

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ СТАРЕНИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Встановлено кореляційний зв'язок між параметрами, що характеризують механічне та теплове старіння паперово-просоченої ізоляції силових кабелів середньої напруги. На основі лінійного та експоненціального регресійного аналізу при довірчій вірогідності 0,95 встановлено критичні значення тангенсу кута діелектричних втрат фазної та поясної ізоляції, що відповідають вичерпанию ресурсу кабелів.

Установлена кореляційна зв'язь между параметрами, характеризующими механическое и тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения. На основании линейного и экспоненциального регрессионного анализа при доверительной вероятности 0,95 установлены критические значения тангенса угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции, соответствующие исчерпанию ресурса кабелей.

ВВЕДЕНИЕ

Нормальная работа систем электроснабжения энергоблоков АЭС, промышленных предприятий, транспорта, сельского, коммунального и других отраслей хозяйства невозможна без надежной работы силовых кабелей низкого и среднего класса напряжения. При этом кабели с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ) напряжением 6-10 кВ являются основными в сетях "чистых" зон энергоблоков АЭС, в городских и областных кабельных сетях. Доля таких кабелей в сетях составляет свыше 99 %. Физический износ силовых кабелей городских и областных кабельных сетей находится на уровне 70-80 % [1-5]. Удельная повреждаемость кабельных линий (КЛ) в среднем составляет от 4,5 до 7 случаев на 100 км/год (рис. 1) [5]. Кабельные линии всех классов напряжения повреждаются из-за дефектов прокладки (до 20 %), старения изоляции силовых кабелей (31 %), механических повреждений (30%), заводских дефектов (10 %) и коррозии (9 %) [5].

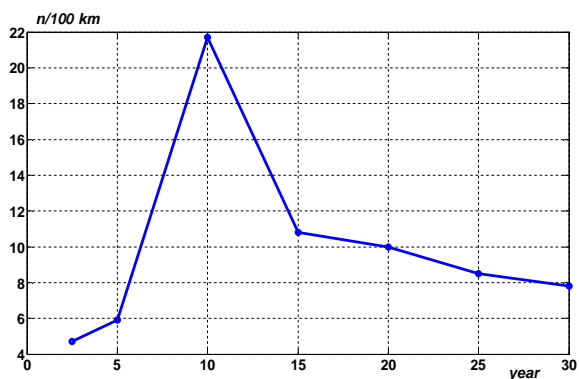


Рис. 1

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

Техническое состояние изоляции кабелей определяют путем подачи постоянного испытательного напряжения, превышающего номинальное в 6 раз.

Испытание кабелей повышенным постоянным испытательным напряжением не позволяет получить достоверную информацию о 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 кабельных линий в эксплуатацию, после ремонта эксплуатирующихся кабельных линий, а также при отсутствии возможности применения для оценки старения бумажно-пропитанной изоляции методов неразрушающего контроля. В остальных случаях техническое состояние изоляции силовых кабелей следует оценивать на основе применения неразрушающих методов контроля.

Достоверная диагностика состояния бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей неразрушающими методами позволяет отказаться от профилактических испытаний изоляции разрушающими методами контроля, которые во многих случаях приводят к уменьшению ресурса, несвоевременному и непредсказуемому пробое изоляции.

Важным вопросом является также оценка результатов контроля и формулирование заключения о возможности эксплуатации кабелей. Для этого необходимо иметь критерии оценки по контролируемым параметрам, которые позволяют оценить степень старения бумажно-пропитанной изоляции и прогнозировать остаточный ресурс силовых кабелей.

Силовые кабели имеют два вида изоляции – фазную (вокруг каждой жилы по отдельности) и поясную (вокруг трех жил вместе). Изоляция выполняется путем обмотки жил лентами кабельной бумаги. В исходном состоянии свойства фазной и поясной изоляции должны быть идентичными. В процессе старения кабелей появляются различия, вызванные деструкцией целлюлозы и миграцией низкомолекулярных полярных продуктов ее разложения в более холодную часть кабеля – к оболочке, в поясную изоляцию. В результате свойства поясной изоляции со временем ухудшаются в большей степени по сравнению с фазной. Уменьшается механическая прочность кабельных бумаг, растет тангенс угла диэлектрических потерь [6-11].

