

УДК 621.314.222.6

А.С. Серебряков<sup>1</sup>, Д.А. Семенов<sup>2</sup>**НОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ**

Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный инженерно-экономический институт<sup>2</sup>

Предложено запатентованное устройство для диагностики состояния главной изоляции высоковольтного электрооборудования по напряжению саморазряда и возвратному напряжению. Цель создания описываемого устройства – определить оставшийся ресурс электрооборудования и не допустить внезапных пробоев электрической изоляции в процессе эксплуатации. В основу устройства положен метод контроля изоляции по абсорбционным характеристикам, в частности, по напряжению саморазряда и возвратному напряжению.

Показано, что по результатам измерений уменьшение напряжения саморазряда для распределительных трансформаторов составляет в среднем 30 В за год. Созданное устройство позволяет более точно прогнозировать оставшийся ресурс главной изоляции распределительных трансформаторов.

*Ключевые слова:* диагностики высоковольтной изоляции, заряд абсорбции, ток абсорбции, напряжение саморазряда, возвратное напряжение, постоянные времени саморазряда, износ изоляции.

Высоковольтное электрооборудование может 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 приводят к пробое изоляции.

Ресурс изоляции, как правило, определяет ресурс электрооборудования. Чтобы своевременно выявлять развивающиеся дефекты и не допускать внезапных пробоев электрической изоляции, свойства ее в процессе эксплуатации периодически проверяют. Для этого производят периодический контроль и испытания изоляции, а в случае необходимости и ее ремонт. Такие мероприятия обеспечивают поддержание требуемой степени надежности электрооборудования в процессе его эксплуатации [1].

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 обоснованных методах выявления дефектов и оценки технического состояния изоляции. Для этих целей авторами разработано новое устройство для объективной оценки качества высоковольтной изоляции, на которое получен патент РФ [2]. Устройство предназначено для оценки качества главной изоляции высоковольтных электрических машин, трансформаторов и кабелей. Оценка состояния главной изоляции электрооборудования определяется на основе комплекса измерений или многопараметрического тестирования с тем, чтобы дефекты, не выявленные одним методом, могли бы выявляться другими методами.

Структурная схема предлагаемого устройства для контроля качества электрической изоляции представлена на рис. 1. Устройство содержит источник испытательного напряже-

ния 1 с управляющим входом 2, по которому устанавливается значение выходного напряжения источника испытательного напряжения, и входом 3 для быстродействующего отключения источника, бесконтактное токовое реле 4, эталонный резистор 5, ограничитель напряжения 6, зарядный ключ 7, масштабный преобразователь напряжения 8, дополнительный резистор 9, дополнительный ключ 10, разрядный ключ 11, разрядный резистор 12, индуктивную катушку 13, выходные выводы 14 и 15 устройства. К выходным выводам устройства подключают «землю» и объект испытания, представляющий собой параллельное соединение конденсатора, емкость которого равна емкости испытуемого объекта, и резистора, представляющего собой сопротивление утечки изоляции испытуемого объекта.

Кроме того, устройство содержит двухвходовой управляемый коммутатор 16 с первым 17 и вторым 18 информационными входами и управляющим входом, аналого-цифровой преобразователь 19, устройство ручного ввода информации от органов управления (клавиатура) 20, программируемый контроллер (комплексный цифровой элемент высшего функционального уровня) с двумя каналами ввода информации 22 и 23 и двумя каналами 24 и 25 вывода информации.

Канал 22 служит для ввода диагностической информации, а канал 23 – для ввода информации от органов ручного управления – клавиатуры), Канал вывода 24 служит для вывода управляющих команд, а канал 25 – для вывода диагностической информации. Аналоговый выходной канал 26 служит для управления напряжением источника питания, а дискретный выходной канал 27 – для управления двухвходовым коммутатором. Устройство сопряжения 28 с объектом управления служит для включения обмоток высоковольтных реле. Устройство отображения информации 29 предназначено для считывания результатов измерений. Диаграмма срабатывания высоковольтных ключей устройства приведена на рис. 2.

Главная изоляция высоковольтного электрооборудования, как правило, выполняется из нескольких диэлектриков с разными физическими свойствами и электротехническими характеристиками, что делает изоляцию неоднородной и позволяет получить наиболее благоприятные свойства изоляционной конструкции. В такой комбинированной изоляции наблюдается специфическое явление, которое заключается в том, что на границе раздела диэлектриков накапливаются заряды, называемые зарядами абсорбции. Это явление называется структурной или миграционной поляризацией. О процессе структурной поляризации можно судить по коэффициенту абсорбции, напряжению саморазряда и возвратному напряжению [3].

