

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.222.6

А.С. Серебряков¹, Д.А. Семенов²

ТЕСТОВАЯ ДИАГНОСТИКА КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ АПК

Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения¹,
Нижегородский государственный инженерно-экономический институт²

Предложено устройство для диагностики состояния корпусной изоляции распределительных трансформаторов по напряжению саморазряда и возвратному напряжению.

Ключевые слова: диагностики высоковольтной изоляции, заряд абсорбции, ток абсорбции, напряжение саморазряда, возвратное напряжение постоянные времени саморазряда, схема замещения корпусной изоляции трансформатора, износ изоляции.

Распределительные трансформаторы напряжением 6-10 кВ являются одним из важнейших устройств систем электроснабжения объектов АПК. Трансформаторы, как и другие электрические машины и аппараты могут нормально работать лишь с исправной изоляцией. В процессе эксплуатации из-за увлажнения, перегрева, динамических нагрузок и перенапряжений происходит общее старение изоляции, т.е. ухудшение ее физико-химических характеристик. В изоляции возникают распределенные и местные (сосредоточенные) дефекты, которые в конечном итоге приводят к пробое.

Ресурс изоляции, как правило, определяет и ресурс трансформаторов. Многочисленные исследования показали, что в подавляющем числе случаев причиной отказов распределительных трансформаторов является нарушение работы его изоляционной системы. При этом более 25% отказов приходится на долю корпусной изоляции.

Чтобы своевременно выявлять развивающиеся дефекты и не допускать внезапных пробоев электрической изоляции, свойства ее в процессе эксплуатации периодически проверяют. Такие мероприятия обеспечивают поддержание необходимой степени надежности электрооборудования в процессе его эксплуатации. Периодический контроль с целью прогнозирования расходования ресурса трансформаторного оборудования необходим и для обоснования выбора очередности замены этого оборудования. Это особенно важно на современном этапе эксплуатации энергетических систем, когда более 70% основного трансформаторного оборудования уже выработало свой ресурс времени, регламентированный нормативными документами.

Периодичность и нормы испытаний устанавливаются стандартами, Правилами технической эксплуатации и ведомственными инструкциями для каждого вида оборудования. При такой системе обслуживания контроль и ремонт оборудования производят по времени эксплуатации.

Как показывает практика, такая система технического обслуживания не является оптимальной. Большие резервы повышения эффективности эксплуатации трансформаторов и другого электрооборудования заложены в системе обслуживания по реальной потребности или по реальному техническому состоянию. Переход к такой системе невозможен без использования современных приборных средств, основанных на надежных и научно обосно-

ванных методах выявления дефектов и оценки технического состояния изоляции. Эти вопросы решает техническая диагностика [1, 2].

Одним из эффективных неразрушающих методов тестового контроля состояния главной изоляции является метод, основанный на использовании явления абсорбции. Известно, что о состоянии изоляции и степени ее старения судят по току абсорбции, или точнее, по коэффициенту абсорбции, который определяют как отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к пятнадцатисекундному значению ее.

Коэффициент абсорбции дает объективную оценку состояния изоляции, так как учитывает заряд абсорбции. Однако контроль заряда абсорбции по току абсорбции неудобен тем, что ток абсорбции мал и промышленные помехи сильно искажают его. Поэтому удобнее пользоваться другими методами обнаружения явления абсорбции. Так, например, на практике можно применить метод измерения *напряжения саморазряда и возвратного напряжения*. Рассмотрим подробнее эти явления.