Особенностью силовых кабелей среднего напряжения является то, что для них характерно тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции в процессе эксплуатации. Толщина изоляции выбирается из условий обеспечения механической прочности. Так

как температурные коэффициенты линейного расширения кабельной бумаги – природного полимера и токопроводящих жил, металлических оболочек кабеля – разные, то при изменениях температуры меняются термомеханические напряжения в диэлектрике. Длительное действие термомеханических напряжений в условиях одновременного действия тепловых и электрических полей ведет к образованию микродефектов в твердой изоляции, уменьшению энергии активации процесса деструкции, снижению механической прочности, т.е. механическому старению. Старение диэлектрика под действием внутренних термомеханических напряжений и внешних механических воздействий описывается формулой Журкова [7]:

$$\tau_M = A \cdot e^{-\frac{W-\gamma\sigma}{kT}}$$

Формула Журкова имеет такой же вид, как и формула Аррениуса

$$\tau_T = A \cdot e^{-\frac{W_a}{kT}}$$

для теплового старения бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения: W – энергия активации процесса механической деструкции и W_a – энергия активации процесса термоокислительного старения, Дж; T – абсолютная температура; k – постоянная Больцмана; A – эмпирический коэффициент; σ – механическое напряжение в кабельной бумаге, Н/м²; γ – структурно-чувствительный коэффициент.

В процессе теплового старения тангенс угла диэлектрических потерь растет по экспоненциальному закону:

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_0 \cdot e^{m(t-t_0)},$$

где $\operatorname{tg} \delta_0$ – значение тангенса угла диэлектрических потерь при температуре, равной 20 °С, m – температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь. Для бумажно-пропитанной изоляции температурный коэффициент принимается равным $m = 0,0186$ 1/°С, для бумажно-пленочной – существенно меньше: $m = 0,005 - 0,01$ 1/°С. Для чисто пленочной изоляции можно принять $m = 0$ 1/°С.

Зависимость от температуры $\operatorname{tg} \delta$ БПИ при разных значениях тангенса угла потерь при 20 °С показана на рис. 2: 1 – $\operatorname{tg} \delta_0 = 0,003$; 2 – $\operatorname{tg} \delta_0 = 0,004$; 3 – $\operatorname{tg} \delta_0 = 0,006$; 4 – $\operatorname{tg} \delta_0 = 0,008$; 5 – $\operatorname{tg} \delta_0 = 0,01$.

Очевидно, что между параметрами, характеризующими механическое и тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей, существует корреляционная связь. Если в результате механического старения получить критические значения, соответствующие исчерпанию механического ресурса, то на основе корреляционной связи можно получить критические значения тангенса угла диэлектрических потерь бумажно-пропитанной изоляции, соответствующее исчерпанию теплового ресурса.

Цель статьи – сформулировать критерии оценки степени старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией на основе корреляционной связи между усталостной прочностью кабельных бумаг и тангенсом угла диэлектрических потерь силовых кабелей среднего напряжения.

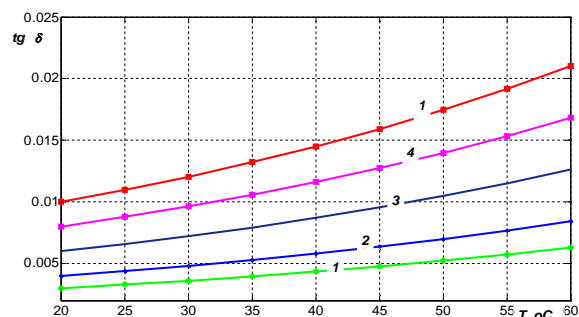


Рис. 2. Зависимость от температуры тангенса угла диэлектрических потерь бумажно-пропитанной изоляции

КРИТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Момент достижения предельного состояния, т.е. фактический конец срока службы силового кабеля, можно определить по числу двойных перегибов, выдерживаемых полосками кабельных бумаг, полученных из фазной и поясной изоляции [5-6].

