

Б.Г.НАБОКА, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", Харьков
А.В. БЕСПРОЗВАННЫХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
Харьков
Е.С. МОСКВИТИН, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков
М.В. БУТКО, гл. специалист, фирма "СТЕКС",
С.М. БУТКО, специалист, фирма "СТЕКС",
А.А. ГОЛОВАНЬ, нач. службы эксплуатации, "Полтавоблэнерго",
Полтава

КРИТЕРИИ ПО ТАНГЕНСУ УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Наведено кореляційні залежності між тангенсом кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$ – неруйнівним параметром ізоляції, та утомленою міцністю кабельних паперів на злом – руйнівним параметром ізоляції. Це дозволяє ввести обґрунтовані критерії технічного стану ізоляції кабелів за параметром $\operatorname{tg}\delta$.

Представлены корреляционные зависимости между тангенсом угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ – неразрушающим параметром изоляции, и усталостной прочностью кабельных бумаг на излом – разрушающим параметром изоляции. Это позволяет ввести обоснованные критерии технического состояния изоляции кабелей по параметру $\operatorname{tg}\delta$.

Введение. Физический износ силовых кабелей с бумажно-масляной изоляцией (БМИ) напряжением 6-10 кВ городских и областных кабельных сетей находится на уровне 70-80%, а удельная повреждаемость кабельных линий (КЛ) в среднем составляет от 4,5 до 7 случаев на 100 км/год.

Для повышения надежности работы силовых кабелей и кабельных линий применяется система плано-профилактических испытаний.

Техническое состояние изоляции кабелей определяют путем подачи постоянного испытательного напряжения, превышающего номинальное в 6 раз (табл. 1) [1]. В ряде случаев испытания выполняются переменным напряжением промышленной частоты и повышенным напряжением с частотой 0,1 Гц.

Испытание кабелей повышенным постоянным испытательным напряжением не позволяет получить достоверную информацию о

Таблица 1 – Испытательные напряжения для кабельных линий с БМИ при приеме в эксплуатации и в эксплуатации

Вид испытательного напряжения	Номинальное напряжение, кВ					
	До 1	2	3	6	10	20
Выпрямленное напряжение	2,5	12	18	36	60	175
Переменное напряжение частоты 0,1 Гц специальной формы (косинусный импульс)				12	18	35

реальном техническом состоянии силовых кабелей, а для длительно эксплуатирующихся силовых кабелей часто заканчивается пробоем изоляции. Поэтому такие испытания классифицируют как испытания, разрушающие изоляцию кабелей. Испытания повышенным постоянным напряжением целесообразно проводить при вводе новых КЛ в эксплуатацию, после ремонта кабельных линий, а также при отсутствии возможности применения для диагностики силовых КЛ средств неразрушающего контроля. В остальных случаях техническое состояние изоляции КЛ следует оценивать на основе применения неразрушающей диагностики.

Последние десять лет в Украине и за рубежом ведутся интенсивные работы по совершенствованию неразрушающих методов диагностики изоляции и выпуску предназначенной для этого аппаратуры. Эти методы ориентированы на диагностические испытания силовых кабелей и кабельных линий в эксплуатации. Достоверная диагностика состояния изоляции неразрушающими методами позволяет отказаться от профилактических испытаний изоляции разрушающими методами контроля, которые во многих случаях приводят к уменьшению ресурса, несвоевременному и непредсказуемому пробое изоляции [2-4].

Важным вопросом является оценка результатов диагностики и формулирование заключения. Для этого необходимо иметь критерии оценки по диагностируемым параметрам, которые позволяют оценить техническое состояние изоляции и прогнозировать остаточный ресурс кабеля.

Появление отечественных новых современных цифровых приборов для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь (измеритель потерь изоляции ИПИ-10, цифровой мост СА-7100) дает возможность получать интегральные характеристики состояния изоляции кабелей и кабельных линий в целом. Эти приборы работают на промышленной частоте 50 Гц, что связано с исключением резонансных явлений при диагностировании протяженных КЛ. Они имеют относительно низкую стоимость по сравнению с другими диагностиче-

скими системами, высокую надежность, простоту в использовании, помехоустойчивость, малое время испытаний, безопасность, низкие трудозатраты при использовании.

Однако обоснованные критерии оценки по параметру $\text{tg}\delta$ – тангенсу угла диэлектрических потерь, который можно использовать при проведении диагностических обследований в эксплуатации для оценки технического состояния силовых кабелей энергосистем с БМИ, отсутствуют.

Цель статьи – установление критериев по $\text{tg}\delta$ для оценки технического состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией в эксплуатации.

