

## 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  $\varepsilon$  и удельными объемными сопротивлениями  $\rho_v$ . 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  $\rho$  и диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  (рис. 7.1,а). Очевидная

схема замещения такой изоляции показана на рис. 7.1,б, где  $R_1 = \frac{\rho_1 d_1}{S}$  и

$R_2 = \frac{\rho_2 d_2}{S}$  – сопротивления утечки соответствующих слоев в установившемся

режиме;  $C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 S}{d_1}$  и  $C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2 S}{d_2}$  – емкости этих слоев;  $S$  – площадь электродов.

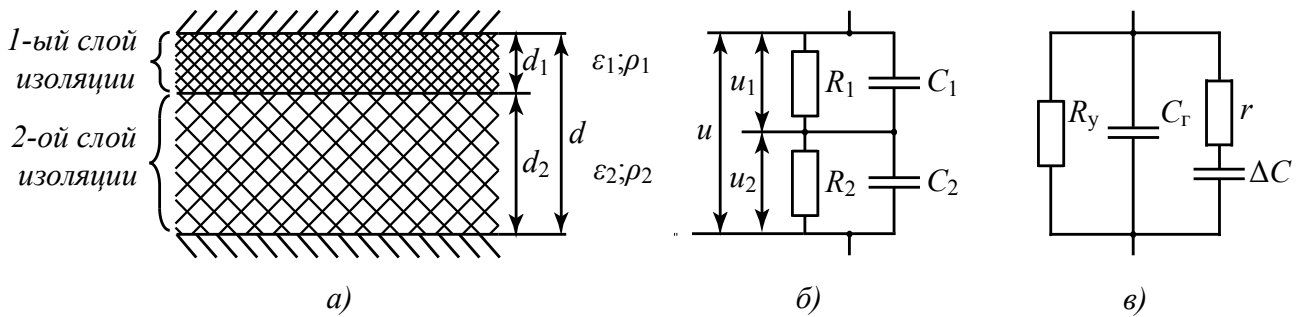


Рис. 7.1. Двухслойная изоляция (а) и схемы ее замещения (б и в)

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:

$$q_{abc} = q_1 - q_2 = U_1 C_1 - U_2 C_2 = U \frac{C_1 R_1 - C_2 R_2}{R_1 + R_2} \quad (7.1)$$

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

$$\varepsilon_1 \rho_1 \neq \varepsilon_2 \rho_2 \quad (7.2)$$

Неравенство (7.2) есть условие существования миграционной поляризации, при которой  $q_{abc} \neq 0$  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  $R_y = R_1 + R_2$  – сопротивление утечки всей изоляции в установившемся режиме;

$C_\Gamma = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$  – геометрическая емкость изоляции, определяемая лишь ее размерами и диэлектрическими проницаемостями слоев.

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

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

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  $R_y$  и  $C_r$ , 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  $\Delta C_i$  в схеме 7.2,б равно  $n-1$ , по числу границ между слоями, на которых могут накапливаться заряды абсорбции.