С учетом электропроводности и поляризации схема замещения изоляции в простейшем случае может быть представлена как параллельное соединение резистора R и конденсатора C (рис. 1, а). Если зарядить конденсатор C , зашунтированный резистором R , до напряжения U_0 (переключатель $P1$ в положении 1), а затем отключить его от источника напряжения и оставить разомкнутым (переключатель $P1$ в положении 2), то конденсатор C будет постепенно разряжаться на резистор R . При этом напряжение на конденсаторе u_C , называемое напряжением саморазряда, измеряемое измерителем напряжения $И_2$, будет изменяться по закону затухающей экспоненты (рис. 1, б):

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1)$$

Величину $\tau = RC$ называют постоянной времени саморазряда конденсатора C . Она измеряется в секундах и равна тому промежутку времени, в течение которого напряжение на конденсаторе C уменьшится в $e=2,718$ раза и составит $0,368U_0$. Чем больше постоянная времени, тем медленнее идет процесс саморазряда. Если представить себе, что в качестве изолятора используется диэлектрик прямоугольной формы, площадь поперечного сечения которого S , а толщина h , то формула для постоянной времени τ примет вид:

$$\tau = RC = \rho_V \frac{h}{S} \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{h} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \rho_V. \quad (2)$$

Здесь ρ_V - удельное объемное сопротивление диэлектрика, ε_0 - электрическая постоянная, ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Из формулы (2) следует важный вывод: постоянная времени саморазряда изоляции $\tau = RC$ не зависит от геометрических размеров изоляции, а определяется исключительно свойствами изоляции ε_r и ρ_V . Более строгий анализ показывает, что постоянная времени не зависит и от формы изоляции.

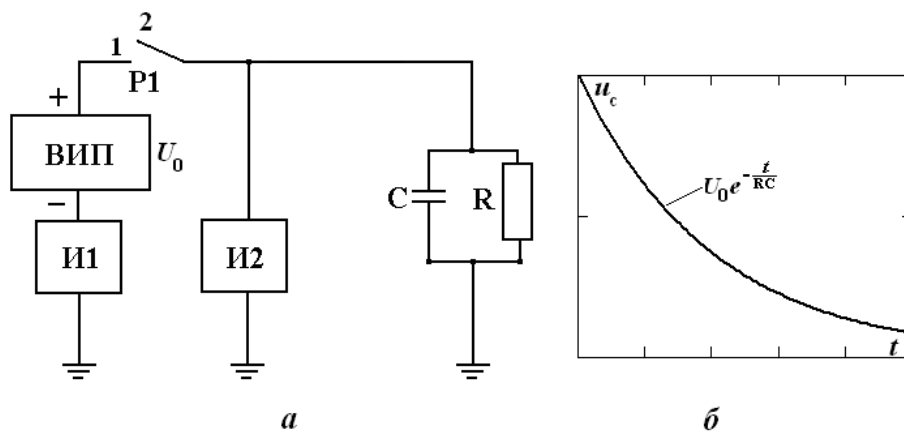


Рис. 1. Схема для измерения напряжения саморазряда (а) и зависимость напряжения саморазряда от времени (б)

В действительности главная или корпусная изоляция силовых трансформаторов состоит из нескольких изоляционных элементов, различных по конструкции и по электрическим параметрам. Комбинация нескольких диэлектриков с разными электрическими параметрами позволяет получить наиболее благоприятные свойства изоляционной конструкции. Это обстоятельство делает главную изоляцию неоднородной. Поэтому корпусная изоляция представляется схемой замещения, состоящей не из одного слоя, а из нескольких слоев, каждый из которых имеет свое сопротивление, емкость и постоянную времени.

Для упрощения анализа процессов представим схему замещения корпусной изоляции, как простейшую модель неоднородного диэлектрика, состоящего из двух слоев, обладающих различными сопротивлениями R_1 и R_2 и емкостями C_1 и C_2 (рис. 2, а). В действительности число слоев может быть равно трем и более. Для модели двухслойной изоляции после отключения ее от источника напряжения заряженные конденсаторы C_1 и C_2 слоев неоднородной изоляции будут разряжаться на сопротивления утечки своих слоев R_1 и R_2 . Напряжение саморазряда будет равно сумме напряжений на отдельных слоях изоляции, то есть будет равно сумме экспонент:

$$u_C = U_{01}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{02}e^{-\frac{t}{\tau_2}} = U_{01}e^{-\frac{t}{R_1C_1}} + U_{02}e^{-\frac{t}{R_2C_2}}. \quad (3)$$

