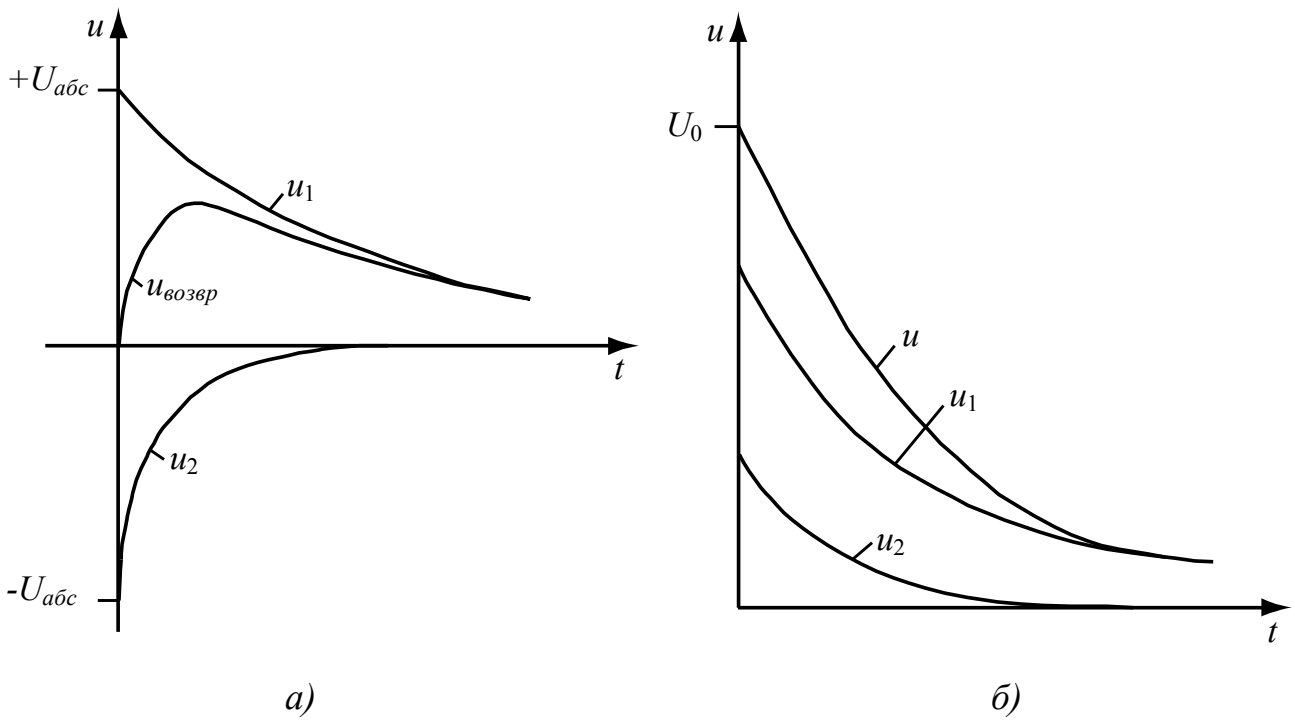


Рис. 7.3. Изменение во времени возвратного напряжения (a) и напряжения саморазряда (*б*)

Чем больше неоднородность изоляции, тем выше максимальное значение возвратного напряжения и тем больше различаются скорости его подъема и спада.

Описанное выше явление возвратного напряжения в эксплуатации для контроля состояния изоляции используется редко, так как соответствующие опыты требуют значительных затрат времени. Однако это явление имеет важное практическое значение. Возвратное напряжение представляет серьезную опасность для персонала при проведении испытаний изоляции с приложением высокого постоянного напряжения. Возможность его появления должна обязательно учитываться при выборе мер, обеспечивающих безопасное проведение испытаний.

