

АБСОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАЗНОЙ И ПОЯСНОЙ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НА ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Представлено методику визначення індивідуальних характеристик фазної та поясної паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги. Методика реалізована на застосуванні схеми заміщення трьохжильного кабелю в загальній металевій оболонці та аналізі результатів сукупних вимірювань абсорбційних характеристик. Система лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення характеристик фазної та поясної ізоляції є добре обумовленою. Рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь зводиться до сумування результатів сукупних вимірювань з ваговими коефіцієнтами $6/14$ та $-1/14$. Наведено результати визначення абсорбційних характеристик фазної та поясної ізоляції силового кабелю на напругу 6 кВ. Бібл. 8, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: фазова та поясна паперово-просочена ізоляція, абсорбційні характеристики, індекс поляризації, опір ізоляції, сукупні вимірювання, схема заміщення, система лінійних алгебраїчних рівнянь, стійкість рішення.

Представлена методика определения индивидуальных характеристик фазной и поясной бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения. Методика реализована на применении схемы замещения трехжильного кабеля в общей металлической оболочке и анализе результатов совокупных измерений абсорбционных характеристик. Система линейных алгебраических уравнений для определения характеристик фазной и поясной изоляции является хорошо обусловленной. Решение системы линейных алгебраических уравнений сводится к суммированию результатов совокупных измерений с весовыми коэффициентами $6/14$ и $-1/14$. Приведены результаты определения абсорбционных характеристик фазной и поясной изоляции силового кабеля на напряжение 6 кВ. Библ. 8, табл. 4, рис. 5.

Ключевые слова: фазная и поясная бумажно-пропитанная изоляция, абсорбционные характеристики, индекс поляризации, сопротивление изоляции, схема замещения, система линейных алгебраических уравнений, устойчивость решения.

Введение. Особое внимание к кабелям и кабельным линиям среднего напряжения (3-20 кВ) объясняется тем, что они составляют абсолютное большинство силовых кабелей промышленных предприятий и городов. В частности, более 90 % кабельных линий среднего напряжения выполнены кабелями с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ). Моральный и физический износ кабельных линий (КЛ) напряжением 6-10 кВ в системах электроснабжения составляет от 40 до 90 %. При этом до 70 % всех нарушений электроснабжения возникает при отказах КЛ напряжением 6-10 кВ [1, 2].

На первый взгляд решение этой проблемы заключается в замене кабелей, выработавших свой ресурс, новыми и современными кабелями, например с вулканизированным полиэтиленом. Однако, замена всех кабелей в течение нескольких лет потребует больших затрат, превышающих стоимость первоначальной прокладки. Поэтому речь идет о продлении времени эксплуатации проложенных кабелей. В этом случае возникает вопрос о надежности существующих КЛ, их остаточном ресурсе для дальнейшей работы [3-5].

Актуальным является решение проблем, связанных с переходом на систему неразрушающей диагностики. Система дает возможность классифицировать КЛ по их остаточному ресурсу, снизить аварийность. Диагностика позволяет увеличить срок службы КЛ сверх нормативного срока и с большой экономией обеспечить их техническое обслуживание и ремонт. Выявление наиболее ответственных кабелей, установление очередности диагностики, кратко- и долгосрочное планирование замены КЛ делает, с одной стороны, актуальной разработку стратегии, обеспечивающую постепенную, в течение 10-15 лет, замену КЛ новыми кабелями, а с другой, – организацию эффективной эксплуатации всего множества существ-

ующих и прокладываемых кабелей промышленных предприятий и города в целом.

Регламентированные методы испытаний и контроля состояния силовых кабелей и кабельных линий в условиях эксплуатации. Для повышения надежности работы силовых кабелей и кабельных линий применяется система планово-профилактических испытаний [5-7]. Нормы электрических испытаний силовых КЛ на номинальное напряжение до 35 кВ включительно в условиях эксплуатации приведены в табл. 1, где обозначено: П – испытание при вводе в эксплуатацию КЛ; К – испытание при капитальном ремонте КЛ; М – испытание в процессе эксплуатации между ремонтами КЛ.

Измерение сопротивления изоляции производится при вводе КЛ в эксплуатацию, после ремонта и в процессе эксплуатации до и после испытания повышенным напряжением.