Если изоляция заряжалась в течение длительного времени, то напряжения на слоях в начальный момент времени саморазряда будут прямо пропорциональны значениям активных сопротивлений слоев:

$$U_{01} = \frac{U_0R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_0R_1}{R_{60}}, \quad U_{02} = \frac{U_0R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_0R_2}{R_{60}}. \quad (4)$$

Здесь $R_{60} = R_1 + R_2$ - одноминутное значение сопротивления изоляции.

Зная зависимость u_C от времени, можно в соответствии с выражением (3) определить начальные напряжения U_{01} , U_{02} , τ_1 и τ_2 . Далее по ним можно рассчитать параметры схемы замещения R_1 , R_2 , C_1 и C_2 . Значения этих параметров позволят рассчитать ток абсорбции, заряд абсорбции, коэффициент абсорбции, $\text{tg}\delta$ и отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$, не измеряя их непосредственно. Например, поглощенный заряд абсорбции на границе раздела двух сред можно вычислить по формуле

$$Q_{\text{ГР}} = \frac{U_0(R_2C_2 - R_1C_1)}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Полученные параметры существенно различаются в зависимости от степени старения изоляции и позволяют объективно судить о ее состоянии. Однако о состоянии изоляции можно судить без вычисления указанных параметров, а непосредственно по измеренным значениям напряжения саморазряда и возвратного напряжения. Поясним сказанное подробнее.

За счет разной поляризации слоев от источника напряжения к изоляции в течение непродолжительного времени притекает ток абсорбции, который измеряют измерителем тока I_1 (рис. 2, а). За счет тока абсорбции на границе раздела слоев накапливается объемный заряд внутреннего поглощения (заряд абсорбции). Следовательно, о процессе абсорбции можно судить не только по току абсорбции, но и по накопленному (поглощенному) заряду абсорбции, который создает возвратное напряжение.

Опыт, в котором наблюдается возвратное напряжение, состоит в следующем (рис. 2, а). Неоднородная изоляция заряжается в течение одной минуты при постоянном напряжении, чтобы в ней накопился заряд абсорбции (переключатели P_1 и P_2 замкнуты). Затем изоляция

отключается от источника постоянного напряжения (переключатель P1 разомкнут) и ее электроды замыкаются переключателем P2 накоротко на очень малый промежуток времени Δt , после чего вновь размыкаются. За время Δt геометрическая емкость C_{Γ} полностью разряжается, а заряд абсорбции, накопленный на границе слоев, остается практически неизменным. Этот заряд распределится на обе емкости и зарядит их до одинакового напряжения U_{0B} . После размыкания внешних электродов изоляции емкости C_1 и C_2 вновь оказываются соединенными последовательно. Емкости C_1 и C_2 будут разряжаться на сопротивления утечки своих слоев R_1 и R_2 с разной скоростью, так как постоянные времени слоев R_1C_1 и R_2C_2 неодинаковы. На изоляции появится напряжение u_6 , равное разности двух экспонент (рис. 2, б):

$$u_6 = U_{0B} e^{-\frac{t}{R_2C_2}} - U_{0B} e^{-\frac{t}{R_1C_1}}. \quad (6)$$

Это напряжение и называют возвратным напряжением. Его измеряют измерителем И2. По значению и форме возвратного напряжения можно судить о состоянии изоляции.