Явление саморазряда. При длительном приложении к изоляции постоянного напряжения U_0 последнее распределяется по слоям пропорционально сопротивлениям утечки слоев. В установившемся режиме на первом слое напряжение будет $U_1 = U_0 R_1 / (R_1 + R_2)$, на втором

$U_2 = U_0 R_2 / (R_1 + R_2)$. После отсоединения изоляции от источника напряжения емкости C_1 и C_2 разряжаются на сопротивления утечки своих слоев. В результате напряжение на изоляции снижается (рис. 7.2,*б*) в соответствии с выражением

$$u = \frac{U_0}{R_1 + R_2}(R_1 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} + R_2 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}) \qquad (7.5)$$

Саморазряд имеет место и в случае однородной изоляции. Чем быстрее снижается напряжение на изоляции в процессе саморазряда, тем, очевидно, больше проводимости ее слоев.

Зависимость от времени токов $i_{зар}(t)$ *и* $i_{раз}(t)$. Из схемы замещения рис.7.2,*в* следует, что при подключении неоднородной изоляции к источнику постоянного напряжения U_0 ток зарядки $i_{зар}(t)$ (без учета кратковременного тока заряда геометрической емкости $C_г$) изменяется во времени в соответствии с выражением

$$i_{зар}(t) = \frac{U_0}{R_y} + U_0 \sum_{1}^{n-1} \frac{1}{r_i} e^{-\frac{t}{r_i \Delta C_i}} \qquad (7.6)$$

При замыкании электродов изоляции после длительного воздействия напряжения U_0 ток разрядки (без учета кратковременного тока разрядки геометрической емкости $C_г$) будет соответствовать выражению

$$i_{разр}(t) = U_0 \sum_{1}^{n-1} \frac{1}{r_i} e^{-\frac{t}{r_i \Delta C_i}} \qquad (7.7)$$

Из формул (7.4) – (7.7) следует, что все рассматриваемые характеристики неоднородности изоляции, обусловленные наличием заряда абсорбции, имеют параметры, жестко связанные с удельными электрическими свойствами изоляции. Поэтому измерение и анализ этих характеристик может дать полезную информацию о состоянии изоляции, например, о числе слоев с разными свойствами, об удельных параметрах этих слоев. Формально все абсорбционные характеристики содержат практически одинаковую информацию об изоляции. Однако техника их измерения и методика анализа получается разная.

Для измерения абсорбционных характеристик изоляции к настоящему времени разработаны и используются (пока в ограниченных масштабах) специальные приборы, например, прибор KDO-1 (Германия) для измерения возвратного напряжения или ЦИТА (Россия) для измерения тока зарядки.

Наиболее простым и самым распространенным способом использования абсорбционных характеристик для контроля изоляции является измерение сопротивления изоляции $R(t)$, как функции времени. Измерения проводят с помощью мегаомметров. Сопротивление $R(t)$ при этом определяется на основании соотношения (закона Ома)

$$R(t) = U_0 / i_{зар}(t)$$

где U_0 – жестко заданное, стабилизированное значение напряжения, приложенного к изоляции. Таким образом, сопротивление $R(t)$ есть величина обратная току зарядки $i_{зар}(t)$, поэтому содержит ту же информацию о состоянии изоляции, что и зависимость от времени тока зарядки $i_{зар}(t)$.

С учетом (7.6) для неоднородной изоляции зависимость от времени сопротивления $R(t)$ имеет вид, показанный на рис. 7.4.