Измерения сопротивления изоляции кабелей производится между жилой и металлическим экраном (оболочкой) или между жилами (для трехжильных кабелей в общей оболочке) мегомметром на напряжение 2500 В. Отсчеты величины сопротивления изоляции по шкале мегомметра производятся через 1 мин с момента приложения напряжения для исключения влияния тока абсорбции.

Испытание изоляции кабелей повышенным напряжением производится при вводе КЛ в эксплуатацию, после ремонта КЛ, а также в процессе эксплуатации между ремонтами. В ряде случаев испытания выполняются переменным напряжением промышленной частоты и повышенным напряжением с частотой 0,1 Гц. Величина испытательного напряжения для кабелей напряжением 6 и 10 кВ составляет $6U_{ном}$, а для кабелей напряжением 20 и 35 кВ – $5U_{ном}$.

Таблица 1
Нормы электрических испытаний силовых КЛ
на номинальное напряжение до 35 кВ

Наименование испытания	Вид испытания	Нормы испытания
1. Измерение сопротивления изоляции	П, К, М	Производится мегаомметром на напряжение 2500 В. Сопротивление изоляции для силовых кабелей напряжением до 1 кВ – не ниже 0,5 МОм. <i>Сопротивление изоляции для силовых кабелей напряжением выше 1 кВ не нормируется.</i>
2. Испытание изоляции повышенным выпрямленным напряжением	П, К, М	В течение 10 мин при приемосдаточных испытаниях, в течение 5 мин в эксплуатации. Величина испытательного напряжения, допустимые токи утечки и коэффициенты асимметрии в соответствии с нормами.
3. Определение электрической емкости кабелей	П	Измеренная емкость, приведенная к удельному значению, должна отличаться от заводских измерений не более чем на 5 %.
4. Испытание пластмассовой оболочки (шланга) повышенным выпрямленным напряжением	П, К, М	Испытательное напряжение 10 кВ прикладывается между металлической оболочкой (экраном) и землей, длительность приложения испытательного напряжения – 1 мин.

В процессе испытаний повышенным выпрямленным напряжением контролируются ток утечки и коэффициент асимметрии. Величины допустимых значений тока утечки и коэффициента асимметрии для силовых кабелей на номинальное напряжение 6-35 кВ приведены в табл. 2. КЛ считается выдержавшей испытания, если во время испытаний не произошло пробоя изоляции или перекрытия по поверхности концевых муфт.

Таблица 2
Допустимые значения тока утечки и коэффициента асимметрии для силовых кабелей напряжением 6-35 кВ

Номинальное напряжение, кВ	Испытательное напряжение, кВ	Допустимые значения тока утечки, мА	Допустимые значения коэффициента асимметрии (I_{max}/I_{min})
6	36	0,2	8
	45	0,3	8
10	50	0,5	8
	60	0,5	8
20	100	1,5	10
35	140	1,8	10
	150	2,0	10
	175	2,5	10

Абсолютное значение тока утечки не является браковочным показателем. КЛ с удовлетворительной изоляцией должны иметь стабильные значения токов утечки. Контроль токов утечки позволяет выявить локальные дефекты, связанные с нарушением герметичности (утечка пропиточного состава). Признаком

наличия дефекта в изоляции считается медленное спадание тока утечки или даже его нарастание, особенно при полном испытательном напряжении. При проведении испытания ток утечки должен уменьшаться. Если не происходит уменьшения значения тока утечки, а также при его увеличении или нестабильности тока, испытание следует производить до выявления дефекта, но не более чем через 15 мин.

Признаком дефекта является также асимметрия ΔI_y токов утечек соседних фаз: $\Delta I_y > 10$ мкА.

КЛ считается выдержавшей испытание, если во время испытаний:

а) не произошло пробоя или перекрытий по поверхности концевых муфт, а также роста тока утечки в период выдержки под напряжением;

б) не наблюдалось резких толчков тока.

При заметном нарастании тока утечки или появлении толчков тока продолжительность испытания следует увеличить (до 10-20 мин). При дальнейшем нарастании тока утечки или увеличении количества толчков тока испытания следует вести до пробоя кабельной линии.

Обследования кабелей повышенным напряжением часто приводят к неоправданным пробоям составленных кабелей, т.е. такие испытания не столько выявляют дефекты изоляции, сколько приводят к необратимым ее повреждениям.

Информативные диагностические параметры состояния изоляции на постоянном напряжении.