Интегральные функции распределения (ИФР) числа двойных перегибов N описываются логарифмически-нормальным законом. ИФР дают представление о среднем значении (на уровне доверительной вероятности 0,5) и о редких значениях N – на уровне доверительной вероятности 0,1 и менее. Так как интегральные функции распределения спрямляются в функциональном масштабе логарифмически-нормального закона распределения, то это дает возможность оценить значения параметра N в области малых вероятностей – путем аппроксимации прямых линий в область вероятностей меньше 0,01.

В процессе эксплуатации и теплового старения наблюдается более интенсивное старение поясной изоляции. В результате появляется различие в числе двойных перегибов для поясной и фазной изоляции силовых кабелей напряжением 1-10 кВ. Так, на рис. 3 приведены ИФР силового кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией напряжением 10 кВ в исходном состоянии (кривые 1 и 2) и после дополнительного теплового старения (кривые 1' и 2').

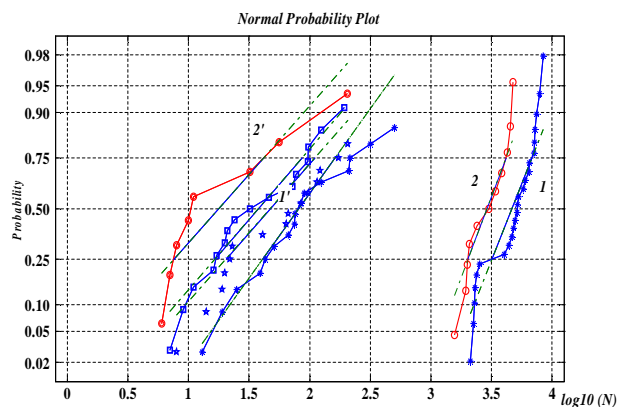


Рис. 3. Интегральные функции распределения усталостной прочности на излом полосок поясной и фазной изоляции силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией разной степени состаренности

Наблюдается различие по числу двойных перегибов поясной (кривые 2 и 2') и фазной (кривые 1 и 1') изоляции. Причем, по мере старения кабелей это различие возрастает (значения числа двойных перегибов смещаются в область меньших значений). Для предельно состаренных кабелей для поясной изоляции наблюдается излом (рис. 3, кривая 2') [7]. Установлены критерии предельного состояния БПИ по механическим характеристикам. Они определяются уменьшением числа двойных перегибов в 200 раз относительно исходного нового состояния. Критическое значение числа двойных перегибов предельно состаренной кабельной изоляции на уровне 50 % вероятности равно 10.

КРИТИЧЕСКИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ФАЗНОЙ И ПОЯСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ С УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

В силовом кабеле с БПИ непосредственно измерить характеристики каждого из компонентов изоляции: фазной или поясной изоляции по отдельности – невозможно. Любое измерение представляет собой результат совокупного влияния нескольких составляющих кабеля [8-11]. Совокупные измерения приводят к усреднению характеристик изоляции, из-за чего различия их компонентов мало заметны. Погрешности в оценке состояния изоляции возрастают.

Для определения индивидуальных характеристик фазной и поясной изоляции силовых кабелей по отдельности необходимо [8-11]:

1) выполнить совокупные измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных промежутков по 4-м схемам обследования: каждая из трех жил – против двух других и оболочки - три схемы измерения (для оценки свойств фазной изоляции) и три жилы вместе – против оболочки (для оценки свойств поясной изоляции)

2) решить систему линейных алгебраических уравнений 4-го порядка для нахождения индивидуальных характеристик $\text{tg} \delta$ фазной и поясной изоляции.

На рис. 4 приведены корреляционные зависимости между числом двойных перегибов (фазной (1) и поясной изоляцией (2)) и тангенсом угла диэлектрических потерь силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией.