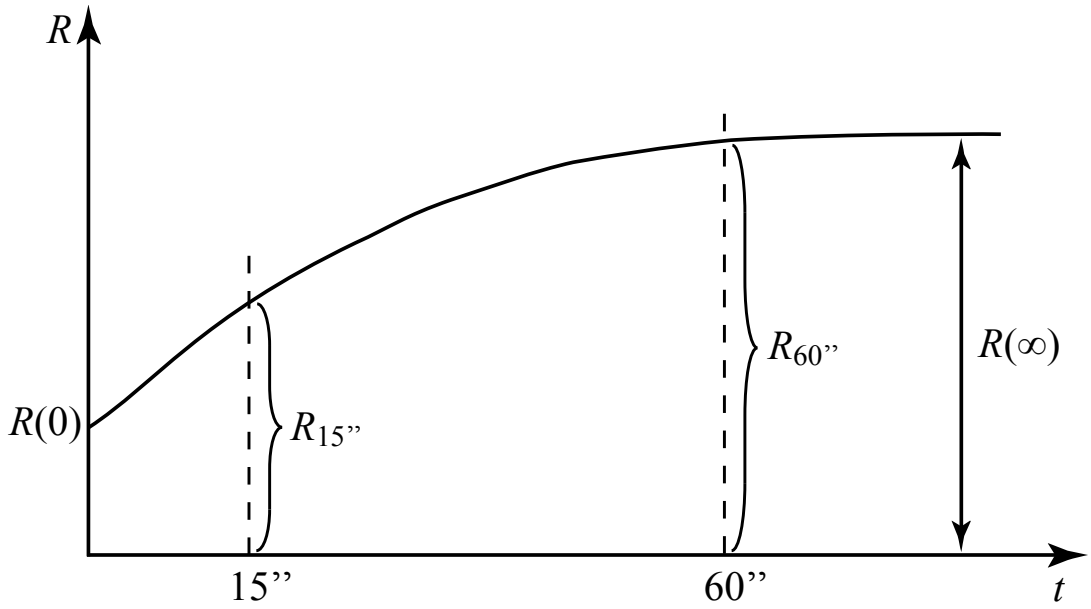


Рис. 7.4. Изменение во времени измеренного значения сопротивления R неоднородной изоляции

$$\frac{1}{R_{изм}(0)} = \frac{1}{R_y} + \sum_{1}^{n-1} \frac{1}{r_i}; \; R_{изм}(\infty) = R_y$$

У нас в стране и в европейских странах принято сопротивление изоляции измерять через 15 и 60 секунд после подачи напряжения. Заключение о качестве изоляции делается по значениям $R_{60''}$ (отсчет через 60 с) и коэффициента абсорбции $k_{абс} = R_{60''}/R_{15''}$.

Для изоляции в нормальном состоянии характерны высокие значения $R_{60''}$ (не менее 1 МОм на 1 кВ номинального напряжения) и $k_{абс} > 1{,}3$. В случае увлажнения значение $R_{60''}$ резко падает, а значение коэффициента $k_{абс}$ приближается к 1,0. Последнее обстоятельство объясняется тем, что из-за значительного уменьшения постоянной времени T уже к первому отсчету, т.е. через 15 с, достигается значение $R(t)$, близкое к установившемуся.

Сопротивление любого вида внутренней изоляции сильно зависит от температуры. С повышением температуры сопротивление изоляции снижается. Поэтому для величины $R_{60''}$ устанавливают разные допустимые значения для разных температур. Например, для изоляции обмоток ВН силовых трансформаторов до 35 кВ мощностью до 10 МВА сопротивления должны быть не ниже следующих значений:

Температура обмотки, °С	10	20	30	40	50	60	70
$R_{60''}$, МОм	450	300	200	130	90	60	40

Измерения сопротивления изоляции оборудования высокого напряжения проводят при напряжении U_0 = 2500 В.

Упрощенная блок-схема современного цифрового мегаомметра показана на рис. 7.5. Основными элементами мегаомметра являются: стабилизированный источник высокого напряжения ИВН (при значительных отклонениях от номинала напряжения в питающей сети 220 В, напряжение U_0 (2500 или 1000 В) изменяется не более, чем на ±1%); шунт $R_ш$, по которому при измерениях протекает ток i_x (или ток зарядки $i_{зар}(t)$). Падение напряжения $\Delta U_ш = i_x \cdot R_ш$ на шунте подается на цифровой измерительный провод ЦИП, который измеряет значение $\Delta U_ш$, подсчитывает измеряемое сопротивление