Для наблюдения дрейфа сопротивления изоляции в процессе эксплуатации кабелей необходимо выделить представительные трассы кабелей, так как измерения сопротивления всех трасс будет технически трудно осуществимо. Вместо аналоговых мегомметров (Ф4100/5, ЭС 0202/2-Г и др.) необходимо использовать более чувствительные цифровые тераомметры (например, типа М1500-Р). При этом следует иметь в виду, что измерение больших сопротивлений (свыше 1000 МОм) корректно только в том случае, если исключено влияние токов утечки i_s по поверхности изоляции. Для этого тераомметры выполняют с тремя выводами, два из которых включаются в цепь измеряемого тока i_v , протекающего сквозь объем контролируемой изоляции, а третий (экранирующий) – служит для отвода токов i_s на землю. Если этого не сделать, то будет измеряться сумма токов ($i_s + i_v$), в которой первая составляющая, не связанная со старением изоляции, может многократно превышать вторую, по которой собственно и выполняется оценка состояния изоляции.

Значительно более информативным показателем состояния изоляции, чем ее сопротивление, является кривая спада во времени зарядного тока $i_v(\tau)$. Она отражает процессы накопления объемных зарядов (абсорбции). Малая величина тока i_v и длительное время его установления служат признаком качественной изоляции. Наоборот – большая величина i_v и ее быстрое достижение установившегося значения – признак старенной или увлажненной изоляции (рис. 1).

На указанном качественном различии новой и старенной изоляции основаны *диагностические параметры, связанные с измерениями во времени.*

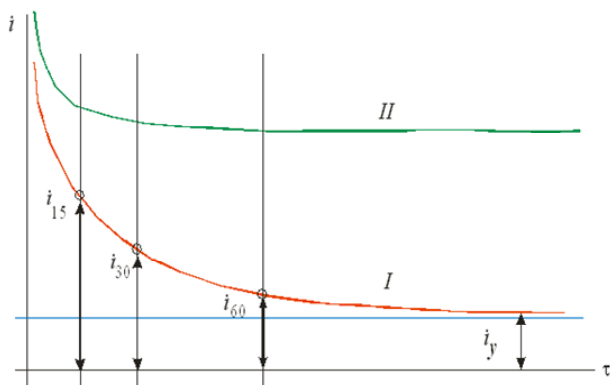


Рис. 1. Зависимости тока от времени в новой (I) и состаренной (II) изоляции

Измерения выполняются, например, на 15-й секунде с момента подачи напряжения, далее – на 30-й секунде и на 60-й секунде. Отношение сопротивлений изоляции, измеренных в эти моменты времени, дает безразмерные критерии – коэффициенты абсорбции.

Первый из них определяется как R_{30}/R_{15} (DAR – Dielectric Absorption Ratio) – *отношение диэлектрической абсорбции*. Второй – как R_{60}/R_{30} (PI – Polarization Index) – *индекс поляризации*.

Моменты измерений могут выбираться разными (вплоть до 10 мин и более).

Три измерения, выполненные в разные моменты времени, дают более полное представление о состоянии изоляции, чем измерение одного значения установившегося тока утечки (сквозной проводимости), принятое в обычных профилактических испытаниях.

Цель статьи – обоснование и тестирование методики диагностики силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по абсорбционным характеристикам фазной и поясной изоляции на основании совокупных измерений.

Индивидуальные параметры изоляционных промежутков силовых кабелей по результатам совокупных измерений. На рис. 2 приведена схема изоляции силового кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией (например, ААШВ): фазная изоляция (толщиной $\Delta 1$, с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon 2$), поясная изоляция (толщиной $\Delta 2$, с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon 3$), межфазное заполнение (из кабельной бумаги и пропитки на основе мало-канифольного компаунда с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon 1$).

В исходном состоянии свойства этих видов изоляции идентичны. В процессе длительной эксплуатации появляются *различия* свойств фазной и поясной изоляции, причем как электрических, так и механических характеристик [3-6]. Их следует рассматривать как предвестники завершения периода нормальной эксплуатации кабеля. Они могут быть вызваны неравномерным старением указанных компонентов изоляции, накоплением продуктов разложения целлюлозы, наконец, неравномерным увлажнением из-за потери герметичности соединительных и концевых муфт, защитной оболочки.

