

## Оценка сопротивления высоковольтной изоляции с помощью анализа кривых саморазряда

СЕРЕБРЯКОВ А.С., СЕМЕНОВ Д.А.

Высоковольтная изоляция, как правило, содержит несколько диэлектриков с разными электрическими характеристиками, что делает ее неоднородной. В неоднородной изоляции в начальный период после включения постоянного напряжения сквозной ток утечки сопровождается поляризационными токами, создающими на границах раздела диэлектриков поглощенные заряды – заряды абсорбции. Ток утечки и сопротивление изоляции следует измерять спустя некоторое время после приложения напряжения, когда закончатся переходные процессы и все токи абсорбции спадают до нуля. Установившееся значение сопротивления изоляции является одним из важнейших критериев для ее оценки. В России таким временем считается 1 мин, а в США – 10 мин. Экспериментальные исследования показывают, что токи абсорбции не всегда спадают до нуля через 60 с, и в этом случае измеренное значение сопротивления изоляции  $R_{60}$  не является установившимся. Десятиминутное значение сопротивления изоляции является более объективным критерием, однако для его измерения многие из существующих измерительных приборов не предназначены. Рассмотрена методика ускоренного определения десятиминутного значения сопротивления изоляции с использованием разработанного авторами прибора на примере измерения параметров изоляции масляного распределительного трансформатора типа ТМ-25/10/0,4. На основе полученных параметров создается математическая модель изоляции и расчетные процессы в ней сравниваются с экспериментальными. Дан алгоритм уточнения параметров модели быстро сходящимся итерационным методом. Процесс измерения составляет 2 мин.

Ключевые слова: высоковольтная неоднородная изоляция, электропроводность диэлектриков, заряд абсорбции, ток утечки, сопротивление изоляции

Электроизоляционные материалы, применяемые в технике, не являются идеальными диэлектриками в связи с присущей им небольшой электропроводностью. В технических диэлектриках всегда в небольшом объеме содержатся свободные заряды, которые под действием электрического поля создают слабые по значению сквозные токи проводимости или токи утечки. Наличие токов утечки сопровождается выделением и нейтрализацией зарядов на электродах, между которыми расположен диэлектрик [1].

Особенностью высоковольтной изоляции является то, что она, как правило, содержит не один, а несколько диэлектриков с разными электрическими характеристиками, что делает ее неоднородной. Совокупность нескольких диэлектриков называют системой изоляции (СИ). В дальнейшем в изложении под термином «изоляция» будем понимать именно систему изоляции.

Известно, что в высоковольтной изоляции в начальный период после включения постоянного напряжения появление сквозного тока утечки сопровождается поляризационными токами [1]. Токи поляризации обусловлены неоднородностью структуры элементов системы изоляции, за счет чего на границах раздела диэлектриков с разными электрическими характеристиками накапливаются поглощенные заряды – заряды абсорбции. Поляриза-

онные токи создают так называемый ток абсорбции. Таким образом, полный ток в изоляции равен сумме токов утечки и абсорбции:

$$i = I_y + i_{аб} = I_y + \sum_{k=1}^m i_{абk} = I_y + \sum_{k=1}^m i_{аб \max k} e^{-t/\tau_k}, \quad (1)$$

где  $I_y$  – сквозной ток утечки (ток проводимости);  $i_{аб}$  – результирующий ток абсорбции;  $i_{абk}$  – экспоненциальные составляющие тока абсорбции;  $\tau_k$  – постоянная времени  $k$ -й экспоненциальной составляющей тока абсорбции;  $i_{аб \max k}$  – максимальное значение  $k$ -й экспоненциальной составляющей тока абсорбции в начальный момент времени заряда изоляции при  $t=0$ ;  $m$  – число затухающих экспонент при заряде изоляции от источника постоянного напряжения. Сопротивление изоляции после приложения напряжения определяют по формуле

$$R = \frac{U}{i} = \frac{U}{I_y + \sum_{k=1}^m i_{аб \max k} e^{-t/\tau_k}}, \quad (2)$$

где  $U$  – приложенное напряжение.

Поскольку ток абсорбции со временем уменьшается, сопротивление изоляции при этом возрастает. По завершении переходного процесса в установившемся режиме в СИ протекает только ток сквозной проводимости  $I_y$ .

Токи абсорбции необходимо принимать во внимание при измерении сопротивления изоляции, так как при небольшой выдержке изоляции под напряжением в процессе ее заряда регистрируется не только сквозной ток, но и сопровождающие его токи абсорбции. Вследствие этого может создаться неправильное представление о большом значении проводимости изоляции и ее малом электрическом сопротивлении.

Сопротивление изоляции всех электротехнических изделий и устройств используется в качестве важнейшего критерия их работоспособности. Во всех технических нормативах приводятся значения изоляции или тока утечки при заданном напряжении. Истинное значение сопротивления системы изоляции, определяемое только сквозным током утечки  $I_y$  и называемое сопротивлением изоляции, определяется по формуле

$$R_{из} = U / I_y. \quad (3)$$

Следовательно, ток утечки и сопротивление изоляции нужно измерять спустя некоторое время после приложения напряжения, когда закончатся переходные процессы и все токи абсорбции уменьшатся до нуля. Обычно считают, что переходные процессы при заряде изоляции заканчиваются через 60 с (или через 1 мин) после приложения напряжения. Поэтому за ток утечки согласно «Правилам устройства электроустановок» и «Правилам технической эксплуатации...» [2] принимают ток, измеренный через 1 мин после приложения напряжения. Его обозначают  $i_{60}$  и называют одноминутным значением тока утечки. Соответствующее ему значение сопротивления изоляции  $R_{60}$  также называют одноминутным:

$$R_{60} = U / i_{60}. \quad (4)$$

Для того чтобы оценить значения не только тока утечки, но и тока абсорбции, протекающего в переходном режиме, измеряют полный ток утечки и сопротивление изоляции через 15 с после приложения напряжения, когда суммарный ток абсорбции еще не успевает уменьшиться до нуля. Сопротивление изоляции, измеренное через 15 с после приложения напряжения, называют пятнадцатисекундным значением сопротивления изоляции и обозначают  $R_{15}$ . Соответствующий ток утечки обозначают  $i_{15}$ . Отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к пятнадцатисекундному значению называют коэффициентом абсорбции:

$$K_{аб} = \frac{R_{60}}{R_{15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}}. \quad (5)$$