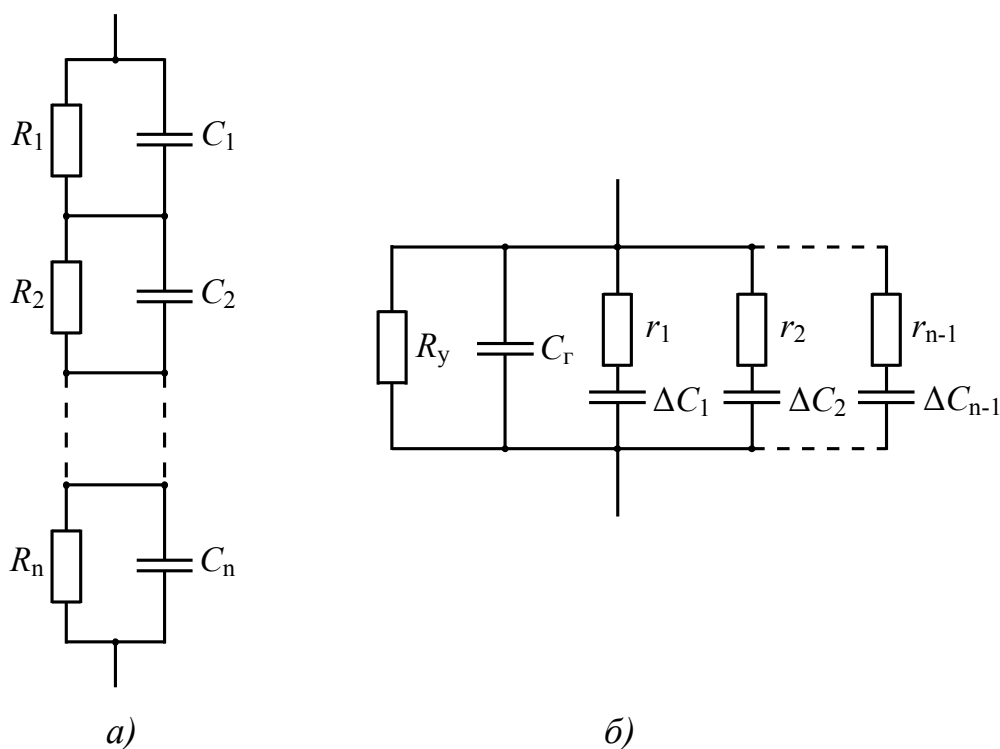


Рис. 7.2. Схемы замещения многослойной изоляции ( $n$  слоев)

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

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  $U_{abc} = q_{abc} / (C_1 + C_2)$ . После размыкания электродов емкости  $C_1$  и  $C_2$  вновь соединены последовательно, причем заряжены до одного и того же напряжения  $U_{abc}$ , 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  $R_1 C_1 \neq R_2 C_2$ . 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:

$$U_{возвр} = U_{abc} (e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}) = U_0 \frac{R_1 C_1 - R_2 C_2}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)} (e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}) \quad (7.4)$$

где  $U_0$  – напряжение источника.