Наблюдается отрицательная корреляция (рис. 4) между тангенсом угла диэлектрических потерь и числом двойных перегибов: большим значениям $\text{tg} \delta$ соответствуют меньшие значения числа двойных перегибов кабельной бумаги. Коэффициенты корреляции равны $-0,9733$ и $-0,9800$ для фазной и поясной изоляции соответственно.

Для поясной изоляции коэффициент корреляции больше, т.е. связь между тангенсом угла диэлектрических потерь и числом двойных перегибов – более тесная.

Для оценивания, т.е. определения критических значений тангенса угла диэлектрических потерь, соответствующего критическому значению числа двойных перегибов, найдено уравнение линейной регрессии для фазной и поясной изоляции по отдельности при значении доверительной вероятности $p = 0,95$.

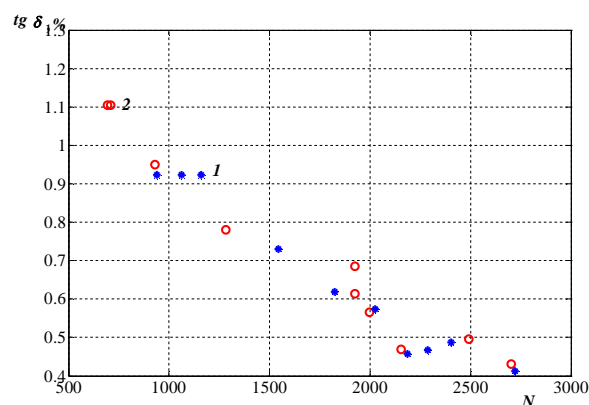


Рис. 4. Корреляционная зависимость между усталостной прочностью фазной и поясной изоляции и тангенсом угла диэлектрических потерь силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией

На рис. 5, 6 приведены результаты регрессионного анализа для фазной (рис. 5) и поясной (рис. 6) изоляции силовых кабелей напряжением 10 кВ соответственно.

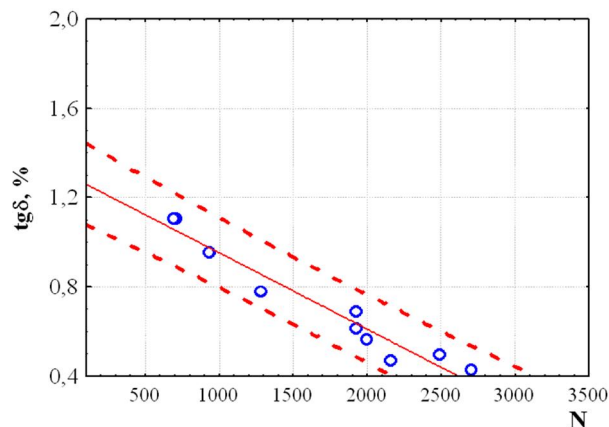


Рис. 5. К определению критического значения тангенса угла диэлектрических потерь фазной изоляции силовых кабелей с БПИ в случае линейной регрессии

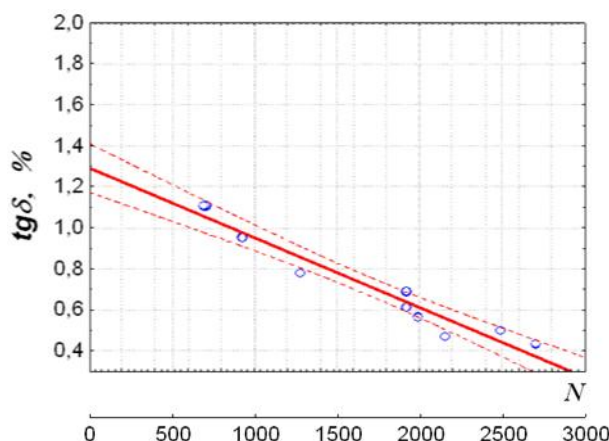


Рис. 6. К определению критического значения тангенса угла диэлектрических потерь поясной изоляции силовых кабелей с БПИ в случае линейной регрессии