Оценка состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. Обоснованные критерии оценки состояния БМИ получены на основе разрушающих механических испытаний в лабораторных условиях. Для оценки технического состояния силовых кабелей с БМИ используется усталостная прочность кабельных бумаг на излом – число двойных перегибов. Этот разрушающий параметр весьма чувствителен к старению. Он меняется в процессе эксплуатации кабелей монотонно: от $N \geq 2000$ в исходном состоянии до $N = 10-50$ в состоянии, соответствующем исчерпанию ресурса кабелей с БМИ [5].

Силовые кабели с бумажно-пропитанной изоляцией содержат два вида изоляции – фазную и поясную. В исходном состоянии свойства этих видов изоляции – идентичные. В процессе старения кабелей появляются различия, вызванные деструкцией целлюлозы и миграцией низкомолекулярных полярных продуктов (НМП) ее разложения (воды, фуранов) в более холодную часть кабеля – к оболочке, в поясную изоляцию.

Появляются различия свойств фазной и поясной изоляции – признаки старения кабелей. Для НМП характерно повышенное значение $\text{tg}\delta$. В результате $\text{tg}\delta$ поясной изоляции увеличивается, а число двойных перегибов до излома – уменьшается.

В готовом кабеле свойства фазной и поясной изоляции отдельно измерить невозможно. При любой схеме обследования электрическое поле попадает как в фазную, так и в поясную изоляцию. Схемы обследований могут быть разными:

а) А-S; В-S; С-S – "жила – против двух других и оболочки". При этом получают оценку свойств, в основном, *фазной* изоляции кабеля.

б) А,В,С-О – "три жилы вместе – против оболочки". При этом получают оценку свойств, в основном, *поясной* изоляции кабеля.

в) А-В; В-С; С-А – одна из фаз относительно другой. Промежуточная схема для получения характеристик межфазного пространства.

Картины векторов напряженности электрического поля при

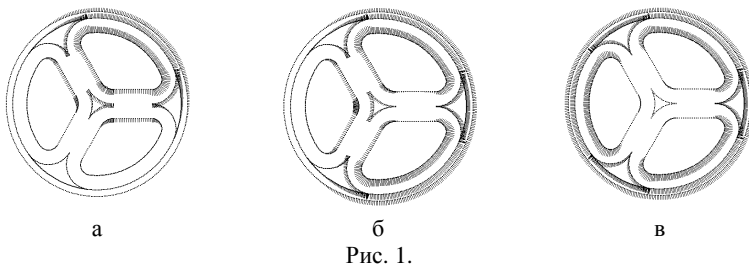


Рис. 1.

обследовании трехфазного кабеля приведены на рис. 1 для различных схем: а – "жила-против двух других и оболочки"; б – "две жилы вместе-против третьей и оболочки"; в – "три жилы-против оболочки". Следовательно, измеряются *совокупные* характеристики фазной и поясной изоляции [6].

Для каждой выбранной схемы сканирование структуры изоляции кабелей осуществляется переменным электрическим напряжением. Электрическое поле фокусируется в различных компонентах кабеля – в фазной (схемы А-С; В-С; С-С), поясной (А,В,С-О) изоляции, в межфазном пространстве (А-В; В-С; С-А) (рис. 1) [3].

В исходном состоянии (для нового кабеля) уровень $\text{tg}\delta$ для всех компонентов изоляции (фазной и поясной) практически одинаков и составляет около 0,3-0,4 % на частоте 50 Гц. Интегральные функции распределения тангенсов углов диэлектрических потерь изоляционных промежутков приведены на рис. 2 относительно нового (1) и состаренного (2) кабелей Полтавоблэнерго: 1 – ААБ-3х120-10 кВ; 2 – ААБ-3х120-10 кВ.

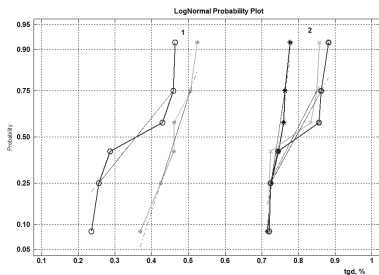


Рис. 2.

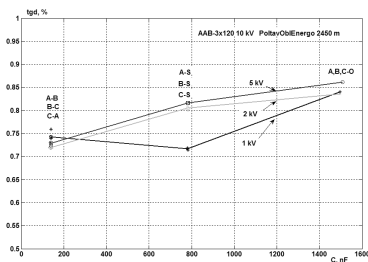


Рис. 3.