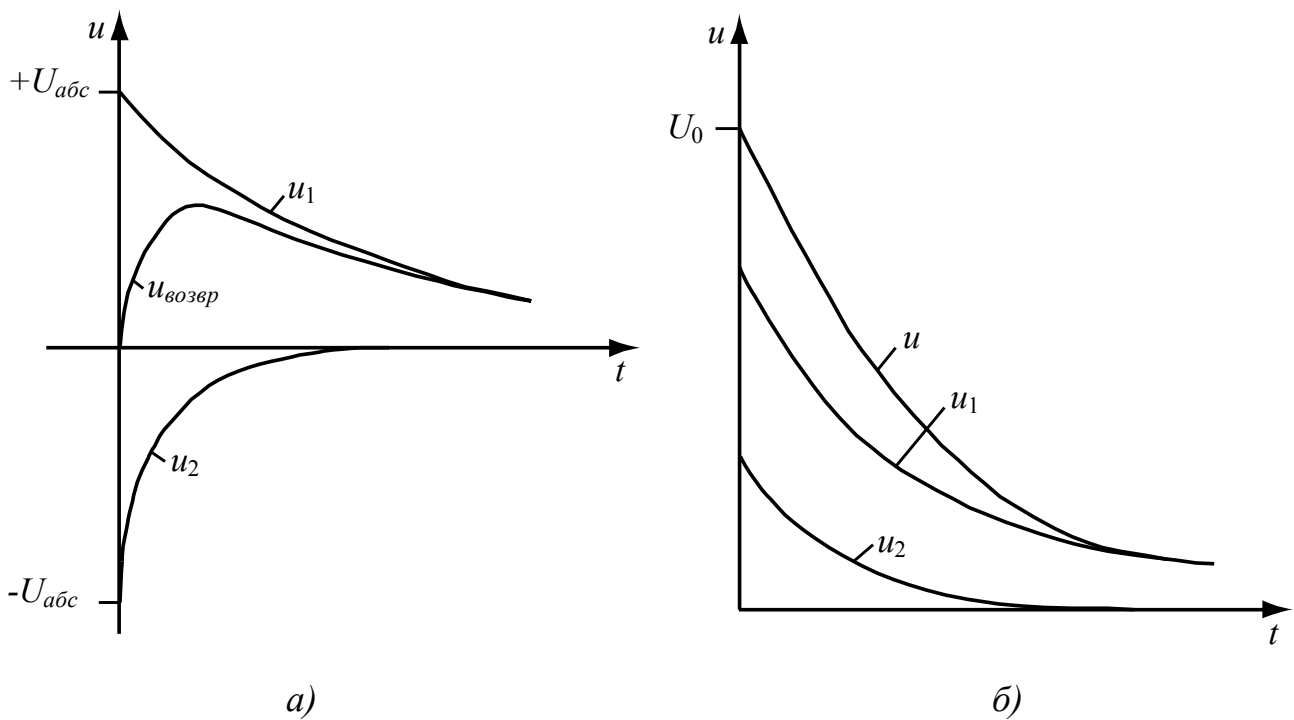


Рис. 7.3. Изменение во времени возвратного напряжения (а) и напряжения саморазряда (б)

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 применением 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

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

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  $i_{zap}(t)$  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  $i_{zap}(t)$  (без учета кратковременного тока заряда геометрической емкости  $C_2$ ) изменяется во времени в соответствии с выражением

$$i_{zap}(t) = \frac{U_0}{R_y} + U_0 \sum_1^{n-1} \frac{1}{r_i} e^{-\frac{t}{r_i \Delta C_i}} \quad (7.6)$$

При замыкании электродов изоляции после длительного воздействия напряжения  $U_0$  ток разрядки (без учета кратковременного тока разрядки геометрической емкости  $C_2$ ) будет соответствовать выражению

$$i_{раз}(t) = U_0 \sum_1^{n-1} \frac{1}{r_i} e^{-\frac{t}{r_i \Delta C_i}} \quad (7.7)$$

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 КДО-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)