$R_x = U_0 / i_x = U_0 \Big/ \left(\dfrac{\Delta U_ш}{R_ш} \right)$ и сохраняет результат в памяти. Блок управления БУ подает команды на включение выключателя В (начало измерений) и затем на измерения значений R_x через каждые 5 с, в том числе $R_{15''}$ и $R_{60''}$. По окончании измерений подсчитывается значение коэффициента абсорбции $k_{абс} = R_{60''} / R_{15''}$ и на экране индикатора выводятся значения $R_{15''}$, $R_{60''}$ и $k_{абс}$. Резистор R_1 ограничивает до определенного уровня значения тока i_x при $R_x = 0$.

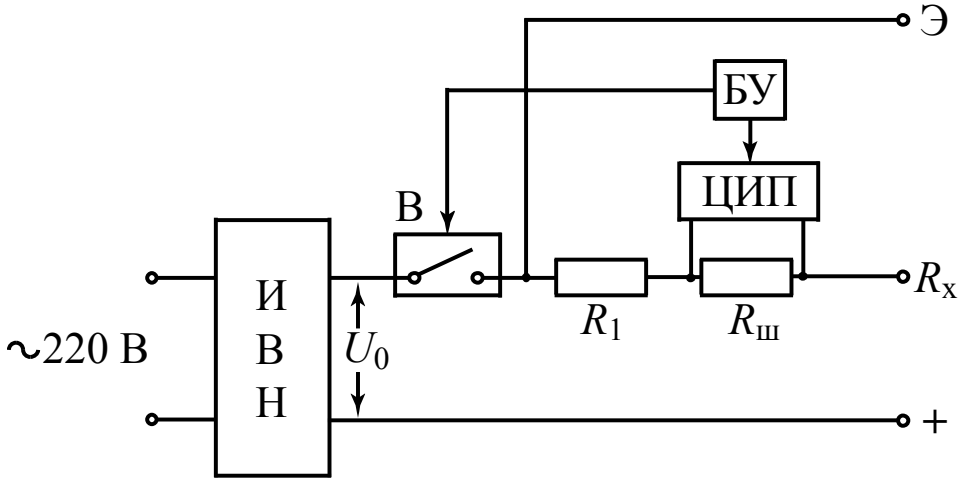


Рис. 7.5. Блок-схема цифрового мегаомметра

Назначение экрана Э поясним на примере измерения сопротивления изоляции обмотки ВН относительно земли у двухобмоточного трансформатора (см. рис. 7.6). Если измерения проводятся без использования экрана Э, то при заземлении выводов обмотки низшего напряжения (рис. 7.6,*а*) сопротивления $R_{ВН}$ и $R_{ВН-НН}$ оказываются включенными параллельно и вместо значения $R_{ВН}$ будет измерено сопротивление $\dfrac{R_{ВН} \cdot R_{ВН-НН}}{R_{ВН} + R_{ВН-НН}}$. При незаземленных выводах обмотки низшего напряжения (рис. 7.6,*б*) параллельно сопротивлению $R_{ВН}$ оказываются подключенными последовательно соединенные $R_{ВН-НН}$ и $R_{НН}$. Таким образом, в обоих случаях будут получены ошибочные результаты.