Для измерения напряжения саморазряда изоляцию необходимо зарядить от высоковольтного источника питания. После этого заряженную изоляцию отключают от источника питания и подключают к измерительному прибору. Напряжение на изоляции  $u_c$  при разряде ее на собственное сопротивление утечки называют напряжением саморазряда. Возвратное напряжение  $u_b$  измеряют на изоляции после отключения заряженной изоляции от источника напряжения и кратковременного ее разряда на землю [3].

Цикл измерения параметров неоднородной высоковольтной изоляции включает в себя семь стадий (рис. 2): 1 – предварительный разряд изоляции на землю (ключи 7 и 10 разомкнуты, ключ 11 замкнут); 2 – заряд изоляции (ключи 7 и 10 замкнуты, ключ 11 разомкнут); 3 – саморазряд изоляции (ключи 7 и 11 разомкнуты, ключ 10 замкнут); 4 – повторный заряд изоляции (ключи 7 и 10 замкнуты, ключ 11 разомкнут); 5 – включение добавочного резистора при повторном заряде (ключ 7 замкнут, ключи 10 и 11 разомкнуты); 6 – кратковременный разряд изоляции на землю (ключи 7 и 10 разомкнуты, ключ 11 замкнут); 7 – измерение возвратного напряжения (ключи 7 и 11 разомкнуты, ключ 10 замкнут).

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии ключ 11 замкнут, а ключ 7 и ключ 10 разомкнуты, и электрическая емкость объекта испытания разряжаются на «землю» через разрядный резистор 12 и индуктивную катушку 13. Необходимость введения индуктивной катушки вызвана соображениями электромагнитной совместимости, так как в разрядной цепи при малом значении разрядного резистора 12 и больших значениях емкости испытуемого объекта в момент замыкания разрядного ключа 11 возникают экстратоки с кру-

тым передним фронтом, высокочастотные электромагнитные помехи от которых могут приводить к сбою электронной аппаратуры. Включение индуктивной катушки делает передний фронт тока более пологим, тем самым снижая уровень высокочастотных помех. В установленном режиме катушка не оказывает сопротивления протеканию тока.