На рис. 3 приведены результаты совокупных обследований одно-

го (ААБ-3х120-10 кВ) из 29 силовых кабелей с БМИ "Полтавоблэнерго" (ПСТ Жовтнева 110/35/10кВ, РП-2,РУ-6кВ яч. 26, КЛ-6кВ до ТП-115) в натуральных условиях на частоте 50 Гц .

Для поясной изоляции (промежуток А,В,С – О) $\text{tg}\delta$ составляет 0,85%, а фазной изоляции (промежутки А-S; В-S; С-S) – 0,81%. Для межфазного пространства (промежутки А-В; В-С; С-А) еще меньше – 0,73%.

Таким образом, кабель имеет все признаки старения изоляции: повышенные значения $\text{tg}\delta$. Причем поясная изоляция состарена в большей степени, чем фазная. Возникает вопрос, какая часть ресурса изоляции исчерпана к данному моменту?

Анализ характеристик изоляции. Ответ на поставленный вопрос дают результаты испытаний *усталостных характеристик изоляционных лент*, выполненных в лабораторных условиях (рис. 3) на коротких отрезках кабелей энергосистем, полученных во время ремонтных работ.

В исходном состоянии для кабельных бумаг число двойных перегибов, выдерживаемых на излом, должно превышать 2000: $N > 2000$. Интегральные функции распределения усталостной прочности на излом полосок поясной и фазной изоляции кабеля ААБ-3х120-10 кВ показаны на рис. 4. Для данного кабеля, как видно на рис. 4, имеем:

- а) для фазной изоляции – в среднем $N_f = 2270$;
- б) для поясной изоляции – в среднем $N_p = 530$.

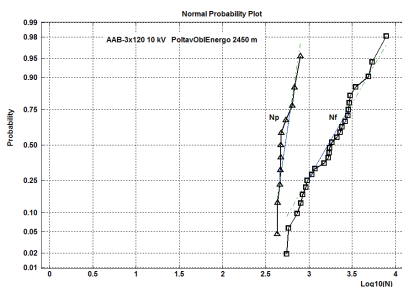


Рис. 4.

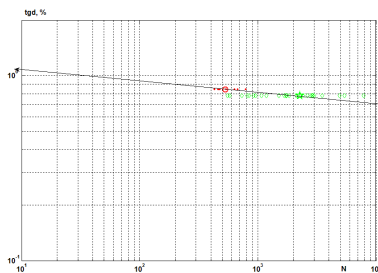


Рис. 5.

Критическое значение параметра N , при котором ресурс бумажно-масляной изоляции можно считать исчерпанным, составляет $N \approx 10$. Следовательно, фазная изоляция практически не состарилась, а поясная – исчерпала почти три четверти своего ресурса:

$$(2000 - 530)/(2000 - 10) = 1470/1990 \approx 0,74.$$

На рис. 5 показана корреляционная зависимость между усталостной прочностью фазной и поясной изоляции кабеля ААБ-3х120-10 кВ и тангенсом угла диэлектрических потерь (параметры N и $\text{tg}\delta$). Для параметра N характерен большой разброс в отличие от параметра $\text{tg}\delta$. Экстраполируя зависимость $\text{tg}\delta(N)$ в область критических значений параметра $N \approx 10$, получаем оценку критического значения тангенса угла диэлектрических потерь: $\text{tg}\delta \approx 1\%$.

Как показывают результаты усталостных испытаний кабельных бумаг на излом, можно ввести следующую градацию состояний изоляции:

- а) 0,4% и меньше – нормальное состояние изоляции;
- б) 0,4 – 0,6% – есть начальные признаки старения изоляции;
- в) 0,6 – 0,8% – умеренное старение изоляции (соответствующее, исчерпанию около три четверти ресурса);
- г) 0,8 – 2% – критическое состояние изоляции, требующее ремонта линии;
- д) свыше 2% – опасное состояние, которое может привести к тепловому пробую кабеля.

На рис. 6 приведены результаты обследований кабельных линий "Полтавэнерго" (по состоянию на май 2009 г.) с концевыми разделками с допустимыми границами по $\text{tg}\delta$ в виде функций $\text{tg}\delta(C)$, где C – электрическая емкость кабальной трассы: а – часть кабелей; б – все кабели.

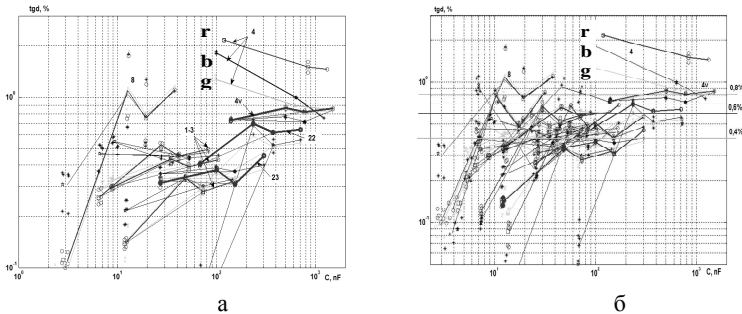


Рис. 6.