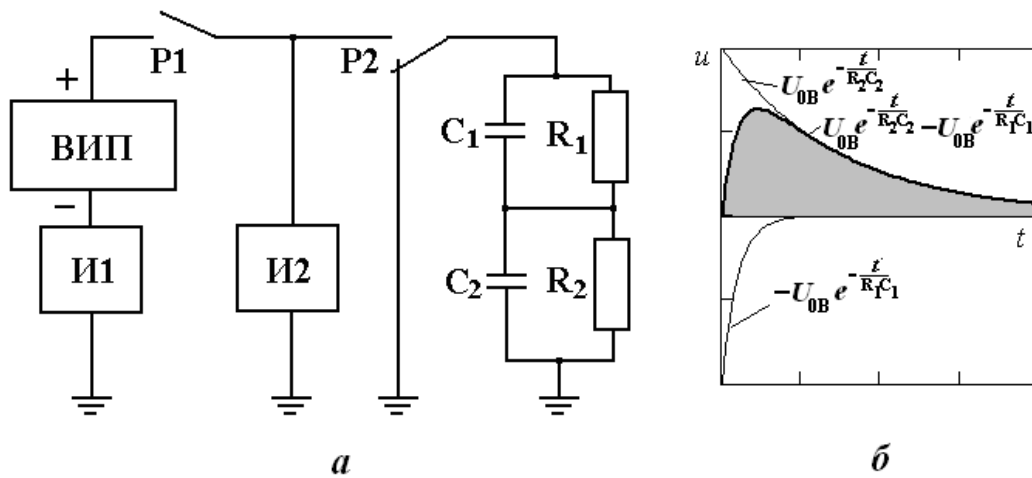


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для измерения возвратного напряжения и напряжения саморазряда (а) и зависимость возвратного напряжения от времени

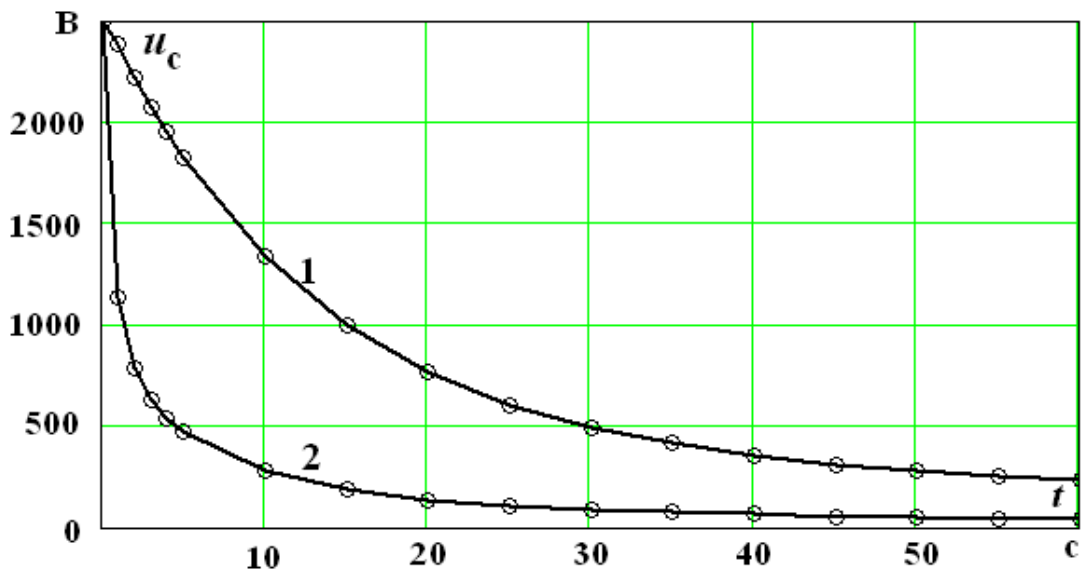


Рис. 3. Кривые напряжения саморазряда нового трансформатора (кривая 1) и трансформатора после 28 лет эксплуатации (кривая 2)

Для измерения рассмотренных выше параметров: сопротивления изоляции, кривой саморазряда и возвратного напряжения авторами в соответствии со схемой 2, а разработано устройство, которое снабжено программируемым микроконтроллером и позволяет измерять параметры изоляции в течение одной минуты через каждую секунду

На рис. 3 показаны зависимости напряжения саморазряда для нового трансформатора при вводе его в эксплуатацию (кривая 1) и после 28 лет эксплуатации (кривая 2). Кружками на рис. 3 показаны измеренные значения.