Кабель содержит ряд электродов, жилы, защитную оболочку, к которым подключаются диагностические приборы: Между электродами образуются

изоляционные промежутки, свойства которых требуется определить в ходе обследования. Вне зависимости от схемы подключения зондирующее электрическое поле захватывает как фазную, так и поясную изоляцию (рис. 3) [6]. Поэтому результаты измерений, как на постоянном, так и на переменном [6] напряжении представляют собой *совокупные* характеристики фазной и поясной изоляции.

Методика основана на построении схемы замещения [7] и анализе результатов совокупных измерений. Представим изоляционные промежутки кабеля схемой замещения (рис. 4). Каждый промежуток представлен емкостью и эквивалентным сопротивлением, отражающем ток утечки на постоянном напряжении или диэлектрические потери в изоляции на переменном напряжении [6]. Комплексные проводимости участков обозначены буквами Y . Например, $Y_{AB} = j\omega C_{AB} + \frac{1}{R_{AB}}$. Между фазами A, B, C и оболочкой O (см. рис. 2 и рис. 4) образуется 6 изоляционных промежутков. Их свойства измеряются не индивидуально, а в совокупности (рис. 3).

Так, при измерениях по схеме «фаза A – против двух других и оболочки» ($A-S$) получаем суммарную проводимость Y_{A-S} :

$$Y_{A-S} = Y_{A-B} + Y_{A-C} + Y_{A-O} \quad (1)$$

Свойства каждой из составляющих ($Y_{A-B}, Y_{A-C}, Y_{A-O}$) остаются неизвестными. Между тем, выявление именно различий в свойствах компонентов изоляции кабеля, появляющихся в процессе старения, необходимо для наблюдения за старением.

Из одного уравнения (1) нельзя найти 3 неизвестных. Всего же требуется определить характеристики 6-и промежутков: трех межфазных ($A-B, A-C, B-C$) и трех вида «фаза – оболочка» ($A-O, B-O, C-O$).

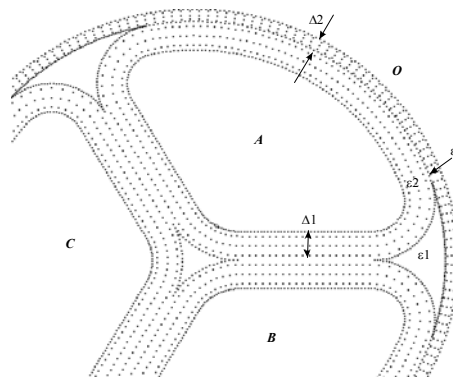


Рис. 2

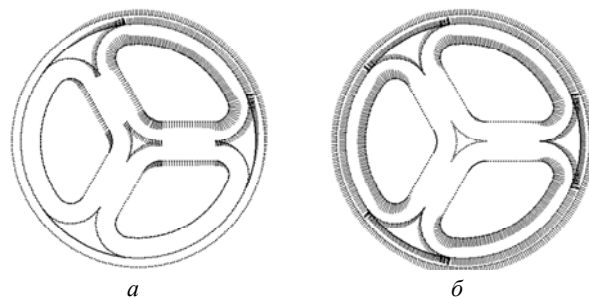


Рис. 3. Силовые линии электрического поля при обследовании кабеля по схемам: «жила – против всех остальных и оболочки» (а); «все жилы вместе – против оболочки» (б)

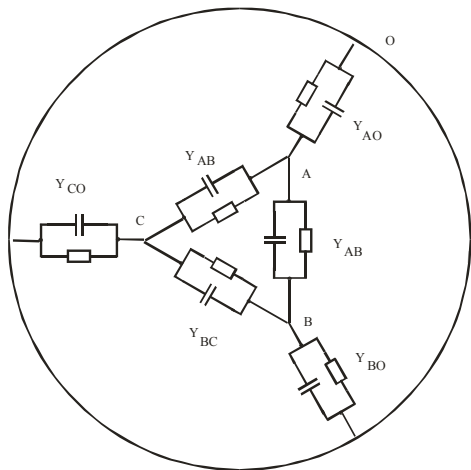


Рис. 4. Схема замещения изоляционных промежутков трехфазного кабеля ААШВ в общей металлической оболочке

Предлагаемая методика состоит в следующем.