$$R(t) = U_0 / i_{zap}(t)$$

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

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

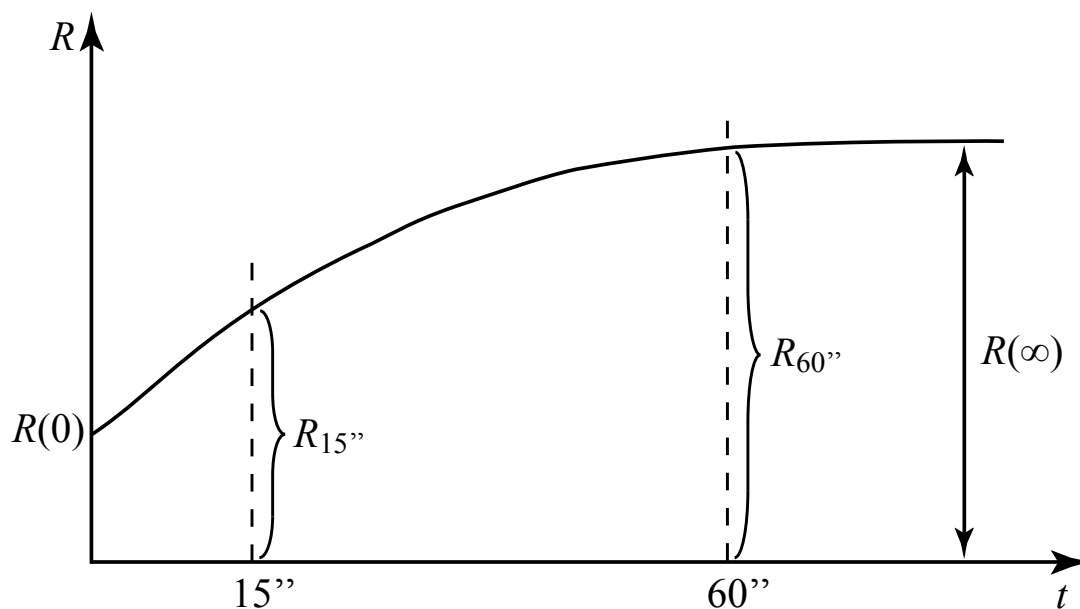


Рис. 7.4. Изменение во времени измеренного значения сопротивления  $R$  неоднородной изоляции

$$\frac{1}{R_{изм}(0)} = \frac{1}{R_y} + \sum_1^{n-1} \frac{1}{r_i}; \quad R_{изм}(\infty) = R_y$$

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  $k_{abc} = R_{60''}/R_{15''}$ .

Для изоляции в нормальном состоянии характерны высокие значения  $R_{60''}$  (не менее 1 МОм на 1 кВ номинального напряжения) и  $k_{abc} > 1,3$ . В случае увлажнения значение  $R_{60''}$  резко падает, а значение коэффициента  $k_{abc}$  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  $\pm 1\%$ ); 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



$R_x = U_0 / i_x = U_0 / \left( \frac{\Delta U_u}{R_u} \right)$  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  $k_{abc} = R_{60''} / R_{15''}$  и на экране индикатора выводятся значения  $R_{15''}$ ,  $R_{60''}$  и  $k_{abc}$ . Резистор  $R_1$  ограничивает до определенного уровня значения тока  $i_x$  при  $R_x = 0$ .