Исследования показывают, что кривую 2 на рис. 3 можно аппроксимировать суммой трех экспонент:

$$u_{C(2)} = U_{01}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{02}e^{-\frac{t}{\tau_2}} + U_{03}e^{-\frac{t}{\tau_3}} = 1504e^{-\frac{t}{0,5}} + 764e^{-\frac{t}{5}} + 232e^{-\frac{t}{30}}. \quad (7)$$

Три экспоненты соответствуют трем слоям изоляции: первая экспонента с постоянной времени $\tau_1=0,5$ с соответствует слою трансформаторного масла, вторая экспонента с постоянной времени $\tau_2=5$ с соответствует барьеру между обмотками и третья экспонента с постоянной времени $\tau_3=30$ с соответствует изоляции обмотки. Эти три слоя изоляции имеют соответственно сопротивления изоляции:

$$R_1 = \frac{U_{01}}{U_0} R_{60} = \frac{1504}{2500} 145 = 87,2 \text{ МОм};$$

$$R_2 = \frac{U_{02}}{U_0} R_{60} = \frac{764}{2500} 145 = 44,3 \text{ МОм};$$

$$R_3 = \frac{U_{03}}{U_0} R_{60} = \frac{232}{2500} 145 = 13,5 \text{ МОм}.$$

Здесь $R_{60} = 145$ МОм – одноминутное значение сопротивления изоляции рассматриваемого трансформатора.

Электрические емкости указанных слоев изоляции равны:

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} = \frac{0,5}{87,2} = 0,0057 \text{ мкФ};$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} = \frac{5}{44,3} = 0,113 \text{ мкФ};$$

$$C_3 = \frac{\tau_3}{R_3} = \frac{30}{13,5} = 2,22 \text{ мкФ}.$$

По известным параметрам схемы замещения можно определить протекание абсорбционных процессов. Однако наиболее ярко их проявления можно наблюдать при измерении возвратного напряжения.

На рис. 4 показаны зависимости возвратного напряжения тех же трансформаторов: нового трансформатора при вводе его в эксплуатацию (кривая 1) и после 28 лет эксплуатации (кривая 2). Зависимости на рис. 3 и 4 измерены при температуре трансформатора 28°C.

Как показали исследования, наиболее информативным является напряжение саморазряда, измеренное на 15 секунде и возвратное напряжение, измеренное на 30-й секунде после начала измерения, которые обозначают u_{c15} и $u_{в30}$.

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что в течение срока эксплуатации изоляция стареет и напряжение саморазряда и возвратное напряжение снижаются (напряжение саморазряда u_{c15}

снижается примерно на 28–30 В за год, а возвратное напряжение $u_{в30}$ – примерно на 6–7 В за год). Существенно изменяется и момент времени, при котором наблюдается максимум возвратного напряжения.

Трансформаторы, у которых $u_{с15}$ меньше 100 В и $u_{в30}$ меньше 15 В следует считать изношенными по изоляции более чем на 80% и при возможности заменять их новыми трансформаторами.

Итак, о старении изоляции без ее разрушения, как показали исследования, можно судить по характеру процессов поляризации, а именно по величине возвратного напряжения. С увеличением срока эксплуатации изоляция изнашивается, ее электрическая прочность снижается. С ростом эксплуатации уменьшается и возвратное напряжение, которое может характеризовать состояние изоляции даже лучше чем пробивное напряжение, которое характеризует лишь кратковременную прочность изоляции и в ряде случаев она может быть достаточно высокой. Однако электрическая прочность при длительном воздействии напряжения оказывается недостаточной из-за ухудшившихся электрических характеристик изоляции. В частности, в процессе старения изоляции увеличиваются диэлектрические потери, которые могут привести к тепловому пробую изоляции при длительном приложении напряжения.