В США сопротивление изоляции измеряют через 1 мин и через 10 мин [1]. В качестве установившегося значения принимают десятиминутное значение сопротивления изоляции, а вместо коэффициента абсорбции вводят индекс поляризации  $P_1$  как отношение десятиминутного значения сопротивления изоляции к ее одноминутному значению:

$$P_1 = R_{600} / R_{60}. \quad (6)$$

Экспериментальные исследования, проведенные авторами, показывают, что токи абсорбции не всегда спадают до нуля через 60 с [3–5]. Даже в устройствах небольшой мощности спустя 1 мин после приложения напряжения они весьма заметны. В этом случае измеренное одноминутное сопротивление изоляции  $R_{60}$  не является установившимся значением. Таким образом, десятиминутное значение сопротивления изоляции является более объективным критерием оценки состояния изоляции, чем одноминутное. В то же время для измерения десятиминутного значения многие из существующих измерительных приборов не предназначены. Поэтому задачи определения десятиминутного значения сопротивления изоляции за более короткое время и объективной оценки параметров изоляции являются актуальными.

Рассмотрим предлагаемую методику ускоренного определения десятиминутного значения сопротивления изоляции с использованием разработанного авторами прибора на примере измерения параметров изоляции масляного распределительного трансформатора типа ТМ-25/10/0,4 мощностью 25 кВА, напряжениями 10/0,4 кВ.

Разработанный авторами измерительный прибор в первом цикле заряда изоляции в течение 1 мин измеряет ток в изоляции при воздействии на нее тестового напряжения 2500 В. По значениям тока определяется сопротивление изоляции, начиная с 4-й секунды через 1 с до 60 с. Измеренная зависимость сопротивления от времени приведена на рис. 1. Значение сопротивления  $R_{60}$  составило 380 МОм. Как видно из рис. 1, переходный процесс через 60 с еще не заканчивается, и установившееся значение сопротивления изоляции будет существенно больше 380 МОм. Затем испытуемый объект отключается от источника напряжения, и во втором цикле, названном циклом саморазряда, изоляция в течение 1 мин разряжается на собственное сопротивление утечки. В этом цикле измеряется напряжение саморазряда изоляции  $u_c$ . Как показано в [5–9], напряжение саморазряда является важным параметром, по которому можно определить остаточный ресурс изоляции трансформаторов. Экспериментальная зависимость этого напряжения от времени приведена на рис. 2.

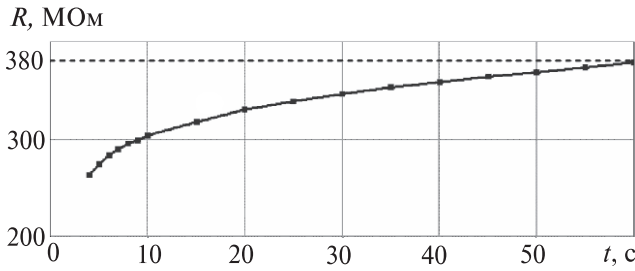


Рис. 1. Зависимость сопротивления изоляции от времени

Кривая напряжения саморазряда (рис. 2) может быть представлена суммой затухающих экспонент. Следовательно, математическая модель многослойной высоковольтной изоляции для процесса саморазряда при допущении, что сопротивление вольтметра равно бесконечности, представляется в виде суммы затухающих экспонент с разными постоянными времени:

$$u_c = \sum_{k=1}^n A_k e^{-t/T_k}, \quad (7)$$

где  $n$  – число слоев изоляции;  $A_k$  – постоянная величина для  $k$ -го слоя, называемая постоянной интегрирования и равная напряжению на  $k$ -м слое изоляции в начальный момент времени процесса саморазряда;  $T_k = R_k C_k$  – постоянная времени  $k$ -го слоя изоляции, равная произведению сопротивления  $k$ -го слоя на значение электрической емкости этого слоя;  $t$  – текущее время.

По экспериментальной зависимости можно определить ее экспоненциальные составляющие. В случае, если значения постоянных времени заранее не известны, то задача определения их становится неоднозначной и результаты аналитического решения системы нелинейных уравнений будут зависеть от начальных приближений. Однако для корпусной изоляции масляного трансформатора, как показано в [5, 6], число затухающих экспонент, которые реально можно наблюдать, не превышает трех. Причем значения их постоянных времени будут заметно отличаться друг от друга. Поэтому можно считать, что к 60-й секунде остается только одна самая медленная экспонента  $u_1$ , параметры которой легко определить. Вычитая из результирующей кривой самую медленную вычисленную экспоненту, получаем меньшую сумму экспонент, которые затухают за время, значительно меньшее 60 с. Предполагая, что в конце полученной кривой остается только самая медленная из оставшихся экспонент  $u_2$ , определяем ее параметры. Далее поступаем подобным же образом, пока не будет рассчитана экспонента  $u_1$  с самой малой постоянной времени. Возможны и другие методы определения экспонент с использованием современных компьютерных математических интегрированных пакетов.