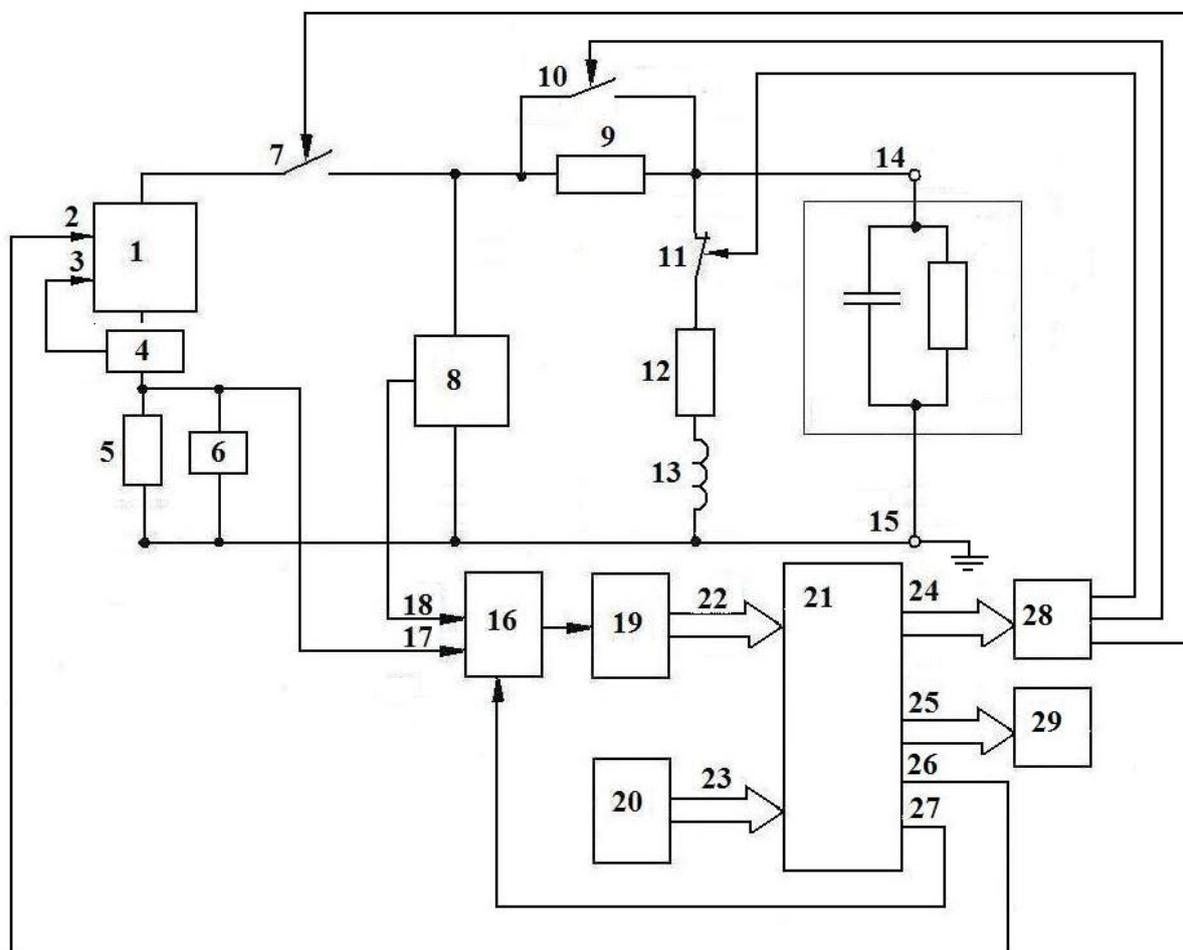


Рис. 1. Структурная схема нового устройства для контроля качества электрической изоляции

После разряда емкости изоляции в течение одной минуты в соответствии с Правилами устройства электроустановок программируемый контроллер 21 по каналу 26 подает на вход источника питания сигнал на установку требуемого значения напряжения источника питания. Далее через канал 24 и устройство сопряжения с объектом 28 подаются сигналы сначала на размыкание ключа 11 и затем на замыкание ключей 7 и 10. При указанном положении ключей 7, 10 и 11 начинается процесс заряда емкости изоляции объекта испытаний. При этом сигнал, пропорциональный току, протекающему через испытуемый объект, снимаемый с эталонного резистора 5, подается на первый вход 17 коммутатора 16. Сигнал с выхода масштабного преобразователя 8, пропорциональный напряжению на объекте испытаний, подается на второй вход 18 коммутатора сигналов 16. Сигнал, подаваемый с выхода 27 программируемого контроллера 21 периодически с большой скоростью переключает каналы двухвходового коммутатора 16, и на его выходе поочередно появляются сигналы, пропорциональные напряжению и току. Эти сигналы преобразуются аналого-цифровым преобразователем 19 и через первый канал ввода информации подаются в программируемый контроллер 21, где по известной формуле в соответствии с законом Ома рассчитывается значение сопротивления изоляции  $R$  объекта испытаний и коэффициент абсорбции как отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к его пятнадцатисекундному значению. На дис-

пнее строится зависимость сопротивления изоляции от времени и выводятся результаты расчета. Далее зарядный ключ 7 выключается, ключ 10 остается замкнутым, а ключ 11 разомкнутым и начинается процесс саморазряда изоляции, который продолжается, также, как и заряд изоляции, в течение одной минуты [3].

В процессе саморазряда измеряется только напряжение саморазряда на объекте испытания. Рассчитываются необходимые данные (емкость  $C$ ), и на дисплее 29 строится кривая напряжения саморазряда – зависимость напряжения саморазряда от времени. Через одну минуту снова включается зарядный ключ 7, ключ 10 остается замкнутым, а ключ 11 разомкнутым, и снова в течение одной минуты происходит повторный заряд изоляции. При этом повторяются те же измерения, что и при первом замере. Повторный заряд изоляции необходим для того, чтобы перед измерением возвратного напряжения компенсировать убыль заряда в изоляции, произошедшей в процессе саморазряда. Эта убыль всегда различная. Начальные условия для процесса измерения возвратного напряжения также были бы различными и их нельзя было бы сравнивать друг с другом. После окончания повторного заряда на короткое время размыкается дополнительный ключ 10 и в цепь испытуемого объекта вводится дополнительный резистор 9 известного значения. Введение дополнительного резистора увеличивает внутреннее сопротивление источника питания, что влияет на протекание процессов, обусловленных частичными разрядами в изоляции. Измеряя сопротивление изоляции с введенным и выведенным добавочным сопротивлением, можно судить об отсутствии или наличии частичных разрядов в изоляции и их интенсивности [3].