Соответствующие уравнения линейной регрессии между числом двойных перегибов и тангенсом угла диэлектрических потерь имеют вид:

– для фазной изоляции:

$$\operatorname{tg} \delta_{\phi}^7 = 1,2704 - 0,00034 * N, \% , \quad (1)$$

– для поясной изоляции:

$$\operatorname{tg} \delta_n^7 = 1,2932 - 0,0003 * N, \% . \quad (2)$$

Так как механическое и тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей среднего напряжения описываются формулой Журкова и Аррениуса, т.е. экспоненциальными законами, то соответствующие уравнения экспоненциальной парной регрессии между усталостной прочностью и тангенсом угла диэлектрических потерь имеют вид:

– для фазной изоляции (рис. 7):

$$\operatorname{tg} \delta_{\phi}^3 = 1,3916 \cdot e^{-0,0003N}, \% , \quad (3)$$

– для поясной изоляции (рис.8):

$$\operatorname{tg} \delta_n^3 = 1,4961 \cdot e^{-0,0005N}, \% . \quad (4)$$

Критические значения тангенса угла диэлектрических потерь (в процентах) для частоты 50 Гц при критическом значении числа двойных перегибов, равном 10 на уровне 50 % вероятности, соответствующему критическому значению усталостной прочности кабельных бумаг, имеют значения:

– для фазной изоляции: 1,2673-1,3874 в предположении линейной и экспоненциальной парной регрессии;

– для поясной изоляции: 1,2900-1,4886 в предположении линейной и экспоненциальной парной регрессии соответственно.

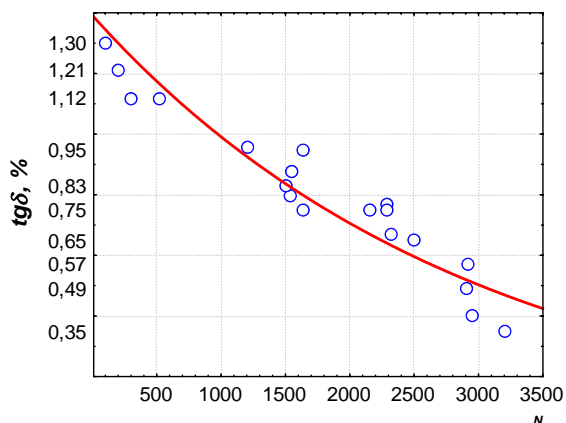


Рис. 7. К определению критического значения тангенса угла диэлектрических потерь фазной изоляции силовых кабелей с БПИ в случае экспоненциальной регрессии

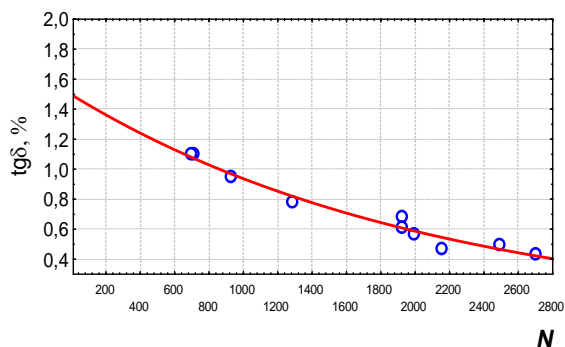


Рис. 8. К определению критического значения тангенса угла диэлектрических потерь поясной изоляции силовых кабелей с БПИ в случае экспоненциальной регрессии

На основании корреляционной связи между усталостной прочностью бумаги и $\operatorname{tg} \delta$ и регрессионного анализа можно выделить пороговые значения (уровни) потерь, характеризующие техническое состояние силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией:

- 1) 0,4% и меньше – нормальное состояние изоляции;
- 2) 0,4-0,6% – есть начальные признаки старения изоляции;
- 3) 0,6-1,0% – умеренное старение изоляции (соответствующее, как показывают результаты усталостных испытаний кабельных бумаг на излом, исчерпанию около $\frac{3}{4}$ ресурса);
- 4) 1,0-2% – критическое состояние изоляции, требующее ремонта линии;
- 5) свыше 2% – опасное состояние, которое может привести к тепловому пробою кабеля.