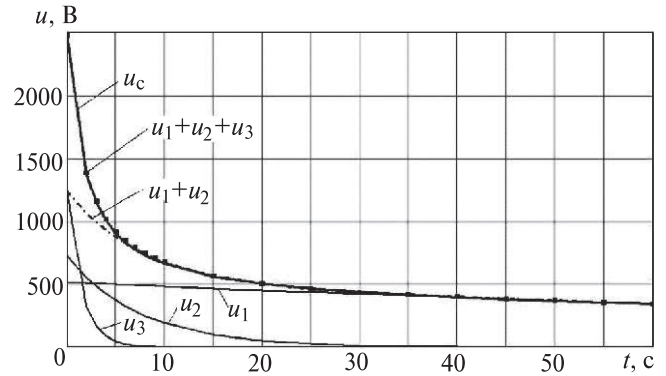


Рис. 2. Зависимости напряжения саморазряда  $u_c$  и его составляющих  $u_1, u_2, u_3$  от времени

Численный анализ кривой саморазряда на рис. 2 показал, что она действительно содержит три затухающих экспоненты: медленную  $u_1$ , среднюю  $u_2$  и быструю  $u_3$ , постоянные времени которых заметно отличаются и составляют соответственно 150, 7,5 и 1,5 с. Следовательно, напряжение саморазряда можно записать как

$$u_c = U_{c1(0)} e^{-t/T_1} + U_{c2(0)} e^{-t/T_2} + U_{c3(0)} e^{-t/T_3} = 521e^{-t/150} + 731e^{-t/7,5} + 1248e^{-t/1,5}, \quad (8)$$

где  $U_{c1(0)} = A_1, U_{c2(0)} = A_2, U_{c3(0)} = A_3$  – напряжения на первых трех слоях изоляции в начальный момент времени процесса саморазряда.

В соответствии с полученным результатом на рис. 3 приведена схема замещения изоляции масляного трансформатора как трехзвенная RC-цепочка. Такая модель изоляции согласуется с физическими представлениями о системе изоляции масляного трансформатора, состоящей из трех диэлектриков: бумажной изоляции обмоток, картонных барьеров и трансформаторного масла.

Зная параметры схемы замещения изоляции (рис. 3), можно рассчитать сопротивление изоляции через 10 мин следующим образом.

По определенным выше значениям параметров математической модели процесса саморазряда, входящим в (8), можно найти в первом приближении параметры схемы замещения, считая, что переходный процесс заряда изоляции закончился через одну минуту.

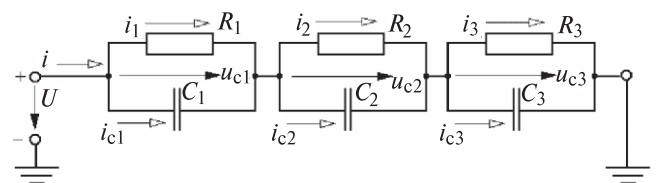


Рис. 3. Трехслойная схема замещения корпусной изоляции масляного трансформатора

Напряжения на слоях в конце стадии заряда изоляции или в начале стадии саморазряда, которая начинается вслед за стадией заряда через 60 с после начала процесса заряда изоляции, прямо пропорциональны сопротивлениям слоев. Следовательно, при принятом выше допущении сопротивления слоев будут равны:

$$R_1 = \frac{U_{c1(0)} R_{60}}{\sum_{k=1}^3 U_{ck(0)}} = \frac{521 \cdot 380}{2500} = 79 \text{ МОм};$$

$$R_2 = \frac{U_{c2(0)} R_{60}}{\sum_{k=1}^3 U_{ck(0)}} = 111 \text{ МОм};$$

$$R_3 = \frac{U_{c3(0)} R_{60}}{\sum_{k=1}^3 U_{ck(0)}} = 190 \text{ МОм};$$

Емкости слоев при этом определяются как

$$C_1 = \frac{T_1}{R_1} = \frac{150}{79 \cdot 10^6} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_2 = \frac{T_2}{R_2} = 0,068 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_3 = \frac{T_3}{R_3} = 0,008 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

В действительности же, как видно из рис. 1, процесс заряда изоляции через 60 с еще не заканчивается, и поэтому полученные выше в первом приближении параметры необходимо корректировать, что и будет выполнено далее после расчета процесса заряда и саморазряда с полученными выше параметрами.

Рассмотрим, как будут протекать процессы в трехслойной изоляции с определенными выше параметрами при ее заряде и саморазряде. Процессы в схеме, показанной на рис. 3, при заряде изоляции описываются следующими двумя уравнениями:

уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа

$$u = u_{c1} + u_{c2} + u_{c3} \quad (11)$$

или после дифференцирования

$$\frac{du_{c1}}{dt} + \frac{du_{c2}}{dt} + \frac{du_{c3}}{dt} = 0; \quad (12)$$

уравнением, составленным по первому закону Кирхгофа

$$i = i_1 + i_{c1} = i_2 + i_{c2} = i_3 + i_{c3} = \frac{u_{c1}}{R_1} + C_1 \frac{du_{c1}}{dt} = \frac{u_{c2}}{R_2} + C_2 \frac{du_{c2}}{dt} = \frac{u_{c3}}{R_3} + C_3 \frac{du_{c3}}{dt}. \quad (13)$$