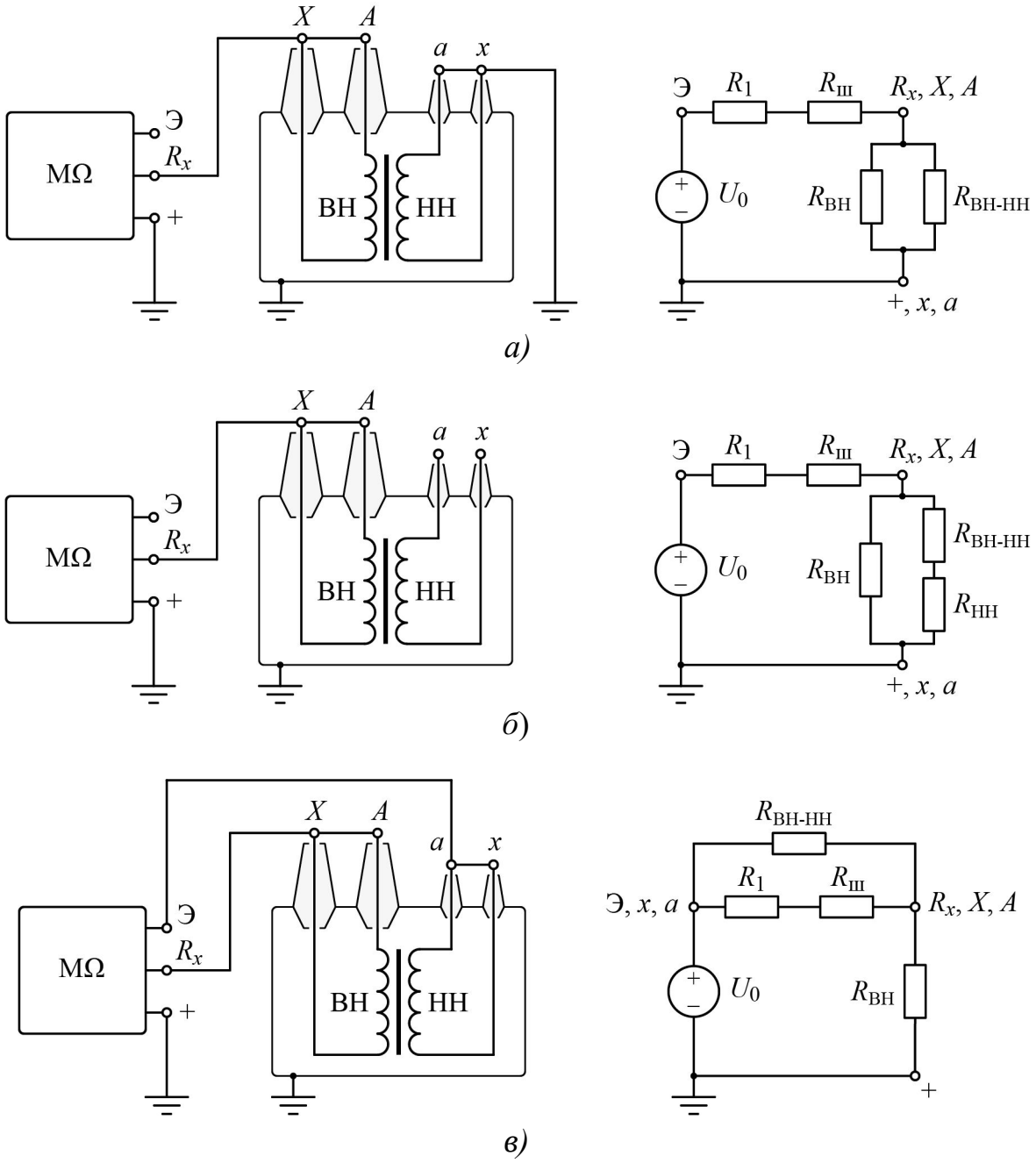


Рис. 7.6. Схемы измерения сопротивления $R_{ВН}$ изоляции обмотки ВН относительно земли и соответствующие электрические схемы замещения

а) без использования экрана, выводы НН заземлены;

б) без использования экрана, выводы НН не подключены;

в) с использованием экрана.

При измерении $R_{ВН}$ по схеме рис. 7.6,*в* с использованием экрана Э, обмотка НН приобретает практически такой же потенциал, как и обмотка ВН, так как

падение напряжения на сопротивлениях R_1 и $R_ш$, равное $i_x(R_1 + R_ш)$, много меньше U_0. По этой причине ток через сопротивление $R_{ВН-НН}$ будет равен практически нулю, сопротивления $R_{ВН-НН}$ и $R_{НН}$ не будут оказывать влияния на результат измерения сопротивления $R_{ВН}$.