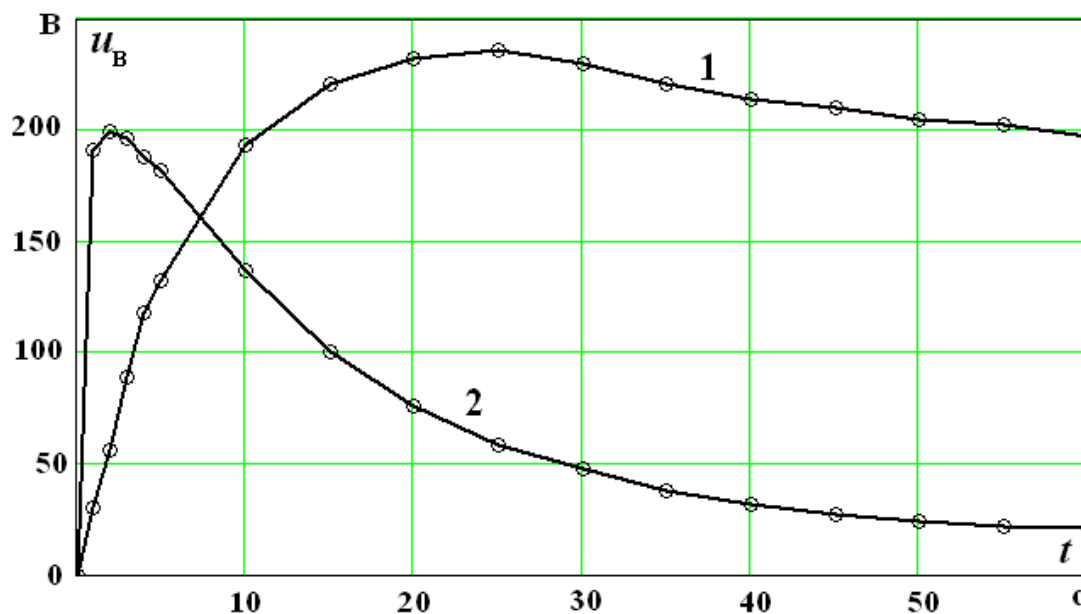


Рис. 4. Кривые возвратного напряжения нового трансформатора (кривая 1) и трансформатора после 28 лет эксплуатации (кривая 2)

Для каждого вида изоляции существует свой внутренний ресурс, который характеризуется способностью изоляции в течение определенного времени выдерживать приложенное напряжение и противостоять разрушающему воздействию процессов, протекающих при этом напряжении.

Внутренний ресурс у каждого вида новой изоляции есть величина постоянная, и естественно он постепенно уменьшается с ростом срока службы. Уменьшается и возвратное напряжение. Следовательно, величина возвратного напряжения в настоящее время лучше, чем какой-либо другой параметр характеризует изношенность изоляции.

В заключении отметим, что при неразрушающих испытаниях для оценки качества изоляции большое значение имеет изменение ее характеристик во времени. Поэтому с повышением частоты контроля увеличивается вероятность своевременного выявления дефектов.

Библиографический список

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под общей ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – М.: Издательство НИЦ ЭНАС, 2001. – 256 с.
2. **Серебряков, А.С.** Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.

*Дата поступления
в редакцию 18.10.2011*

A.S. Serebryakov. D.A. Semenov

TEST DIAGNOSTICS OF FRAME INSULATION OF DISTRIBUTING TRANSFORMERS IN AGRIBUSINESS INDUSTRY

There was proposed the facility for diagnostics at self-discharge voltage and back voltage in frame insulation of distributing transformers.

Key words: diagnostics of high-voltage insulation, absorption charge, absorption current, self-discharge voltage, back voltage, characteristics time of self-discharge, equivalent network of frame insulation of transformer, insulation deprecation.