Из уравнения (13) видно, что ток заряда можно выразить через напряжение на первом элементе изоляции и его производную. Напряжение на первом элементе определим по формуле

$$u_{c1} = u_{c1y} + u_{c1св} = u_{c1y} + \sum_{k=1}^m A_k e^{p_k t}. \quad (14)$$

Число корней характеристического уравнения  $m$  и сами корни  $p_k$  определим из характеристического уравнения, приравняв операторное сопротивление схемы замещения на рис. 3 нулю:

$$Z(p) = \frac{R_1 \frac{1}{pC_1}}{R_1 + \frac{1}{pC_1}} + \frac{R_2 \frac{1}{pC_2}}{R_2 + \frac{1}{pC_2}} + \frac{R_3 \frac{1}{pC_3}}{R_3 + \frac{1}{pC_3}} =$$

$$= \frac{R_1}{R_1 pC_1 + 1} + \frac{R_2}{R_2 pC_2 + 1} + \frac{R_3}{R_3 pC_3 + 1} = 0. \quad (15)$$

При составлении операторного сопротивления для заряда изоляции считаем, что внутреннее сопротивление источника напряжения равно нулю. Из уравнения (15) получим квадратное уравнение

$$ap^2 + bp + c = 0, \quad (16)$$

где  $a = R_1 T_2 T_3 + R_2 T_1 T_3 + R_3 T_1 T_2$ ;  
 $b = R_1 (T_2 + T_3) + R_2 (T_1 + T_3) + R_3 (T_1 + T_2)$ ;  
 $c = R_1 + R_2 + R_3$ .

Решая (16), получаем два корня характеристического уравнения:  $p_1 = -8,356 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $p_2 = -0,19 \text{ с}^{-1}$  и, соответственно, две постоянных времени:  $\tau_1 = -\frac{1}{p_1} = 119,7 \text{ с}$  и  $\tau_2 = -\frac{1}{p_2} = 5,272 \text{ с}$ .

Следовательно, напряжения на слоях изоляции при ее заряде будут равны:

$$u_{c1} = u_{c1y} + u_{c1св} = u_{c1y} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t};$$

$$u_{c2} = u_{c2y} + u_{c2св} = u_{c2y} + A_3 e^{p_1 t} + A_4 e^{p_2 t}; \quad (17)$$

$$u_{c3} = u_{c3y} + u_{c3св} = u_{c3y} + A_5 e^{p_1 t} + A_6 e^{p_2 t}.$$

Для момента времени  $t=0$

$$A_1 + A_2 = u_{c1(0)} - u_{c1y};$$

$$A_3 + A_4 = u_{c2(0)} - u_{c2y}; \quad (18)$$

$$A_5 + A_6 = u_{c3(0)} - u_{c3y}.$$

Недостающие три уравнения для определения шести неизвестных постоянных интегрирования получим следующим образом. Из уравнения (12) для момента времени  $t=0$  получим:

$$p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 + p_4 A_4 + p_5 A_5 + p_6 A_6 = 0. \quad (19)$$

Оставшиеся два уравнения выразим из равенства (13), учитывая, что

$$\begin{aligned} \frac{du_{c1}}{dt} &= A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}; \\ \frac{du_{c2}}{dt} &= A_3 p_1 e^{p_1 t} + A_4 p_2 e^{p_2 t}; \\ \frac{du_{c3}}{dt} &= A_5 p_1 e^{p_1 t} + A_6 p_2 e^{p_2 t}. \end{aligned} \quad (20)$$

Из уравнений (20) для момента времени  $t=0$ :

$$\begin{aligned} i_{c1(0)} - i_{c2(0)} &= C_1 p_1 A_1 + C_1 p_2 A_2 - C_2 p_1 A_3 - \\ &- C_2 p_2 A_4 = \frac{u_{c2(0)}}{R_2} - \frac{u_{c1(0)}}{R_1}; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} i_{c2(0)} - i_{c3(0)} &= C_2 p_1 A_3 + C_2 p_2 A_4 - C_3 p_1 A_5 - \\ &- C_3 p_2 A_6 = \frac{u_{c3(0)}}{R_3} - \frac{u_{c2(0)}}{R_1}. \end{aligned} \quad (22)$$

Запишем уравнения (19), (18), (21), (23) в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} p_1 & p_2 & p_1 & p_2 & p_1 & p_2 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ C_1 p_1 & C_1 p_2 & -C_2 p_1 & -C_2 p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_2 p_1 & C_2 p_2 & -C_3 p_1 & -C_3 p_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{c1(0)} - U_{c1y} \\ U_{c2(0)} - U_{c2y} \\ U_{c3(0)} - U_{c3y} \\ \frac{U_{c2(0)}}{R_2} - \frac{U_{c1y}}{R_1} \\ \frac{U_{c3(0)}}{R_3} - \frac{U_{c2y}}{R_2} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Установившиеся значения напряжений на конденсаторах  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ , считая, что процесс установился через 60 с после начала зарядки, пропорциональные сопротивлениям слоев изоляции, взяты из формулы (8):  $U_{c1y} = 521$  В,  $U_{c2y} = 731$  В,  $U_{c3y} = 1248$  В. Напряжения на конденсаторах в начальный момент времени найдем из условия, что при  $t=0$  последовательно включенные конденсаторы в результате так называемой «некорректной коммутации» «мгновенно» заряжаются от источника напряжения. Поскольку конденсаторы соединены последовательно, через них проходит один и тот же зарядный ток и заряды на всех конденсаторах равны. Напряжения же на конденсаторах будут обратно пропорциональны значениям их емкостей. Следовательно, значения напряжений на конденсаторах в первый момент времени будут определяться следующими выражениями:

$$\begin{aligned} U_{c1(0)} &= \frac{UC_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1} = 9,273 \text{ В}; \\ U_{c2(0)} &= \frac{UC_1 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1} = 260,576 \text{ В}; \\ U_{c3(0)} &= \frac{UC_1 C_2}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_3 C_1} = 2230 \text{ В}. \end{aligned} \quad (24)$$