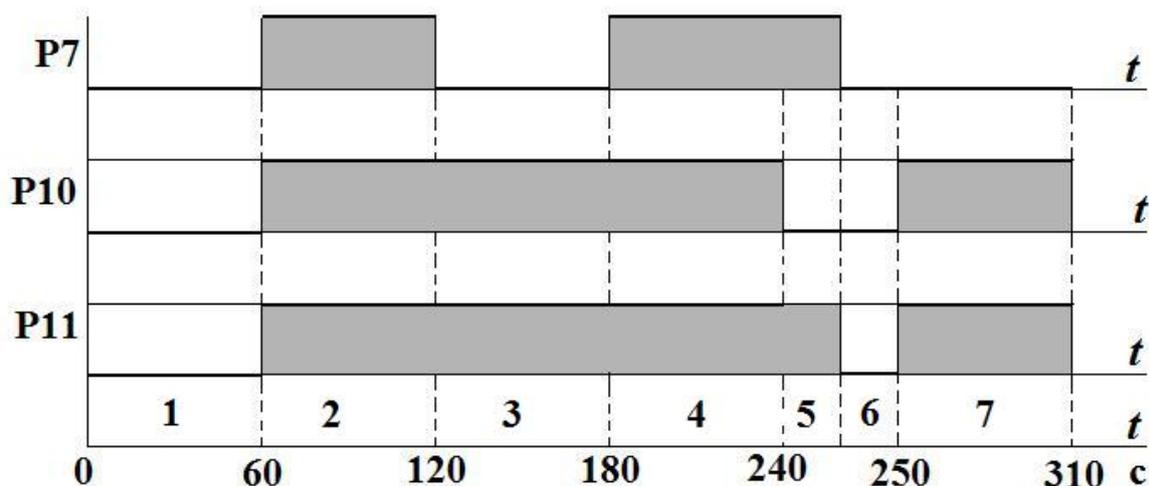


Рис. 2. Диаграмма срабатывания высоковольтных ключей устройства

После определения наличия частичных разрядов все ключи отключаются, в течение короткого времени (выбрано равным 5 с) геометрическая емкость изоляции разряжается через разрядный ключ 11, разрядный резистор 12 и индуктивную катушку 13 на «землю», а поглощенный внутри изоляции заряд абсорбции на «землю» стечь не успевает. Через 5 с разрядный ключ 11 размыкает, а ключ 10 замыкает свои контакты, процесс разряда прекращается и начинается процесс измерения возвратного напряжения, которое возникает на изоляции за счет поглощенного заряда абсорбции, постепенно заряжающего разряженную геометрическую емкость. Процесс саморазряда длится одну минуту, в течение которой измеряется возвратное напряжение и на дисплее строится его зависимость от времени. По окончании одной минуты разрядный ключ 11 замыкает свои контакты. Процесс измерения заканчивается, и оставшийся в изоляции заряд разряжается на «землю».

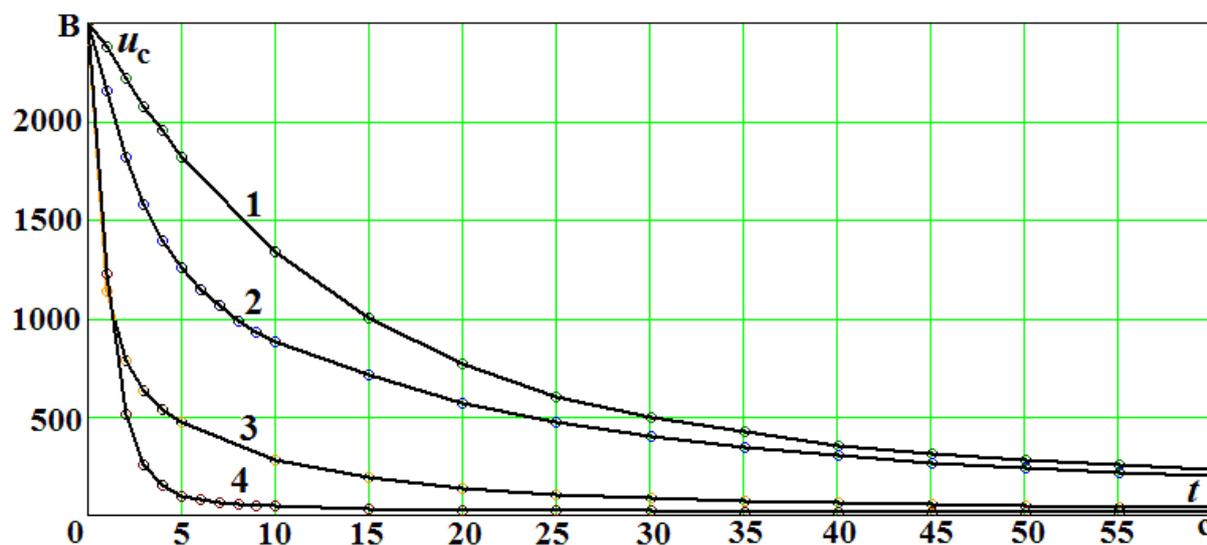
Если производится испытание крупных машин, кабелей или трансформаторов, обладающих большой емкостью, которая не успевает полностью зарядиться через одну минуту,

то в этом случае следует пользоваться стандартом США – заряжать изоляцию в течение 10 мин и коэффициент абсорбции (по стандарту США индекс поляризации) определять как отношение десятиминутного значения сопротивления изоляции к одноминутному значению.