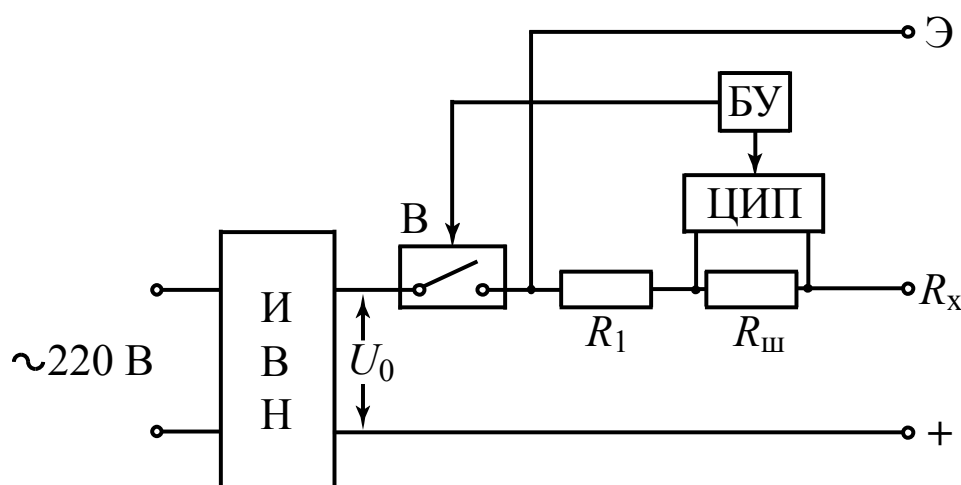
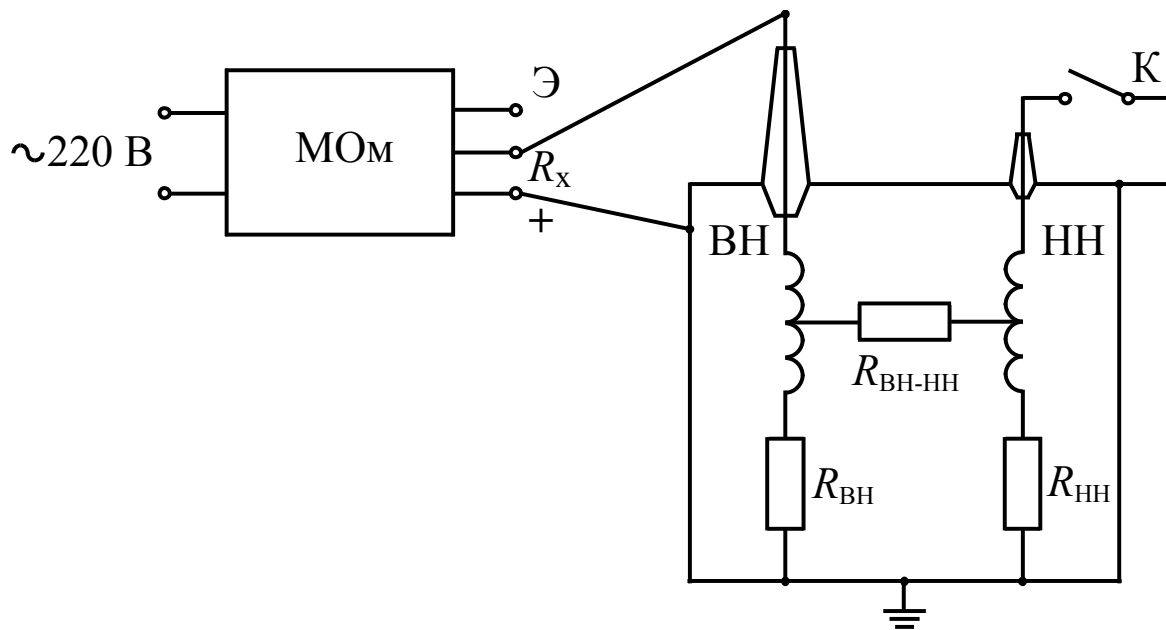
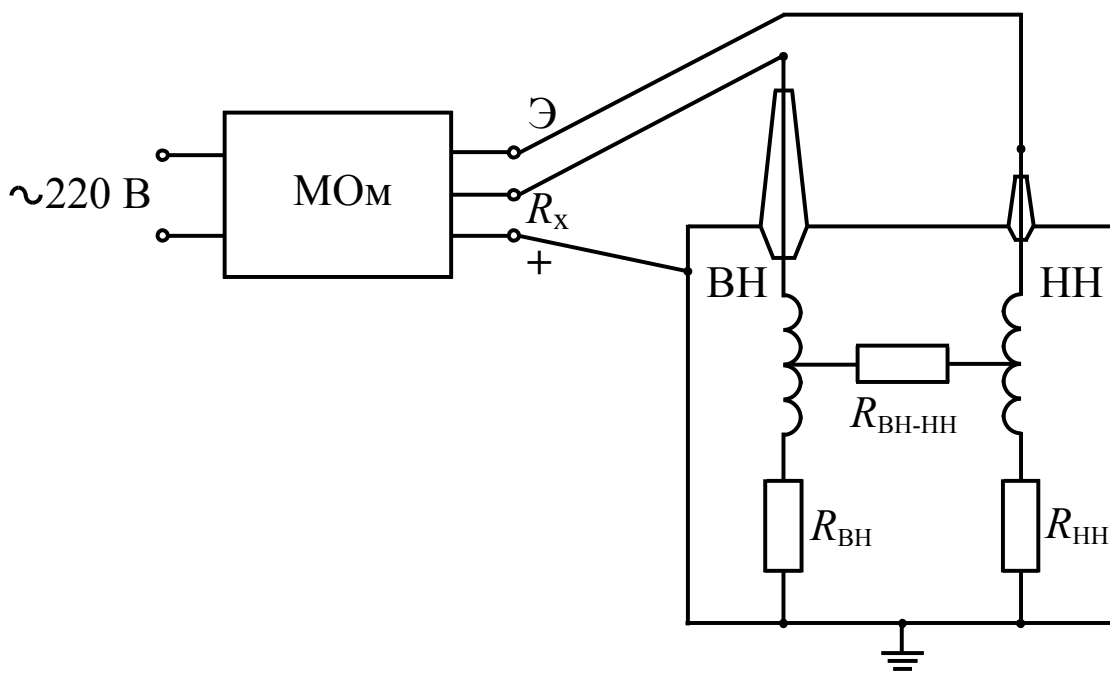