Решая уравнение (23) в интегрированном пакете MathCad с приведенными выше значениями напряжений, получаем значения постоянных интегрирования для напряжений на конденсаторах в виде вектора

$$A = \begin{pmatrix} -503,21 \\ -7,246 \\ 191,72 \\ -661,408 \\ 311,498 \\ 668,654 \end{pmatrix}.$$

Следовательно, напряжения на слоях изоляции в процессе ее заряда будут равны:

$$\begin{aligned} u_{c1} &= 521 - 503,218e^{p_1 t} - 7,246e^{p_2 t}; \\ u_{c2} &= 731 - 191,72e^{p_1 t} - 661,408e^{p_2 t}; \\ u_{c3} &= 1248 - 311,498e^{p_1 t} - 668,654e^{p_2 t}. \end{aligned} \quad (25)$$

На рис. 4 показаны кривые напряжения на слоях конденсаторов, рассчитанные по формулам (25) при заряде изоляции в течение 10 мин. Кривая  $u_{c1}$  для наглядности отмечена квадратиками, отмечены также значения на слоях изоляции через 60 с после начала ее заряда. Из рис. 4 видно, что напряжения на слоях изоляции на 60-й секунде не соответствуют значениям, входящим в формулы (25) и определенным экспериментально. Напряжение на первом слое оказывается 215 вместо 521 В, на втором

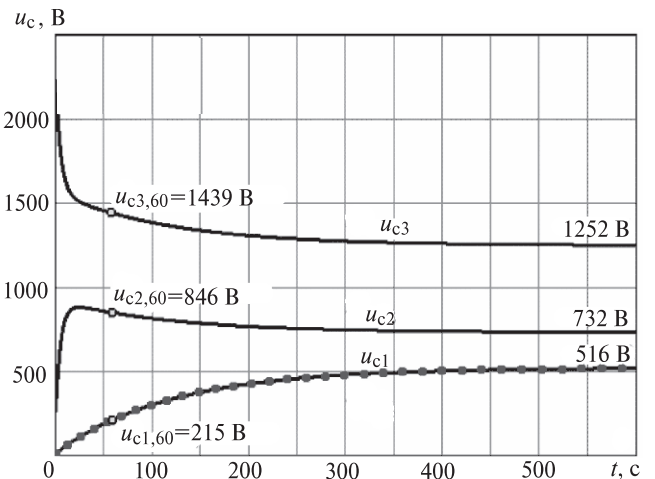


Рис. 4. Зависимости напряжений на слоях конденсаторов, рассчитанные по (25); значения сопротивлений слоев взяты равными:  $R_1 = 79$  МОм,  $R_2 = 111$  МОм,  $R_3 = 190$  МОм

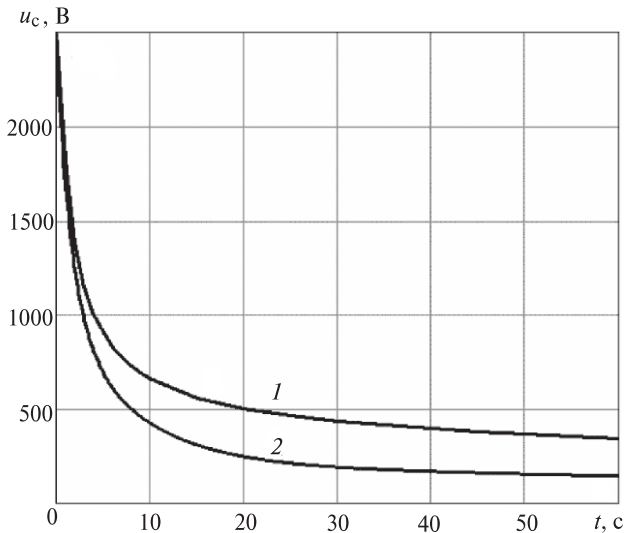


Рис. 5. Экспериментальная (1) и расчетная (2) кривые напряжения саморазряда

слое 846 вместо 731 В и на третьем слое 1439 вместо 1248 В. Они становятся практически равными указанным напряжениям лишь через 600 с. Поэтому расчетная кривая напряжения саморазряда, показанная на рис. 5, существенно отличается от экспериментальной кривой, показанной на этом же рисунке.

Для этих же параметров были определены ток заряда и сопротивление изоляции. Ток заряда определен по формуле (13):

$$i = i_1 + i_{c1} = \frac{u_{c1}}{R_1} + C_1 \frac{du_{c1}}{dt} = \frac{u_{c1y}}{R_1} + \frac{A_1}{R_1} e^{p_1 t} + \frac{A_2}{R_1} e^{p_2 t} + C_1 p_2 A_2 e^{p_2 t} = \frac{u_{c1}}{R_1} + \left[ \frac{A_1}{R_1} + C_1 p_1 A_1 \right] e^{p_1 t} + \left[ \frac{A_2}{R_1} + C_1 p_2 A_2 \right] e^{p_2 t} = \frac{u_{c1y}}{R_1} + A_7 e^{p_1 t} + A_8 e^{p_2 t} = 6,595 \cdot 10^{-6} + 1,619 \cdot 10^{-6} e^{p_1 t} + 2,518 \cdot 10^{-6} e^{p_2 t}. \quad (26)$$

Здесь, как и ранее,  $p_1 = -8,356 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $p_2 = -0,19 \text{ c}^{-1}$ . Им соответствуют постоянные времени:  $\tau_1 = -\frac{1}{p_1} = 119,7 \text{ с}$  и  $\tau_2 = -\frac{1}{p_2} = 5,272 \text{ с}$ .