Выполняется минимум 6 опытов по измерению совокупных характеристик кабеля, например, по следующим из 7-и возможным схемам: *A-S*; *B-S*; *C-S*; *A,B,C-O*; *A,B-C,O*; *A,C-B,O*; *B,C-A,O*.

Искомые *индивидуальные* характеристики промежутков определяются на основании решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).

При выполнении всех 7-и опытов имеет место *переопределенная* СЛАУ (система, число уравнений в которой превышает число неизвестных)

$$\begin{cases} Y_{A-S} = Y_{A-B} + Y_{A-C} + Y_{A-O} \\ Y_{B-S} = Y_{A-B} + Y_{B-C} + Y_{B-O} \\ Y_{C-S} = Y_{B-C} + Y_{A-C} + Y_{C-O} \\ Y_{A,B,C-O} = Y_{A-O} + Y_{B-O} + Y_{C-O} \\ Y_{A,B-C,O} = Y_{A-C} + Y_{B-C} + Y_{A-O} + Y_{B-O} \\ Y_{A,C-B,O} = Y_{A-B} + Y_{B-C} + Y_{A-O} + Y_{C-O} \\ Y_{B,C-A,O} = Y_{A-B} + Y_{A-C} + Y_{B-O} + Y_{C-O} \end{cases} \quad (2)$$

Переопределенная СЛАУ (2) решается методом наименьших квадратов [8]. Для этого (2) представляется в матричной форме (3)

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix} \quad (3)$$

После умножения (3) на транспонированную матрицу

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix}$$

получается СЛАУ с *симметричной* матрицей коэффициентов

$$\begin{pmatrix} 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix} \quad (4)$$

СЛАУ (4) является хорошо обусловленной, т.е. устойчивой. Числовые характеристики матрицы коэффициентов СЛАУ (4): детерминант равен 448, а наименьшее из собственных чисел – 2. Таким образом, в СЛАУ (4) погрешности правой части (результаты совокупных измерений) не повлияют сильно на результаты решения.

После умножения (4) на обратную матрицу искомые параметры изоляционных промежутков определяются как

$$\begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 4 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 4 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 4 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix};$$

$$\begin{pmatrix} Y_{A-B} \\ Y_{B-C} \\ Y_{A-C} \\ Y_{A-O} \\ Y_{B-O} \\ Y_{C-O} \end{pmatrix} = \frac{1}{14} \cdot \begin{pmatrix} 6 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 6 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 6 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 6 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 6 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_{A-S} \\ Y_{B-S} \\ Y_{C-S} \\ Y_{A,B,C-O} \\ Y_{A,B-C,O} \\ Y_{A,C-B,O} \\ Y_{B,C-A,O} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Таким образом, решение СЛАУ (2) свелось к преобразованию результатов совокупных измерений абсорбционных характеристик на постоянном напряжении по (5), т.е. суммированию результатов совокупных измерений с весовыми коэффициентами 6/14 и –1/14.

Реализация методики для определения характеристик изоляции. Для примера рассмотрим результаты *совокупных* обследований кабеля ААШВ-3×150-6 кВ (табл. 3). В табл. 3 представлены результаты измерений абсорбционных характеристик – сопротивления изоляции на 15-й, 30-й и 60-й секундах (собственно сопротивления изоляции) с момента подачи испытательного напряжения: R₁₅, R₃₀, R₆₀ соответственно. *Индивидуальные* характеристики 6-и изоляционных промежутков приведены в табл. 4.

Таблица 3
Абсорбционные характеристики кабеля ААШВ-3×150-6 кВ (результаты совокупных измерений при постоянном напряжении 2652 В)

Схема измерений	R ₁₅ , ГОм	R ₃₀ , ГОм	R ₆₀ , ГОм
A-S	83,6	85,0	101,0
B-S	84,3	86,4	105,0
C-S	75,7	89,5	105,0
A,B,C-O	21,2	62,7	74,0
A,B-C,O	18,4	64,0	74,9
A,C-B,O	18,2	61,4	73,6
B,C-A,O	17,7	57,1	67,6

Таблица 4

Параметры изоляционных промежутков кабеля ААШВ-3×150-6 кВ (индивидуальные характеристики, полученные по результатам совокупных измерений)

Изоляционный промежуток	R15, ГОм	R30, ГОм	R60, ГОм
А-В	450,27	275,11	347,20
В-С	564,86	417,53	507,44
С-А	385,20	322,21	362,02
А-О	53,19	204,99	240,72
В-О	51,21	185,32	218,89
С-О	48,78	180,95	213,38

На рис. 5 приведены абсорбционные кривые – сопротивления изоляционных промежутков образца кабеля в зависимости от времени приложения напряжения.