На рис. 6 видно, что кабели находятся на разных уровнях старения. Выше выделенной линии 0,8% попали кабели: № 4, № 4v (после ремонта) и № 8 (при напряжении 2 кВ). Примыкает к этой области так-

же кабель № 17. В указанных кабелях явно проявляется старение изоляции. Далее следует кабели №№9, 16, 20 и 22. Кабель №4 имеет наибольшую длину. Поэтому его характеристики расположились в правой части диаграммы (в области емкостей 100 – 1000 нФ). Тангенс угла диэлектрических потерь измерялся при напряжениях 2 кВ (отмечено символом **б**), 5 кВ (**г**) и 8 кВ (**г**).

Увеличение $\text{tg}\delta$ с ростом напряжения связано, обычно, с активацией воздушных включений, которые есть в муфтах или самом кабеле. В данном случае при напряжении 8 кВ уровень $\text{tg}\delta$ для поясной изоляции составляет 1,5 %, а для межфазной – 2 %. Воздушных включений в межфазной изоляции, вероятно, больше, чем в поясной, в которой при повышении напряжения начинаются ионизационные процессы – частичные разряды. На рис. 7 показана структура БМИ (а) и следы частичных разрядов (б) между слоями бумаги силового кабеля: 1 – слой бумаги; 2 – масляные прослойки (диэлектрические клинья); 3 – воздушные включения. После ремонта уровень $\text{tg}\delta$ понизился, но остался в области (от 0,6 до 0,8 %), которая рассматривается как область умеренно состаренной изоляции.

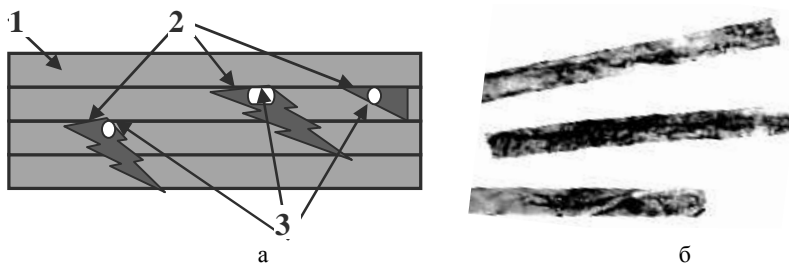


Рис. 7.

Относительно высокий уровень $\text{tg}\delta$ данного кабеля может быть результатом теплового старения изоляции фаз в течение почти 60-летней эксплуатации.

Из всех 29 обследованных кабелей "Полтавоблэнерго" с бумажно-масляной изоляцией не оказалось ни одного, изоляция которого была бы состарена до предельного состояния (когда $\text{tg}\delta$ возрастает свыше 3-4 %, а число двойных перегибов на излом снижается от исходного 2000 до 10-50). Поэтому все эти кабели могут успешно эксплуатироваться и в дальнейшем.

Для кабелей, имеющих уровень $\text{tg}\delta$ выше 0,8%, необходимо проводить повторные измерения через год. Быстрая деградация какого-

либо кабеля отразится на росте его тангенса угла диэлектрических потерь. Своевременное обнаружение этого процесса позволит предсказать момент приближающегося пробоя.

Выводы. Установленные детальные характеристики изоляции каждого кабеля и границы отбраковки по $\text{tg}\delta$ могут быть использованы в качестве рекомендательных при диагностике силовых кабелей напряжением 6-10 кВ энергосистем.

Список литературы: 1. Норми випробувать силових кабельних ліній напругою до 500 кВ – К.: "КВІЦ". – 2009. – 50 с. 2. *Привалов И.Н.* Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6-35 кВ // Электротехнический рынок. – 2008. – № 2. 3. *Кадомякая К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А., Овсянников А.Г., Сахно В.В.* Диагностика и мониторинг кабельных сетей среднего напряжения // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48-51. 4. *Канискин В.А., Коцур С.А., Привалов И.Н.* Кабели 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией. Неразрушающий метод диагностики / Новости электротехники. – 2005. – № 5 (35). 5. *Москвитин Е.С.* Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – № 34. – С. 34-40. 6. *Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Москвитин Е.С.* // Электричество, 2010. – №1. – С. 48-54. 7. *Вдовико В.П.* Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. – Новосибирск: Наука, 2007.

Поступила в редколлегию 22.07.2010