ВЫВОДЫ

Наличие корреляционной связи между электрическими и механическими характеристиками бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей свидетельствует о возможности их неразрушающего контроля по тангенсу угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции по отдельности.

Найдены уравнения линейной и экспоненциальной парной регрессии при значении доверительной вероятности $p = 0,95$, связывающие между собой усталостную прочность кабельных бумаг с тангенсом угла диэлектрических потерь фазной и поясной изоляции силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией.

Определены критические значения тангенса угла диэлектрических потерь для фазной и поясной изоляции по отдельности, соответствующие критическому значению числа двойных перегибов. Для оценки степени старения БПИ силовых кабелей в эксплуатации необходимо использовать консервативные оценки значений тангенса угла диэлектрических потерь, определенные на основании линейной регрессии в соответствии с (1) и (2).

На основании корреляционной связи между усталостной прочностью бумаги и $\operatorname{tg} \delta$ определены пороговые значения (уровни) тангенса угла диэлектрических потерь силовых кабелей, характеризующие техническое состояние бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения / К.П. Кадомская, В.Е. Качесов, Ю.А. Лавров и др. // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48-51.
2. Кудрин Б.И. Ранговый анализ техноценоза "Кабельная сеть 3-10 кВ ОАО "Западно-Сибирский металлургический комбинат" / Б.И. Кудрин, Г.М. Лебедев, А.Ю. Гапоненко // Промышленная энергетика. – 2007. – № 3. – С. 5-12.
3. Привалов И.Н. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6-35 кВ // Электротехнический рынок. – 2008. – № 2.
4. Кустов А. Существует ли в России диагностика силовых кабельных линий и электрооборудования... и зачем она нужна? / Энергетика и промышленность России. – 2006. – № 8 (72).
5. Москвитин Е.С. Сложность применения неразрушающих методов испытания бумажно-масляной изоляции кабе-

лей при диагностике их состояния / Е.С. Москвитин. // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Материалы XVII Международной научно-практической конференции 22-22 мая 2009. Харьков: Часть I. – С. 542.

6. Москвитин Е.С. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов / Е.С. Москвитин // Вестник НТУ "ХПИ". – №3 4. – 2006. – С. 34-40.

7. Беспрозванных А.В. Число двойных перегибов как индикатор степени старения кабельных бумаг / А.В. Беспрозванных, Е.С. Москвитин. – *Электротехника і електромеханіка*. – 2011. – № 3. – С. 62-66.

8. Беспрозванных А.В. / Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке // А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.С. Москвитин // *Электричество*. – №1. – 2010. – С. 48-54.

9. Набока Б.Г. Критерии по тангенсу угла диэлектрических потерь для оценки технического состояния силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией в эксплуатации / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, Е.С. Москвитин и др. // Вестник НТУ "ХПИ". – 2010. – №5. – С. 76-83

10. Набока Б.Г. Диагностика кабельных линий энергосистем по тангенсу угла диэлектрических потерь и постоянной времени саморазряда бумажно-пропитанной изоляцией / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, Е.С. Москвитин и др. // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 2. – С. 65-69.

11. Москвитин Е.С. Контроль процессов старения силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией по изменению диэлектрических характеристик изоляционных промежутков / Е.С. Москвитин // Вестник НТУ "ХПИ". – 2011. – № 3. – С. 95-106.