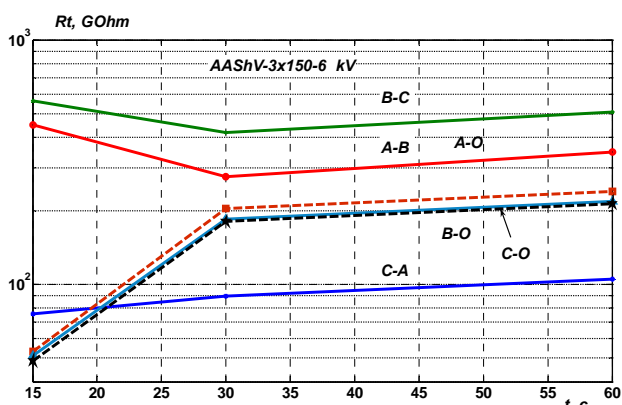


Рис. 5

Фазная и поясная изоляция практически одинакового качества: индекс поляризации R_{60}/R_{30} почти один и тот же. В данном примере максимальные различия в сопротивлениях изоляции промежутков «фаза-фаза» составляют 46 %. Наименьшее сопротивление изоляции имеет изоляционный промежуток фаз А-В. Для сопротивлений промежутков «фаза-оболочка» максимальные различия и того меньше – всего 13 %: $240,72 / 213,38 = 1,13$.

Такие различия вполне удовлетворительные для силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией, которые длительно находятся в эксплуатации.

Выводы.

Таким образом, предложенная методика позволяет определить индивидуальные абсорбционные характеристики фазной и поясной изоляции силовых кабелей среднего напряжения в общей металлической оболочке на постоянном напряжении. Индивидуальные характеристики отражают особенности эксплуатации кабелей и позволяют в большей степени оценить степень старения каждого из компонентов бумажно-пропитанной изоляции.

Оказывается, что совокупные сопротивления ряда изоляционных промежутков, включенных параллельно, *меньше*, чем в индивидуальности. Меньшие величины сопротивлений изоляции измерять легче, особенно на коротких образцах кабелей. Вместе с тем совокупный характер измерений приводит к тому, что различия свойств компонентов изоляции *сглаживаются*: результаты совокупных измерений мало отличаются для разных однотипных схем.

В то же время индивидуальные характеристики изоляции имеют *большие* различия, чем совокупные, что свидетельствует о несимметричных режимах работы кабеля. Величины сопротивлений оказываются в 3 раза больше совокупных, из-за чего их непосредственное измерение может представлять определенную проблему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канискин В.А., Коцур С.А., Привалов И.Н. Кабели 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией. Неразрушающий метод диагностики // Новости электротехники. – 2005. – №5(35). – С. 25-34.
2. Привалов И.Н. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6-35 кВ // Электротехнический рынок. – 2008. – №2. – С. 17-25.
3. Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. [и др.] Техническое состояние кабелей энергоблоков АЭС: силовые кабели с бумажно-масляной изоляцией // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС: сборник научных трудов / под ред. М.А. Ястребенецкого. – Одесса: Астропринт, 2010. – С. 262-271.
4. Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. Критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией // Электротехника и электромеханика. – 2013. – №4. – С. 32-36.
5. Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С. Современные электрические методы контроля и диагностики силовых кабелей со сшитой полиэтиленовой изоляцией // Электрические сети и системы. – 2013. – №5. – С. 35-40.
6. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке // Электричество. – №1. – 2010. – С. 48-54.
7. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – 92 с.
8. Беспрозванных А.В. Анализ матрицы коммутации при восстановлении частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь многожильных кабелей методом совокупных измерений // Электротехника и электромеханика. – 2007. – №1. – С. 62-66.