Зависимость сопротивления изоляции от времени, рассчитанная по формуле (2) с учетом (26), приведена на рис. 6.

Из анализа рис. 4–6 можно сделать вывод о том, что расчетные кривые существенно отличаются от экспериментальных. Это значит, что сопротивления слоев изоляции следует корректировать и сделать новые расчеты по скорректированным данным, после чего сравнить их с экспериментальными кривыми. Корректировку проведем следующим

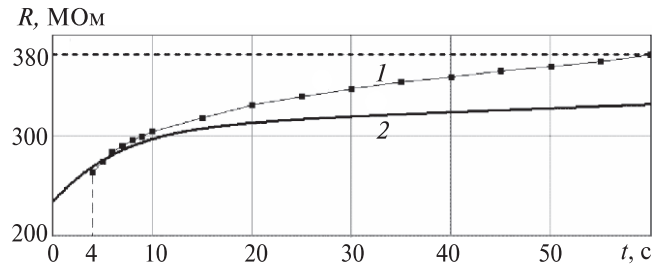


Рис. 6. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости сопротивления изоляции от времени: значения сопротивлений слоев взяты равными:  $R_1 = 79 \text{ МОм}$ ,  $R_2 = 111 \text{ МОм}$ ,  $R_3 = 190 \text{ МОм}$

образом. Поскольку постоянные времени саморазряда определены из эксперимента достаточно точно, то корректировать будем только активные сопротивления слоев изоляции. Значения электрических емкостей при этом будут корректироваться автоматически. Введем следующие корректировочные коэффициенты:

для резистора  $R_1 - k_1(n)k_R(n)$ ,

для резистора  $R_2 - k_2(n)k_R(n)$ ,

для резистора  $R_3 - k_3(n)k_R(n)$ .

Здесь  $n$  – номер итерации;

$$k_1(n) = \frac{u_{c1,60}}{u_{c1,60}(n)} = \frac{521}{u_{c1,60}(n)}$$

$$k_2(n) = \frac{u_{c2,60}}{u_{c2,60}(n)} = \frac{731}{u_{c2,60}(n)}$$

$$k_3(n) = \frac{u_{c3,60}}{u_{c3,60}(n)} = \frac{1248}{u_{c3,60}(n)} \quad \text{— коэффициенты,}$$

корректирующие значения резисторов  $R_1, R_2$  и  $R_3$  схемы замещения по отношению экспериментальных значений напряжений на слоях изоляции к расчетным значениям этих напряжений в рассматриваемой итерации;  $k_R(n) = \frac{R_{60}}{R_{60}(n)} = \frac{380 \cdot 10^6}{R_{60}(n)}$  –

коэффициент, корректирующий значения резисторов  $R_1, R_2, R_3$  схемы замещения по отношению экспериментального значения сопротивления изоляции к расчетному значению этого сопротивления. Из таблицы видно, что процесс итерации быстро сходится и для обеспечения точности расчета не более 0,5% требуется всего три шага итерации.

На рис. 7 приведены расчетные зависимости напряжений на слоях изоляции после корректировки значений сопротивлений слоев для третьего шага итерации. Кривая  $u_{c1}$ , как и ранее, для наглядности отмечена квадратиками. На рис. 8 приведены экспериментальные и расчетные зависимости сопротивления изоляции и напряжения саморазряда после корректировки сопротивлений. В таблице  $\delta_1, \delta_2$  и  $\delta_3$  – погрешности вычисленных напряжений на слоях изоляции через 60 с после

№ итерации	Сопротивление слоев изоляции			Напряжение на слоях изоляции при ее заряде через 60 с			Корректирующий коэффициент				Погрешности, %			
	$R_1$ , МОм	$R_2$ , МОм	$R_3$ , МОм	$u_{c1,60}$ , В	$u_{c2,60}$ , В	$u_{c3,60}$ , В	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_R$	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\delta_R$
1	79	111	190	215	846	1439	2,423	0,864	0,867	1,15	59	16	15	13
2	220	110	189	546	728	1226	0,954	1,006	1,018	1	4,7	0,4	1,8	2
3	179	94,5	164,3	521,5	731,3	1247	1,005	0,999	0,998	1	0,5	0,1	0,2	0,1

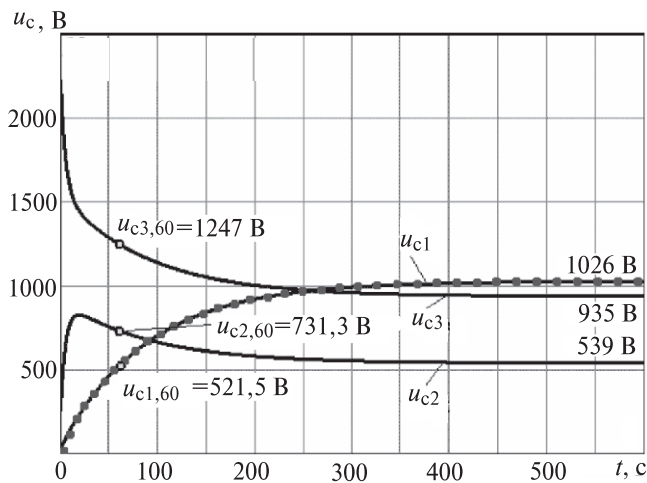


Рис. 7. Зависимости напряжений на слоях конденсаторов, рассчитанные по формулам (17) после корректировки сопротивлений; значения сопротивлений слоев изоляции взяты равными:  $R_1=184$  МОм,  $R_2=96,4$  МОм,  $R_3=167$  МОм

начала ее заряда,  $\delta_R$  — погрешность вычисленного одноминутного значения сопротивления изоляции.