Bibliography (transliterated): 1. Diagnostika i monitoring kabel'nyh setej srednih klassov napryazheniya / K.P. Kadomskaya, V.E. Kachesov, Yu.A. Lavrov i dr. // *Elektrotehnika*. – 2000. – № 11. – S. 48-51. 2. Kudrin B.I. Rangovyy analiz tehnocenoza "Kabel'naya set' 3-10 kV OAO "Zapadno-Sibirskij metallurgicheskij kombinat" / B.I. Kudrin, G.M. Lebedev, A.Yu. Gaponenko // *Promyshlennaya energetika*. – 2007. – № 3. – S. 5-12. 3. Privalov I.N. Nerazrushayuschaya diagnostika silovyh kabel'nyh linij nominal'nyim napryazheniem 6-35 kV // *Elektrotehnicheskij rynek*. – 2008. – № 2. 4. Kustov A. Suschestvuet li v Rossii diagnostika silovyh kabel'nyh linij i `elektrooborudovaniya... i zachem ona nuzhna? / *Energetika i promyshlennost' Rossii*. – 2006. – № 8 (72). 5. Moskvitin E.S. Slozhnost' primeneniya nerazrushayuschih metodov ispytaniya bumazhno-maslyanoy izolyacii kabelej pri diagnostike ih sostoyaniya / E.S. Moskvitin. // *Informacionnye tehnologii:*

nauka, tehnika, tehnologiya, obrazovanie, zdorov'e: Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 22-22 maya 2009. Har'kov: Chast' I. – S. 542. 6. Moskvitin E.S. Ocenka tehničeskogo sostoyaniya vysokovol'tnyh kabelej s bumazhno-maslyanoy izolyaciej po chislu dvojnnyh peregibov / E.S. Moskvitin // *Vestnik NTU "HPI"*. – №3 4. – 2006. – S. 34-40. 7. Besprozvannyh A.V. Chislo dvojnnyh peregibov kak indikator stepeni starenija kabel'nyh bumag / A.V. Besprozvannyh, E.S. Moskvitin. – *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2011. – № 3. – S. 62-66. 8. Besprozvannyh A.V. / Obsledovanie izolyacii trehfaznyh kabelej v metallicheskoj obolochke // A.V. Besprozvannyh, B.G. Naboka, E.S. Moskvitin // *Elektrichestvo*. – №1. – 2010. – S. 48-54. 9. Naboka B.G. Kriterii po tangensu ugla di'elektricheskix poter' dlya ocenki tehničeskogo sostoyaniya silovyh kabelej s bumazhno-propitannoj izolyaciej v `ekspluatacii / B.G. Naboka, A.V. Besprozvannyh, E.S. Moskvitin i dr. // *Vestnik NTU "HPI"*. – 2010. – №5. – S. 76-83. 10. Naboka B.G. Diagnostika kabel'nyh linij `energosisistem po tangensu ugla di'elektricheskix poter' i postoyannoj vremeni samorazryada bumazhno-propitannoj izolyaciej / B.G. Naboka, A.V. Besprozvannyh, E.S. Moskvitin i dr. // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2011. – № 2. – S. 65-69. 11. Moskvitin E.S. Kontrol' processov starenija silovyh kabelej s bumazhno-propitannoj izolyaciej po izmeneniju di'elektricheskix harakteristik izolyacionnyh promezhutkov / E.S. Moskvitin // *Vestnik NTU "HPI"*. – 2011. – № 3. – S. 95-106.

Поступила 25.04.2013

*Беспрозванных Ганна Вікторівна, д.т.н., проф.,
Москвітін Є.С., к.т.н.*

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"
кафедра електроізоляційної та кабельної техніки
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
тел. (057) 707-60-10, e-mail: bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua

Besprozvannyh G.V., Moskvitin E.S.

Estimation criteria for degree of paper-impregnated insulated power cable ageing.

Correlation between parameters characterizing mechanical and thermal ageing of paper-impregnated insulation of medium voltage power cables is revealed. On the basis of linear and exponential regression analysis at confidence coefficient of 0.95, critical values of dielectric loss tangent of wrapping and phase insulation corresponding to the cable life termination are found.

Key words – power cables, paper-impregnated insulation, mechanical and thermal ageing, double bends number, dielectric loss tangent, linear and exponential regression analysis.