REFERENCES

1. Kaniskin V.A., Kocur S.A., Privalov I.N. Cables of 10 kV with paper-impregnated insulation. Non-destructive electrical diagnostics. *Novosti elektrotehniki – Electrical engineering news*, 2005, no.5(35), pp.25-34. (Rus).
2. Privalov I.N. Nondestructive diagnosis of power cable lines rated voltage 6-35 kV. *Elektrotekhnicheskii rynek – Electrotechnical market*, 2008, no.2, pp. 17-25. (Rus).
3. Naboka B.G., Bezprozvannykh A.V., Moskvitin E.S. Tekhnicheskoe sostoianie kabelei energoblokov AES: silovye kabeli s bumazhno-maslianoi izoliatsiei [Technical condition of the cables NPP: power cables with paper-oil insulation]. *Problemy obespecheniia bezopasnosti informatsionnykh i upravliaiushchikh sistem AES: sbornik nauchnykh trudov* [Problems of safety and control systems NPP: Collection of scientific papers], 2010, pp. 262-271. (Rus).
4. Bezprozvannykh A.V., Moskvitin E.S. Estimation criteria for degree of paper-impregnated insulated power cable ageing. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.4, pp. 32-36. (Rus).
5. Bezprozvannykh A.V., Moskvitin E.S. Modern methods of power control and diagnostics of power cables with cross-linked polyethylene insulation. *Elektricheskie seti i sistemy – Electrical networks and systems*, 2013, no.5, pp. 35-40. (Rus).

6. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S. Examination of the three-phase insulation of cables in a metal shell. *Elektrichestvo – Electricity*, 2010, no.1, pp. 48-54. (Rus).
7. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G. *Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizoljacionnyh konstrukcij* [Mathematical models and methods of calculation electrical insulation constructions]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2011. 92 p. (Rus).
8. Bezprozvannykh A.V. Analysis of a switching matrix under recovery of partial capacitance and dielectric loss tangent of multicore cables via cumulative measurements. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2007, no.1, pp. 62-66. (Rus).

Поступила (received) 10.07.2015

Безпрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
 Москвитин Евгений Сергеевич¹, к.т.н.,
 Кессаев Александр Геннадиевич¹, аспирант,
¹ Национальный технический университет
 «Харьковский политехнический институт»,
 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
 тел/phone +38 057 7076010,
 e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

G.V. Bezprozvannykh¹, E.S. Moskvitin¹, A.G. Kyessaeyv¹
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
 21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine

The absorption characteristics of the phase and zone paper-impregnated insulation of power cable at direct voltage.

Introduction. The moral and physical deterioration of medium voltage power cables with phase and zone paper-impregnated insulation requires implementation of quality systems and reliable nondestructive electric diagnostic. Informative indicator of the insulation is the time decay curve of the charging current. It reflects the processes of accumulation of space charges (absorption). The measurements are carried out the 15th since the second direct voltage supply, then – on the 30th and the second on the 60th second. The ratio of the parameters measured in these

times gives the dimensionless criteria – absorption coefficients. Three measurements are made at different times, provide a more complete picture of the state of insulation than the measurement of the value of steady leakage (conduction-through), adopted in conventional prevention trials. **Purpose.** Research and testing methods of diagnostics of power cables with paper-impregnated insulation by absorption and phase characteristics of the belt insulation based on the total measurements. **Methodology.** A procedure for determining the individual characteristics of phase and zone paper-impregnated insulation based realized on the use of the equivalent circuit of a three-core cable in the metal shell and solved of an over determined system of linear algebraic equations by least squares. **Results.** The proposed method allows determining the absorption characteristics of the individual phase and zone insulation medium voltage power cables in the overall metal shell at a direct voltage. Individual characteristics reflect the characteristics of cables and allow a greater degree to assess the degree of aging of each of the components of paper-impregnated insulation. **Originality.** Regardless of the cable connection diagrams probing electric field grabs as the phase, and zone insulation. The cumulative nature of the measurement leads to the fact that the differences in the properties of insulation components are smoothed: the aggregate results of the measurements do not differ for the different schemes of the same type. The individual characteristics of isolation, defined on the basis of the proposed method are more differences than total, indicating that non-symmetrical modes of operation of the cable. **Practical value.** The values of individual characteristics power cables 6 kV are 3 times more total, because of what their direct measurement may be a problem. The total resistance of several insulation spaces connected in parallel, behind the individual. Smaller values of insulation resistance are measured more easily, especially on short samples cables. References 8, tables 4, figures 5.

Key words: phase and zone paper-impregnated insulation, absorption characteristics, polarization index, insulation resistance, equivalent circuit, the system of linear algebraic equations, stability of the solution.