При необходимости повторения измерений $R_{15''}$ и $R_{60''}$ необходимо сделать паузу между измерениями 3-5 мин, чтобы успели полностью нейтрализоваться накопившиеся при предыдущих измерениях заряды абсорбции.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И ОБЪЕКТОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ

К основному оборудованию установки относится источник регулируемого постоянного высокого напряжения, используемый для снятия кривых саморазряда и возвратного напряжения (рис. 7.7). Он включает в себя повышающий трансформатор *Тр* (например, типа НОМ-16), выпрямитель *Д*, регулятор напряжения *РН*, переключатель высокого напряжения *П* и электростатический киловольтметр (например, типа С-96 или С-196).

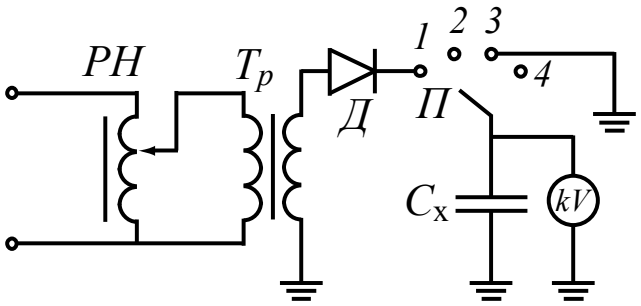


Рис. 7.7. Схема установки для определения кривых возвратного напряжения и саморазряда

При определении кривой возвратного напряжения переключатель *П* предварительно устанавливается в положение *1* и емкость испытуемой изоляции C_x заряжается в течение 2-3 мин до заданного напряжения. Затем переключатель

П с импульсными контактами быстро переводится из положения *1* в положение *4,* так чтобы при прохождении переключателя через положение *3* успела разрядиться только геометрическая емкость изоляции.

При определении кривой саморазряда испытуемая изоляция предварительно заряжается в течение 2-3 мин. После этого переключатель *П* переводится в положение *2* из положения *1*.

Сопротивление изоляции измеряется мегаомметром с напряжением 2500 В. Подробные указания о работе с мегаомметром приведены в Приложении. Объектом обследования служит трехфазный трансформатор напряжения.

ЗАДАНИЕ НА ПРЕДВАРИТЕЛЬНУЮ ПОДГОТОВКУ

Используя формулы, приведенные в разделе "Предварительные сведения", рассчитать сопротивления $R_{15"}$ и $R_{60"}$, а также коэффициенты абсорбции $k_{абс} = R_{60"}/R_{15"}$ для двух случаев:

двухслойная изоляция в нормальном состоянии – R_1 = 1,0 МОм; C_1 = 32,4 мкФ; R_2 = 100 МОм; C_2 = 3,6 мкФ;

двухслойная изоляция в увлажненном состоянии – R_1 = 1,67 МОм; C_1 = 32,4 мкФ; R_2 = 1,67 МОм; C_2 = 3,6 мкФ.

ЗАДАНИЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ

1. Перед началом работы ознакомиться со схемой установки, на которой будут выполняться измерения, с расположением отдельных элементов схемы.

Изучить инструкции по работе с измерительными приборами, используемыми в данной установке, и инструкцию по технике безопасности.

2. Измерить и построить зависимость от времени возвратного напряжения для бакелитового конденсатора, предварительно заряженного до напряжения U = 7,5 кВ.

Дать заключение о степени неоднородности изоляции.

3. Измерить зависимость напряжения саморазряда для бакелитового конденсатора, заряженного до напряжения U = 7,5 кВ.

Полученную зависимость построить в полулогарифмическом масштабе, т.е. в виде $\lg U = f(t)$, и по ее линейному участку определить удельное объемное сопротивление слоя изоляции, полагая ε = 4,5.