Как видно из рис. 8, расчетные и экспериментальные кривые хорошо совпадают. Следовательно, эквивалентные параметры элементов схемы замещения многослойной изоляции определены верно. Полученные параметры могут быть использованы для построения диагностической модели изоляции силовых трансформаторов [1–12].

**Выводы.** 1. Сопротивление изоляции всех электротехнических устройств, определяемое сквозным током утечки, является одним из важнейших критериев их работоспособности. Во всех технических нормативах оговариваются значения изоляции или тока утечки при заданном напряжении. Согласно ПУЭ за ток утечки принимают ток, измеренный через одну минуту после приложения напряжения. Соответствующее ему сопротивление изоляции  $R_{60}$  называют одноминутным.

2. Экспериментальные исследования авторов показали, что токи абсорбции не всегда спадают до нуля через 60 с, и в это время даже в устройствах небольшой мощности наблюдаются заметные токи абсорбции. Следовательно, измеренное в этом случае одноминутное значение сопротивления изоляции  $R_{60}$  не является установившимся значением.

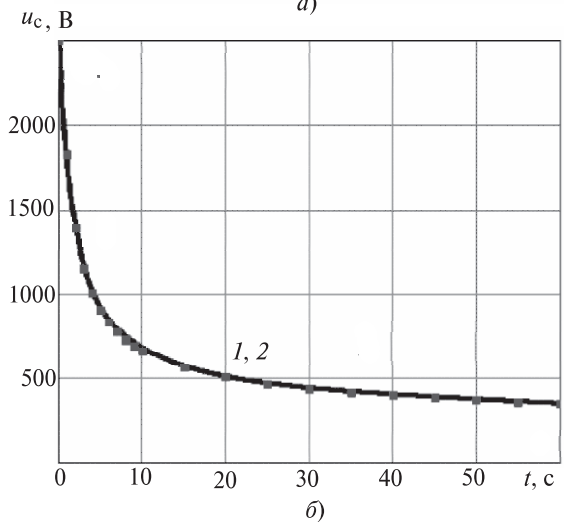
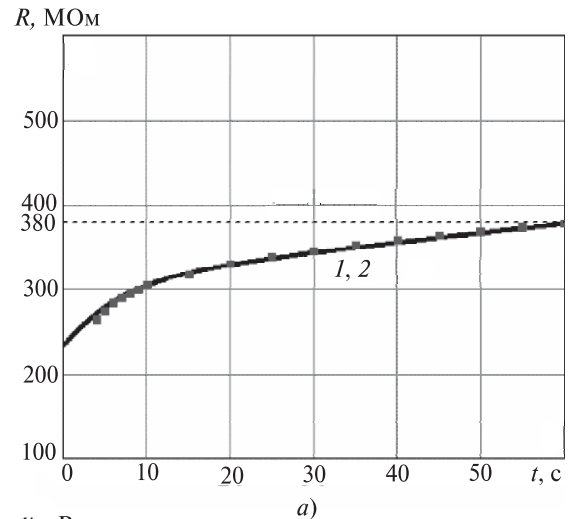


Рис. 8. Экспериментальные и расчетные зависимости сопротивления изоляции (а) и напряжения саморазряда (б) после корректировки сопротивлений; значения сопротивлений слоев изоляции взяты равными:  $R_1=184$  МОм,  $R_2=96,4$  МОм,  $R_3=167$  МОм

3. Предложена методика определения десятиминутного значения сопротивления изоляции при измерении сопротивления изоляции в течение одной минуты и последующего измерения возвратного напряжения также в течение одной минуты. Методика позволяет определить истинные значения сопротивлений и электрических емкостей слоев многослойной системы изоляции, по которым можно объективно судить о процессе старения изоляции и ее остаточном ресурсе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Серебряков А.С.** Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пос. — М.: Маршрут, 2005, 280 с.
2. **Правила** технической эксплуатации электроустановок потребителей. — М.; Ростов н/Д: МарТ, 2003, 272 с.
3. **Серебряков А.С.** Способ измерения установившегося значения сопротивления изоляции. — Электричество, 1999, № 5, с. 40–43.
4. **Патент РФ № RU 2 501 027 C2 G01R 27/02.** Устройство для измерения сопротивления электрической изоляции/А.С. Серебряков, Д.А. Семенов. — Бюл. изобр., 20013, № 34.
5. **Серебряков А.С.** Трансформаторы: Учебное пос. — М.: Издат. дом МЭИ, 2014, 360 с.
6. **Серебряков А.С., Семенов Д.А.** Диагностика корпусной изоляции распределительных трансформаторов. — Электро, 2013, № 1, с. 47–51.
7. **Серебряков А.С., Семенов Д.А.** Определение оставшегося ресурса главной изоляции распределительных трансформаторов. — Электротехника, 2013 № 6, с. 2–8.
8. **Патент РФ № RU 2 52 30 75 G01 R 27/18.** Устройство контроля качества электрической изоляции/А.С. Серебряков, Д.А. Семенов. — Бюл. изобр., 2014, № 20.
9. **Патент РФ № RU 2 51 66 13 C2 G01R 31/12.** Способ оценки оставшегося срока службы высоковольтной изоляции/А.С. Серебряков, Д.А. Семенов. — Бюл. изобр., 20014, № 14.
10. **Алексеев Б.А.** Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов. — М.: НЦ ЭНАС, 2002, 216 с.
11. **Сви П.М.** Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. — М.: Энергоатомиздат, 1992, 240 с.