В некоторых случаях (за рубежом), наряду с индексом поляризации, нормируют коэффициент диэлектрической абсорбции (DAR), вычисляемый как отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к тридцатисекундному ее значению. Программируемый контроллер позволяет измерять сопротивление изоляции по указанным выше программам и выдавать информацию на дисплей.

Вход 2 регулируемого источника испытательного напряжения позволяет устанавливать требуемые значения напряжения в зависимости от номинального напряжения объекта испытания. При коротких замыканиях в объекте испытания бесконтактное токовое реле подачей сигнала на вход 3 источника питания обеспечивает быстрое снятие напряжения. Ограничитель напряжения  $b$  при коротких замыканиях ограничивает уровень сигнала, снимаемого с эталонного сопротивления, и тем самым предохраняет коммутатор и АЦП от повреждений при коротких замыканиях.

На рис. 3 показаны полученные авторами с помощью разработанного прибора реальные зависимости напряжения саморазряда главной изоляции от времени для распределительных трансформаторов с разными сроками эксплуатации: 1 – новый трансформатор при вводе его в эксплуатацию), 2 – после 10 лет эксплуатации, 3 – после 28 лет эксплуатации, 4 – после полного срока эксплуатации более 40 лет, когда трансформатор полностью выработал свой ресурс. Нагрузка трансформаторов составляла 70–80% от номинальной.



**Рис. 3. Кривые саморазряда главной изоляции трансформаторов с разными сроками эксплуатации**

Как показали исследования (рис. 3) кривые напряжения саморазряда аппроксимируются тремя ярко выраженными экспонентами: *быстрой* с постоянной времени  $\tau_1=0,5-2,2$  с; *средней* с постоянной времени  $\tau_2=5-11$  с и *медленной* с постоянной времени  $\tau_3=30-70$  с. Установлено, что начальное значение у быстрой экспоненты с увеличением срока эксплуатации возрастает, а у средней и медленной – уменьшается.

Как видно из рис. 3, напряжение саморазряда с увеличением срока эксплуатации трансформаторов уменьшается. Исследованиями авторов установлено, что для напряжения саморазряда  $u_{c15}$ , измеренного на 15-й секунде после начала процесса саморазряда, уменьшение напряжения для распределительных трансформаторов составило в среднем 30 В за

год. Пользуясь этим соотношением, можно определить оставшийся ресурс главной изоляции трансформаторов. С увеличением срока службы уменьшается и возвратное напряжение, по значению которого также определяют оставшийся ресурс.

Технико-экономический эффект от предложенного устройства определяется улучшением электромагнитной совместимости устройства, повышением надежности его работы, а также более высоким уровнем автоматизации, более удобной формой обработки и отображения полученных результатов измерения и возможностью более точно прогнозировать оставшийся ресурс главной изоляции высоковольтного электрооборудования.

### Библиографический список

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования; под общей ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Кога-на, Л.Г. Мамиконянца. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2001. – 256 с.
2. Пат. РФ № 119125. Устройство для контроля качества электрической изоляции / Серебряков А.С., Семенов Д.А., Степанов Б.С., Игнаткин Д.Н. Опубл. 10.08.2012, Бюл. №22.
3. **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 22.12.2012*

**A.S. Serebryakov, D.A. Semenov**

### NEW ARRANGEMENT FOR QUALITY ASSURANCE OF ELECTRIC ISOLATION

It has been suggested the patented arrangement for diagnostics of a condition of the main isolation of a high-voltage electric equipment on a pressure of the self-category and a returnable pressure. Objective of creation of a described arrangement is to define the remained resource of electric equipment and to not admit sudden breakdowns of electric isolation while in service.

The quality monitoring of isolation is put in a basis of an arrangement of absorption characteristics, in particular, on a pressure of the self-category and a returnable pressure.

It is shown, that by results of measurements reduction of a pressure of the self-category for distributive transformers averages 30 V for a year. The created arrangement allows predicting more precisely the remained resource of the main isolation of distributive transformers.

*Key words:* diagnostics of high-voltage isolation, a charge of absorption, a current of absorption, a pressure of the self-category, a returnable pressure constants of time of the self-category, wear of isolation.