4. Измерить с помощью мегаомметра для трансформатора напряжения сопротивления $R_{15''}$, $R_{60''}$ и коэффициент абсорбции $k_{абс} = R_{60''}/R_{15''}$ изоляции обмотки ВН относительно земли:

1-ое измерение – обмотка НН заземлена, экран Э не используется;

2-ое измерение – (после паузы 3-5 мин) обмотка НН не заземлена, экран Э присоединен к обмотке НН.

Сравнить и объяснить полученные результаты.

5. Измерить с помощью мегаомметра для трансформатора напряжения сопротивления $R_{15''}$, $R_{60''}$ и коэффициент абсорбции $k_{абс} = R_{60''}/R_{15''}$ изоляции обмотки НН относительно земли:

1-ое измерение – обмотка ВН заземлена, экран Э не используется;

2-ое измерение – (после паузы 3-5 мин) обмотка ВН не заземлена, экран Э присоединен к обмотке ВН.

Сравнить и объяснить полученные результаты.

Приложение

Инструкция по работе с мегаомметром

Перед началом измерений преподаватель выполняет следующие действия:

– подключает щупы к зажимам "+", "Rx", "Э" мегаомметра в соответствии с маркировкой;

– подключает мегаомметр к сети переменного тока 220 В;

– щупы подключает к измеряемому объекту.

Выполнение измерений.

– Нажмите и отпустите кнопку "ИЗМЕР 2500 В".

При этом включается подсветка индикатора, на экране индикатора появляется надпись "Меню", текущее время (часы, минуты) и дата (число, месяц, год).

– Отпустите и снова нажмите кнопку "ИЗМЕР 2500 В" и не отпускайте ее.

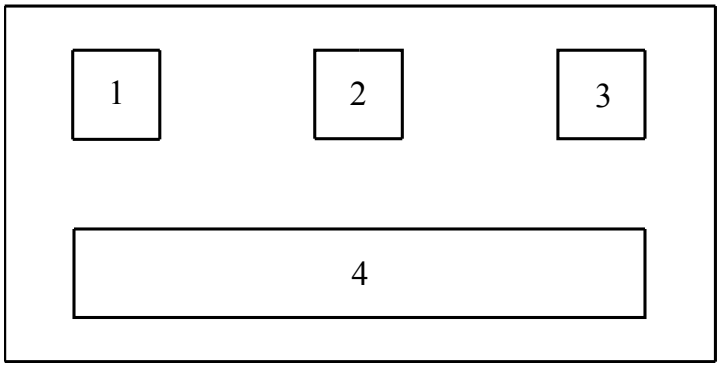
При этом на экране индикатора появятся циклически сменяющиеся названия режимов работы прибора ("Начало цикла измерений", "Вывод результатов", "Выход из меню").

– Отпустите кнопку во время сообщения "Начало цикла измерений".

При этом на экране индикатора появится надпись "Прибор входит в указанный режим и готов к использованию".

– Нажмите кнопку "ИЗМЕР 2500 В" и удерживайте ее нажатой в течение всего измерения.

При этом на экране последовательно появятся надписи: "Начало цикла измерений", "Меню", "Измерения", "Внимание! Высокое включено". После этого на экран выводится следующая информация:



где 1 – текущее время в секундах;

2 – порядковый номер измерения;

3 – значение рабочего напряжения в В, кВ;

4 – текущее значение измеряемого сопротивления.

В конце измерения на экран выводится следующая информация:

где 5 – конечное время измерения, с;

6 – значение коэффициента абсорбции $k_{абс} = R_{60"} / R_{15"}$;

7 – значение измеренного сопротивления $R_{60"}$.

После окончания измерения кнопку "ИЗМЕР 2500 В" отпустить.

Для повторения измерения нажать и удерживать кнопку "ИЗМЕР 2500 В", дождаться режима "Начало цикла измерений" и отпустить ее.

Повторно нажать эту кнопку и удерживать ее до конца измерения.