12. **Бутырин П.А., Васильковская Т.А., Алпатов М.Е.** Упрощенные математические модели трехфазных трансформаторов для целей диагностики. — Электро, 2002, № 1.

[08.02.16]

*Авторы: Серебряков Александр Сергеевич окончил в 1961 г. электротехнический факультет Нижегородского государственного университета им. Р.Е. Алексеева. В 2000 г. в Московском государственном университете путей сообщения защитил докторскую диссертацию «Методы и средства диагностики изоляции электрических машин и аппаратов их защиты». Профессор кафедры «Электрификация и электроснабжение» Нижегородского филиала Московского государственного университета путей сообщения.*

*Семенов Дмитрий Александрович окончил в 2008 г. инженерный факультет Нижегородского государственного инженерно-экономического университета. В 2013 г. в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и совершенствование методов и средств диагностики главной изоляции трансформаторов 6–10 кВ». Доцент кафедры «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета.*

*Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 6, pp. 33–41.*

## How to Estimate the Parameters of a High-Voltage Insulation System in an Unbiased Manner

**SEREBRYAKOV Aleksandr Sergeevich** (Branch of the Moscow State University of Railway Engineering, Nizhnii Novgorod, Russia)—Professor, Dr. Sci. (Eng.)

**SEMENOV Dmitrii Aleksandrovich** (Nizhnii Novgorod State Engineering and Economical University, Nizhnii Novgorod, Russia) — Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

*As a rule, high-voltage insulation contains a few dielectrics having different characteristics, due to which the insulation becomes heterogeneous in nature. At the initial moment after a DC voltage is applied to heterogeneous insulation, the through leakage current in the insulation is accompanied by polarization currents that cause absorbed (absorption) charges to appear at the interface boundaries between the dielectrics. The leakage current and insulation resistance should be measured some time after applying the voltage, when the transients die out and all absorption currents fall to zero. The steady-state value of insulation resistance is one of the most important criteria for estimating it. In Russia and in the United States, these periods of time have been adopted equal to 1 and 10 min, respectively. Experimental investigations show that absorption currents do not always fall to zero in 60 s, and in such case the measured value of insulation resistance  $R_{60}$  is not equal to its steady-state value. The value of insulation resistance measured after a 10 min time delay is a more unbiased criterion. However, many of the existing instruments are not designated for measuring it. The article presents an accelerated procedure for determining the 10-min value of insulation resistance using an instrument developed by the authors, the use of which is illustrated on the example of measuring the insulation parameters of a TM-25/10/0.4 oil-filled distribution transformer. A mathematical model of insulation is constructed based on the obtained parameters, and the processes calculated using the model are compared with the experimental ones. An algorithm for refining the model parameters using a rapidly converging iterative method is presented. The measurement process takes 2 min.*

**Key words:** heterogeneous high-voltage insulation, electrical conductivity of dielectrics, absorption charge, leakage current, insulation resistance

## REFERENCES

1. **Serebryakov A.S.** *Elektrotekhnicheskoye materialovedeniye. Elektroizolyatsionnye materialy* (Electrical metallurgy. Insulating materials). Moscow, Publ. «Marshrut», 2005, 280 p.

2. **Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektroustanovok potrebitelei** (Rules of technical operation of electrical consumers). Moscow and Rostov-na-Donu, Publ. «MarT», 2003, 272 p.

3. **Serebryakov A.S.** *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 1999, No. 5, pp. 40–43.



4. **Patent RF** No. RU 2501027 C2 G01R2702. *Ustroistvo dlya izmereniya soprotivleniya elektricheskoi izolyatsii* (An apparatus measuring electric insulation resistance)/A.S. Serebryakov, D.A. Semenov. – Bulletin of inventions, 2013, No. 34.

5. **Serebryakov A.S.** *Transformatory* (Transformers). Moscow, Publ. house of Moscow Power Engineering Institute, 2014, 360 p.

6. **Serebryakov A.S., Semenov D.A.** *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2013, No. 1, pp. 47–51.

7. **Serebryakov A.S., Semenov D.A.** *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2013, No. 6,

8. **Patent RF** No. RU 2 52 30 75 G01 R 27/18. *Ustroistvo kontrolya kachestva elektricheskoi izolyatsii* (Quality control device electrical insulation)/A.S. Serebryakov, D.A. Semenov. – Bulletin of inventions, 2014, No. 20.

9. **Patent RF** No. RU 251 66 13 C2 G01R 31/12. *Sposob otsenki ostavshegosya sroka sluzhby vysokovol'noi izolyatsii* (A method of estimating the remaining life of high voltage insulation)/A.S. Serebryakov, D.A. Semenov. – Bulletin of inventions, 2014, No. 14.

10. **Alekseyev B.A.** *Kontrol' sostoyaniya (diagnostika) krupnykh silovykh transformatorov* (Monitoring of state (diagnostics) of large power transformers). Moscow, Publ. «ENAS», 2002, 216 p.

11. **Svi P.M.** *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya* (Methods and tools for diagnosis of high voltage equipment). Moscow, Energoatomizdat, 1992, 240 p.

12. **Butyrin P.A., Vas'kovskaya T.A., Alpatov M.E.** *Elektro – in Russ. (Electro)*, 2002, No. 1.