Рис. 7.5. Блок-схема цифрового мегаомметра

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 вторичной обмотки (ключ  $K$  на рис. 7.6,а замкнут) сопротивления  $R_{ВН}$  и  $R_{ВН-НН}$  оказываются включенными параллельно и вместо значения  $R_{ВН}$  будет измерено сопротивление  $\frac{R_{ВН} \cdot R_{ВН-НН}}{R_{ВН} + R_{ВН-НН}}$ . При незаземленной вторичной обмотке (ключ  $K$  на рис. 7.6,а разомкнут) параллельно сопротивлению  $R_{ВН}$  оказываются подключенными последовательно соединения  $R_{ВН-НН}$  и  $R_{НН}$ . Таким образом, в обоих случаях будут получены ошибочные результаты.



а)



б)

Рис. 7.6. Схемы измерения сопротивления  $R_{BH}$  изоляции обмотки ВН относительно земли:

- а) без использования экрана;
- б) с использованием экрана.

При измерении  $R_{BH}$  по схеме рис. 7.6,б 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  $Tr$  (например, типа НОМ-16), выпрямитель  $Д$ , регулятор напряжения  $РН$ , переключатель высокого напряжения  $П$  и электростатический киловольтметр (например, типа С-96 или С-196).

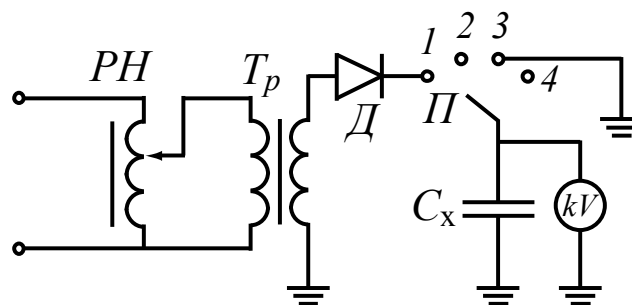


Рис. 7.7. Схема установки для определения кривых возвратного напряжения и саморазряда

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

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

При определении кривой саморазряда испытываемая изоляция предварительно заряжается в течение 2-3 мин. После этого переключатель *II* 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  $k_{abc} = R_{60''}/R_{15''}$  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  $\varepsilon = 4,5$ .

4. Измерить с помощью мегаомметра для трансформатора напряжения сопротивления  $R_{15''}$ ,  $R_{60''}$  и коэффициент абсорбции  $k_{abc} = R_{60''}/R_{15''}$  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  $k_{abc} = R_{60''}/R_{15''}$  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.

## 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.

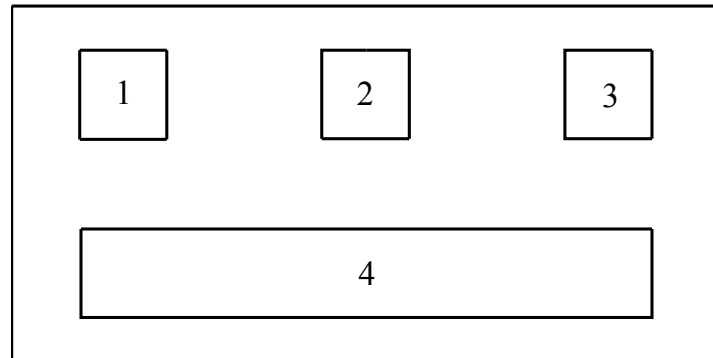
При этом на экране индикатора появятся циклически сменяющиеся названия режимов работы прибора ("Начало цикла измерений", "Вывод результатов", "Выход из меню").

- 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  $k_{a\bar{a}c} = R_{60''}/R_{15''}$  ;

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.